

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**



**Modo de extensión de la corteza y formación del Sistema Extensional de  
Cerralvo, sur del Golfo de California, a partir de datos de reflexión  
sísmica en 2D.**

**T E S I S**

*Que para obtener el título de*

**OCEANÓLOGO**

**PRESENTA**

**ISABELA MACIAS IÑIGUEZ**

**ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO**

**FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS**

LICENCIATURA EN OCEANOLOGIA

Modo de extensión de la corteza y formación del Sistema  
Extensional de Cerralvo, sur del Golfo de California, a partir de  
datos de reflexión sísmica en 2D..

T E S I S

*Que para obtener el título de*

OCEANOLOGO

PRESENTA

Isabela Macias Iñiguez

Aprobada por:

---

Dr. Usama Ismael Yarbuh Lugo

Director de Tesis

---

Dr. Ronald Spelz Madero  
Sinodal

---

Dr. Antonio González Fernández  
Sinodal

## Resumen

En este trabajo se realizó un análisis cinemático del Sistema Extensional de Cerralvo (SEC), al sur del Golfo de California (GC) y se propone un modelo de extensión cortical a partir del procesamiento e interpretación de 57.4 km de datos de sísmica de reflexión multicanal en dos dimensiones. La imagen sísmica muestra que en el SEC las fallas principales buzanan hacia el este con ángulos entre 10 y 25° formando un *rift* asimétrico. La magnitud de extensión horizontal calculada es de 28.0 km, lo que corresponde a un factor de adelgazamiento cortical de 2.0. La tasa de subsidencia promedio en el SEC es de 0.3 mm/año, lo que resulta en un transporte tectónico de hasta tres veces mayor en magnitud respecto a la sedimentación marina que alcanza valores de 0.1 mm/año. A lo largo del SEC el basamento acústico está delimitado por una capa con reflectores semicontinuos, lo cual puede representar fabricas cataclásticas y/o miloníticas asociadas con las fallas normales de bajo ángulo. La deformación penetrativa, el desarrollo de cuencas delimitadas por fallas normales de bajo ángulo y la magnitud de extensión horizontal a través del SEC, sugieren que la extensión cortical debe estar acomodada por un mecanismo de deformación por cizalla simple desde el Mioceno tardío hasta el Reciente. Se infiere, además, que el SEC es una prolongación oriental del sistema estructural del Bloque Los Cabos (BLC). Así, nuestro modelo regional propone que, en fases avanzadas del proceso de ruptura continental y apertura del GC, el sistema de fallas del BLC y del SEC convergen a profundidad formando una superficie de despegue regional que atraviesa a lo largo de la placa superior, en donde el bloque de techo rota hacia bajos ángulos de buzamiento formando cuencas asimétricas con transporte tectónico hacia el este. Nuestros resultados fueron contrastados con la cartografía del fondo marino al oriente del SEC. Aquí se infiere que en el límite occidental de la cuenca *pull-apart* Pescadero Norte, la superficie de despegue regional debe adquirir una geometría antilítrica, atravesando la placa inferior formando una zona de cizalla de alto ángulo. Este estilo de deformación podría resultar en la formación de complejos de núcleo metamórfico asociados con estructuras regionales tipo *rolling hinge*.

**Palabras claves:** Análisis estructural, Golfo de California, Deformación por cizalla simple.

## **Dedicatoria**

A mis padres que confiaron en mi desde el inicio de mi carrera, por no haberme dejado sola y por haberme heredado el espíritu aventurero y de fortaleza.

A mi hermana por ser la mejor amiga y por haberme apoyado cuando más lo necesité.

Este trabajo lo dedico especialmente a las personas más importantes que estuvieron presentes en esta etapa de mi vida: María, Eduardo, Daniela y Héctor.

## **Agradecimientos**

A mi director de tesis el Dr. Usama Ismael Yarbuh Lugo quien me dio la oportunidad de participar en su proyecto NPTC-UABC y confiar en mi desde el principio. Además, porque dedicó el tiempo necesario para dirigir esta tesis lo cual me encaminó a un crecimiento académico importante, pero sobre todo por su basto apoyo en la realización del trabajo y su enriquecimiento.

A los miembros del comité de mi tesis, Dr. Ronald Spelz y Dr. Antonio González quienes dedicaron tiempo para revisar y potenciar este trabajo con correcciones, críticas y sugerencias.

A los colaboradores, Dr. Juan Contreras y John M. Fletcher quienes apoyaron en el trabajo y lo mejoraron. Así como al M.C. Néstor Ramírez y la Dra. María Tazzo por su apoyo en el manejo de datos y en la realización de figuras.

Los datos utilizados en este proyecto fueron proporcionados por CICESE-CeMIEGeo-P03. Este trabajo recibió apoyo por parte del convenio PRODEP UABC- PTC-704-511-6/17-8051.

## Tabla de contenido

<b>Resumen en español</b> .....	i
<b>Dedicatoria</b> .....	ii
<b>Agradecimientos</b> .....	iii
<b>Índice de figuras</b> .....	vi
<b>Índice de tablas</b> .....	ix
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Área de estudio.....	4
1.3. Planteamiento del problema.....	4
1.4. Importancia y justificación.....	6
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1. Objetivo general.....	7
1.5.2. Objetivos específicos.....	7
1.6. Hipótesis.....	8
<b>Capítulo 2. Marco oceanográfico y geológico</b> .....	9
2.1. Oceanografía del Golfo de California.....	9
2.2. Geología de la península de Baja California y noroeste de México.....	10
2.3. Evolución tectónica del Golfo de California.....	11
2.4. Geología y estructura del Bloque Los Cabos.....	14
<b>Capítulo 3. Métodos</b> .....	17

3.1. Procesamiento de datos sísmicos.....	17
3.2. Análisis estructural.....	19
<b>Capítulo 4. Resultados.....</b>	<b>22</b>
4.1. Interpretación sísmica.....	22
4.2. Geometría y estructura.....	24
<b>Capítulo 5. Discusión.....</b>	<b>29</b>
5.1. Deformación de la corteza.....	29
5.2. Magnitud y modo de extensión .....	31
<b>Capítulo 6. Conclusiones.....</b>	<b>35</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>36</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>46</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Modelos de deformación de la corteza. (A) Cizalla pura y formación de cuencas simétricas. (B) Cizalla simple y formación de fallas asimétricas. Tomado de <a href="#">Frets (2012)</a> .....	1
<b>Figura 2.</b> Modelos de formación de fallas normales de bajo ángulo. (A) Modelo original de ruptura. (B) Rotación de bloques. (C) Rolling hinge. Las flechas representan la dirección del movimiento. Tomado de <a href="#">Carney y Janecke (2005)</a> .....	3
<b>Figura 3.</b> Mapa de las cuencas del Golfo de California. El recuadro rojo ubica el Sistema Extensional de Cerralvo <a href="#">González-Escobar et al. 2014</a> .....	5
<b>Figura 4.</b> Modo de colapso de la corteza de límite fijo y límite libre. Los círculos representan la dirección de la cizalla. Tomado de <a href="#">Teyssier et al. (2005)</a> . .....	6
<b>Figura 5.</b> Mapa regional que muestra la geología y estructura de la porción sur del Golfo de California (GC). TBC–trinchera de Baja California; FSM-SL–falla Santa Margarita-San Lorenzo; FTA–falla Tosco-Abreojos. Modificado de <a href="#">Fletcher y Munguía (2000)</a> ; <a href="#">Fletcher et al. (2007)</a> ; <a href="#">Montrella (2014)</a> ; <a href="#">Duque-Trujiullo et al. (2015)</a> ; <a href="#">Bot et al. (2016)</a> . El Sistema Extensional de Cerralvo se encuentra localizado en el recuadro de color negro (ver <a href="#">Figura 2</a> ).....	11
<b>Figura 6.</b> (A) Mapa estructural de la porción sur del Golfo de California ( <a href="#">Modificado de Fletcher et al., 2007; Duque-Trujiullo et al., 2015</a> ). El modelo de elevación digital fue creado usando GeoMapApp ( <a href="http://www.GeoMapApp.org">http://www.GeoMapApp.org</a> ). El Sistema Extensional de Cerralvo (sección sísmica AA’) se encuentra delimitado por la cuenca Pescadero hacia el este, por el Bloque Los Cabos hacia el oeste, la Isla Cerralvo y cuenca La Paz hacia el norte, y la cuenca Alarcón hacia el sur. BLC–Bloque los Cabos; CLP–cuenca La Paz; FEC–falla El Carrizal; FC–falla Centenario; FSJP–falla San Juan de lo Planes; FLG–falla La Gata; FLB–falla Los Barriles; IC–isla Cerralvo; COC–Cuenca Occidental de Cerralvo; BDC–Banco de Cerralvo; CORC–Cuenca Oriental de Cerralvo; CPN–cuenca Pescadero Norte; CPS–cuenca Pescadero Sur; ZFSC–zona de falla Santa Cruz; FTP–falla transforme Pescadero; FTSP–falla transforme Pescadero Sur; FTA–falla transforme Alarcón; CC–corteza continental; CO–corteza oceánica; CD–centro de dispersión.....	15
<b>Figura 7.</b> Etapas del procesado de datos sísmicos.....	18
<b>Figura 8.</b> Diagrama que muestra los principales parámetros estructurales de un sistema extensional. $e_1$ , $e_2$ , $e_3$ , $e_n$ , son la componente horizontal de cada falla; $e$ es la	

magnitud de extensión lineal;  $L_0$  es la longitud inicial de la estructura;  $L_1$  es la longitud final;  $\delta_e$  es la depresión estructural;  $\Delta_w$  es el espesor de los sedimentos sin-tectónicos. Modificado de Groshong (1994) y Fossen (2010)..... 21

**Figura 9.** Sección sísmica AA' del Sistema Extensional de Cerralvo, en la porción occidental de la cuenca Pescadero. El fondo marino varía entre 800 y 1900 m de profundidad. Observe los bajos ángulos de buzamiento de las pendientes de los taludes que delimitan las cuencas submarinas..... 22

**Figura 10.** (a) Interpretación del perfil de reflexión sísmica AA' del Sistema Extensional de Cerralvo. El área de color verde representa el basamento acústico delimitado por zonas de cizalla simple; las áreas de color amarillo y azul representan la sedimentación sin-tectónica. El área de color azul representa la sedimentación tardía; las líneas de color rojo corresponden con fallamiento normal..... 23

**Figura 10 (a), (b), (c), (d) y (e)** corresponden a secciones ampliadas extraídas de la línea sísmica AA'. RTM–rocas con texturas metamórficas; ZCS–zona de cizalla simple; FMS–flujo de masa superficial; SST–sedimentación sin-tectónica; SDC–superficie de contorno; CES–canal de erosión superficial; CDG–concentraciones de gas; las líneas de color rojo corresponden con las fallas observadas; las líneas punteadas de color negro representan la superficie basal de la zona de cizalla simple..... 25

**Figura 11.** (A) Modelo geológico del Sistema Extensional de Cerralvo obtenido del procesado, análisis e interpretación de la sección de reflexión sísmica AA'. (b) Marcadores de las fallas observadas en el Sistema Extensional de Cerralvo. Las estructuras analizadas se muestran con las etiquetas  $F_1$  a  $F_{18}$  (ver Tabla II). La extensión horizontal de cada falla se muestra con las etiquetas  $e_1$  a  $e_{18}$ . (c) Sección estructural reconstruida del Sistema Extensional de Cerralvo..... 27

**Figura 12.** Modelo idealizado de la extensión de la corteza y formación de sistemas de *rift* en la porción sur del Golfo de California (Wernicke, 1981, 1985; Fossen, 2010). FEC–falla El Carrizal; CLP–cuenca La Paz; CSJP–cuenca San Juan de Los Planes; SLG–Sierra La Gata; CLB–cuenca Los Barriles; COC–Cuenca Occidental de Cerralvo; BDC–Banco de Cerralvo; CORC–Cuenca Oriental de Cerralvo; BOP–banco occidental de Pescadero; CPN–cuenca Pescadero Norte; FTPS–falla transforme Pescadero Sur; la línea de color rojo AA' corresponde con la sección sísmica del Sistema Extensional de Cerralvo; el área de color azul corresponde con las aguas del Golfo de California; el área de color amarillo claro corresponde con sedimentación Terciaria; el área de color rosa y amarillo oscuro corresponde con la

placa superior e inferior, respectivamente; el área de color rojo corresponde con el manto litosférico..... 30

**Figura 13.** Localización de epicentros y mecanismos focales correspondientes a eventos sísmicos seleccionados durante 1969-2014 con magnitud > 5.0 (ver [Tabla III](#)). Observe que los sismos ocurridos a lo largo de los escarpes de fallas que delimitan la región de Cerralvo sugieren un sistema estructural tectónicamente activo. La topografía y batimetría fue tomada de GeoMapApp (<http://www.GeoMapApp.org>). El mecanismo focal del año 1969 fue tomado de [Molnar et al. \(1973\)](#). Los mecanismos focales del año 1995 fueron tomados de [Munguía et al. \(2006\)](#). El mecanismo focal del año 1983 fue tomado del catalogo CMT ([www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org)). Los mecanismos focales de los años 2007, 2014 fueron tomados del catalogo USGS-ANNS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage>). La línea de color rojo en el mecanismo focal representa la solución del plano de falla verdadero..... 33

## Índice de Tablas

<b>Tabla I.</b> Parámetros de adquisición de los datos sísmicos en el Sistema Extensional de Cerralvo, sur del Golfo de California, México.....	17
<b>Tabla II.</b> Desplazamiento horizontal y ángulo de buzamiento de las fallas asociadas al Sistema Extensional de Cerralvo, Sur del Golfo de California, México.....	26
<b>Tabla III.</b> Parámetros de mecanismos focales para sismos localizados en la región de Cerralvo-La Paz, sur del Golfo de California, México.....	32

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

Los sistemas de deformación extensional ocurren cuando las rocas son elongadas por esfuerzos tectónicos distensivos o por acción de la gravedad (Fossen, 2010). En estas regiones, la deformación de la corteza puede acomodarse por medio de dos mecanismos: (1) cizalla pura (Figura 1a; McKenzie, 1978) donde la placa inferior es adelgazada por deformación plástica y desacoplada de la placa superior por deformación frágil, formando *rifts* simétricos, en los que la extensión horizontal es balanceada contra el adelgazamiento vertical; y (2) cizalla simple (Figura 1b; Wernicke, 1981, 1985), donde la deformación es controlada por una falla de despegue que atraviesa la placa superior y cuyo transporte tectónico da origen a deformación rotacional en el bloque de techo para formar *rifts* asimétricos (Allen y Allen, 2005).

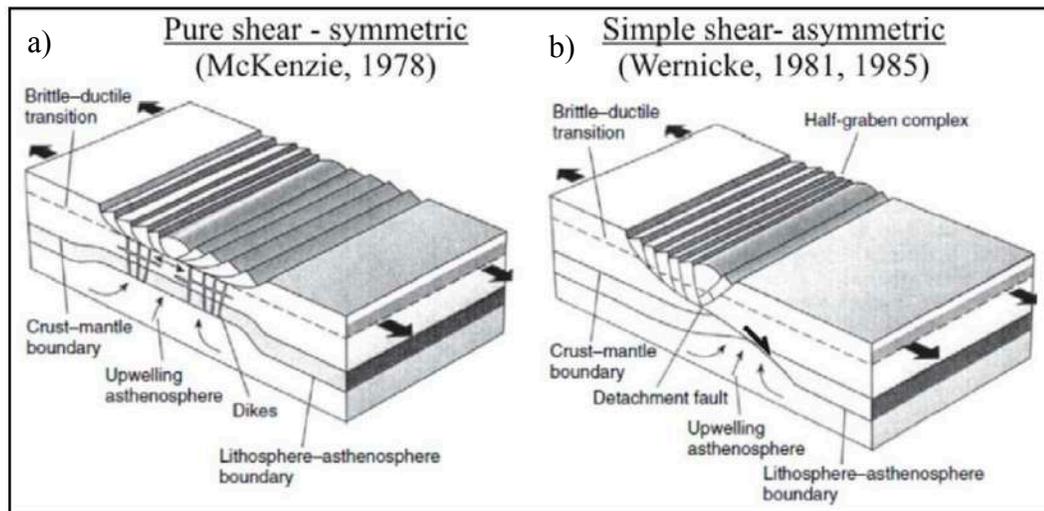
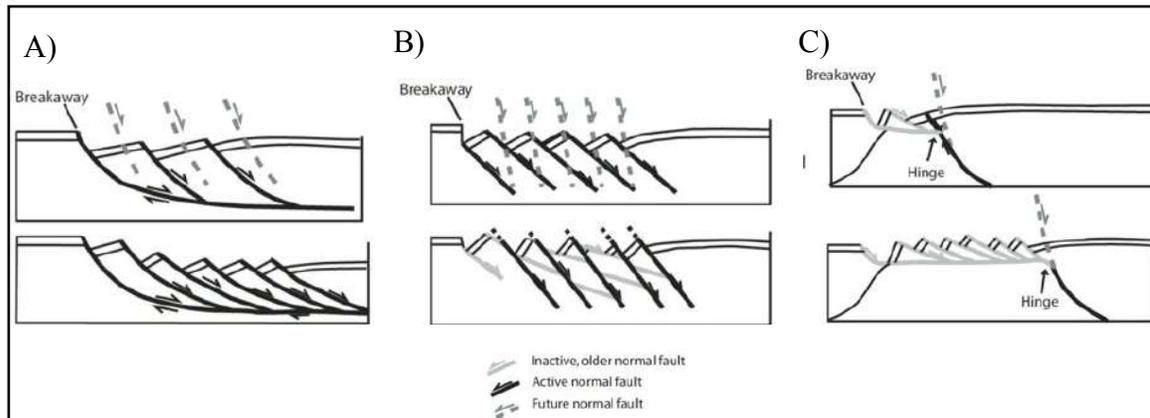


Figura 1. Modelos de deformación de la corteza. (A) Cizalla pura y formación de cuencas simétricas. (B) Cizalla simple y formación de cuencas asimétricas. Tomado de Frets (2012).

En provincias geológicas tales como el *Basin and Range* al occidente de los Estados Unidos (Wernicke, 1995) y el Bloque Los Cabos (BLC) al sur del Golfo de California (GC) (Fletcher *et al.*, 2000; Fletcher y Munguía, 2000; Fletcher *et al.*, 2003; Bot *et al.*, 2016), la formación de sistemas extensionales está íntimamente asociada a fallamiento normal de bajo ángulo y zonas de cizalla simple que acomodan una fuerte componente de extensión cortical. La deformación es controlada por una zona de despegue dúctil que adelgaza la placa superior mientras la placa inferior asciende isostáticamente y eventualmente es expuesta en la superficie, dando origen a complejos de núcleo metamórfico a lo largo del despegue basal. El bloque de techo puede rotar desde una orientación original de alto ángulo o por fallas normales con bajo ángulo de buzamiento (Davis y Coney, 1979; Coney, 1980; Wernicke, 1981; Lavier *et al.*, 1999; González-Fernández *et al.*, 2005; Whitney *et al.*, 2013).

Existen tres modelos para explicar la formación de fallas normales de bajo ángulo: (1) el modelo original de ruptura superficial sismogénica (Figura 2a; *e.g.*, Wernicke, 1995, y referencias ahí citadas); (2) el modelo de rotación de bloques (Figura 2b), donde la deformación ocurre a través de una superficie lítrica, acomodando una serie de fallas normales paralelas, con bloques que giran hacia ángulos más someros, formando estructuras tipo dominó (*e.g.*, Proffett, 1977; Axen, 1988; Stewart, 1999; Brady *et al.*, 2000; Axen y Karner, 2004); y (3) el modelo de rotación tipo *rolling hinge* (Figura 3c) que sugiere que la deformación ocurre por rebote isostático del bloque de piso, formando un antiforme que migra en la dirección del transporte tectónico. Simultáneamente, ocurre un desplazamiento del bloque de techo, generando una serie de fallas rotadas con bajos ángulos de buzamiento (*e.g.*, Wernicke, 1995; Wernicke y Axen, 1988; Axen y Karner, 2004; Fletcher y Spelz, 2009).

En este trabajo se realiza un análisis cinemático de la deformación del Sistema Extensional de Cerralvo (SEC), en el sur del GC, a partir del procesado e interpretación de 57.4 km de datos de sísmica de reflexión de alta resolución en dos dimensiones (2D). Asimismo, se presenta un modelo geológico donde se estima la magnitud de la extensión cortical y el adelgazamiento de la corteza a partir de la medición de parámetros estructurales y relaciones geométricas simples basadas en el principio general en mecánica de medios continuos de conservación de masa (*e.g.*, Yarbuh y Contreras, 2017; Contreras *et al.*, 2016).



**Figura 2. Modelos de formación de fallas normales de bajo ángulo. (A) Modelo original de ruptura. (B) Rotación de bloques. (C) Rolling hinge. Las flechas representan la dirección del movimiento. Tomado de Carney y Janecke (2005).**

Asumiendo condiciones de deformación y sedimentación en estado estacionario, *i.e.*, las velocidades de extensión y sedimentación sin-tectónica no varían con el tiempo, se estima además la tasa de subsidencia tectónica y la tasa de sedimentación en el SEC. Para estimar estos valores, la edad del comienzo de la deformación asociada con la formación del GC fue obtenida a partir de diferentes modelos de apertura del golfo (*e.g.*, Stock y Hodges, 1989; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Fletcher *et al.*, 2007; Ferrari *et al.*, 2013; Duque-Trujillo *et al.*, 2015; Balestrieri *et al.*, 2017).

Finalmente, los resultados se contrastan con la cartografía de campo realizada por Geoffroy y Pronost (2010); Bot *et al.* (2016) en el BLC y por Duque-Trujillo *et al.* (2015) en la cuenca Pescadero Norte. Este análisis ha permitido proponer un nuevo modelo regional de deformación de la corteza y la formación de sistemas de *rift* través de la porción sur del GC. La presente tesis se divide en seis capítulos. En el primer capítulo se presenta la introducción en donde se habla acerca de los antecedentes sobre sistemas extensionales y la deformación de la corteza. En el segundo capítulo se aborda el marco geológico y tectónico en donde se presenta la oceanografía del GC, la Geología de la península de Baja California y noroeste de México, la evolución tectónica del GC y la geología y estructura del BLC. En el tercer capítulo se describen los métodos donde se habla acerca del procesamiento de datos sísmicos y el análisis estructural llevado a cabo. En el cuarto capítulo se muestran los resultados de la interpretación sísmica y la geometría y estructura. En el quinto capítulo se muestra la discusión

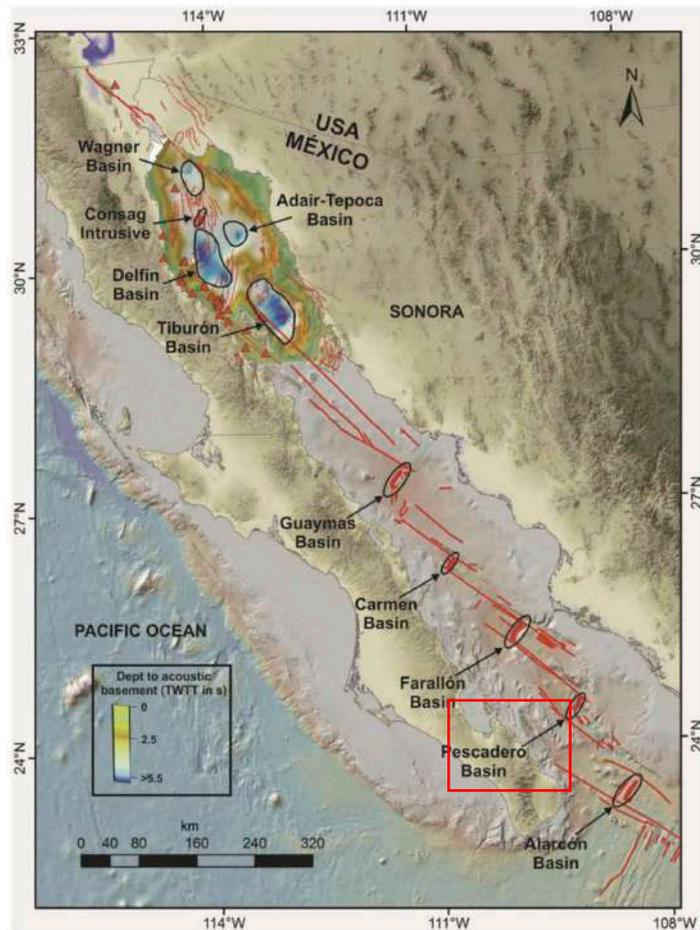
del trabajo en donde se habla acerca de la magnitud y modo de extensión en el área. Finalmente, en el capítulo seis se muestran las conclusiones de los resultados en la presente tesis.

## **1.2 Área de estudio**

La cuenca Pescadero se encuentra ubicada al sur en la boca del GC (Figura 3) entre los paralelos 24° y 25° de latitud norte y los 109° y 110° de longitud oeste. La cuenca presenta una geometría tipo “Z” (Gürbüz, 2010), con una longitud de ~220 km, un ancho de ~70 km, y una profundidad máxima al fondo marino de ~3.5 km (Gürbüz, 2010; Valdez, 2017). La línea sísmica se encuentra ubicada en la región de Cerralvo, al oeste del sistema de fallas Pescadero y Farallón que delimitan la cuenca Pescadero. La región se puede dividir en: (1) Cuenca Occidental Cerralvo (COC), (2) Banco de Cerralvo (BDC) y (3) Cuenca Oriental Cerralvo (CORC) (Sutherland et al., 2012; Duque-Trujillo et al., 2015; ).

## **1.3. Planteamiento del problema**

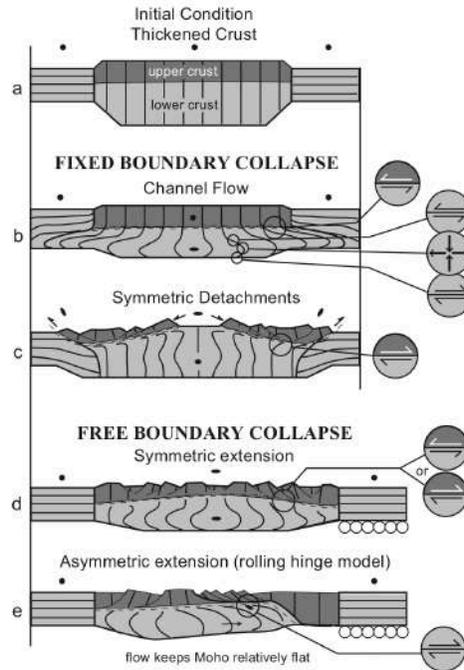
La valoración del estado térmico de GC es un problema de importancia estratégica para México ya que son áreas con anomalías geotérmicas importantes (Grijalva, 1986). El adelgazamiento de la corteza continental por la apertura del golfo, la actividad volcánica reciente y la rápida sedimentación, provee de las condiciones ideales para el desarrollo de sistemas hidrotermales. En efecto, recientes expediciones científicas han descubierto un campo hidrotermal en la porción sur de la cuenca Pescadero (Paduan et al., 2015), lo que representa una excelente oportunidad para investigar como se forman estas estructuras termales y sobre la evolución geológica de esta cuenca, que hasta el momento ha sido pobremente estudiada.



**Figura 3. Mapa de las cuencas del Golfo de California. El recuadro rojo ubica el Sistema Extensional Cerralvo, al oeste de la cuenca Pescadero. Tomado de [González-Escobar et al. 2014](#).**

Posteriores estudios en el GC han determinado distintos modelos de evolución que muestran la deformación del golfo (1) El modelo de apertura en 2 fases ([Stock y Hodges, 1989](#)), (2) El modelo de apertura de una fase ([Fletcher et al., 2007](#)) y (3) El modelo de apertura de 3 fases ([Ferrari et al., 2013](#)). Independientemente de estos modelos, se puede proponer una hipótesis sobre el modo de extensión cortical de la corteza en la cuenca Cerralvo. [Teyssier et al. \(2005\)](#) describe dos modelos ([Figura 4; Rey et al., 2001](#)) que describen el comportamiento de la placa superior e inferior: uno en el cual el colapso de la corteza gruesa se produce sin extensión en las fronteras (colapso de frontera fija) en donde puede ocurrir un colapso a partir del flujo de calor ([Figura 4b](#)) o se forman fallas simétricas de despegue ([Figura 4c](#)); y otro en el que los límites de la corteza engrosada se extienden (colapso de frontera libre) con un

modo de extensión asimétrica (Figura 4d) o una extensión asimétrica tipo *Rolling hinge* (Figura 4e).



**Figura 4. Mecanismos de colapso de la corteza de frontera fija y frontera libre. Los círculos representan la dirección de flujo. Tomado de Teyssier *et al.* (2005)**

#### 1.4. Importancia y justificación

En general, la geología regional en fases tempranas del sistema de rift del GC se encuentra bien definida gracias al análisis e interpretación de una gran variedad de datos de sísmica de reflexión multicanal y monocanal registrados por PEMEX en los años 70 y 80, por el proyecto CORTES-P96 y ULLOA-99 (e.g. Aragón-Arreola *et al.*, 2005; González-Fernández *et al.*, 2005; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Lizarralde *et al.*, 2007; Gonzalez-Escobar *et al.*, 2010; Contreras-Pérez *et al.*, 2012; Martín-Barajas *et al.*, 2013). La cobertura de datos sísmicos abarca la región al norte de las islas Ángel de la Guarda y Tiburón, Wagner, Consag, Delfín Superior, Delfín Inferior, Guaymas, Farallón, Pescadero, Alarcón y la zona de fractura del canal de Ballenas, así como de una línea sísmica a escala litosférica (Sutherland *et al.*, 2012). Estos estudios han permitido definir la geometría,

estructura, evolución tectónica y estratigráfica, variaciones en velocidad y dirección en el desplazamiento de la península de Baja California y el flujo de la corteza dúctil (Moreno y Demant, 1999; Persaud *et al.*, 2003; González-Fernández *et al.*, 2005; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; González-Escobar *et al.*, 2010; Martín-Barajas *et al.*, 2010; Hurtado-Brito, 2012; Contreras-Pérez *et al.*, 2012; Valdez 2017).

A pesar de todo el avance que se ha dado acerca de estas zonas, aún hay sitios que han sido pobremente estudiados, tales como las cuencas del sur del GC. Para entender la evolución geológica del Sistema Extensional Cerralvo (SEC) se deben de identificar los principales rasgos estructurales, estratigráficos y magmáticos de este sistema de deformación extensional. Una de las bondades de este proyecto es que la región sur del GC cuenta con una cobertura de datos de sísmica de reflexión multicanal 2D de alta resolución colectados a bordo del Buque Oceanográfico Francisco de Ulloa, propiedad del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), en colaboración con Scripps Institution of Oceanography de San Diego, Estados Unidos, durante Septiembre de 2006. Durante dicha campaña se colectaron datos sísmicos a lo largo de más de 2000 km lineales. Estos datos fueron ofrecidos por el CICESE para que el área de Geología Costera de la Facultad de Ciencias Marinas de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), los pueda utilizar con fines de investigación y docencia. Del total de datos se procesaron, interpretaron y analizaron ~57 km de datos sísmicos.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo General**

- Construir un modelo geológico del Sistema Extensional de Cerralvo, al sur del Golfo de California, a partir de datos de reflexión sísmica en 2D.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Revisar información bibliográfica sobre la evolución tectónica, estratigráfica y magmática del área de estudio.
- Generar perfiles de reflexión sísmica a partir del procesamiento de ~57 km de datos sísmicos.

- Construir un modelo geológico actual de la región a partir de la identificación de la geometría, estructura, estratigrafía y posible magmatismo asociado.
- Identificar el modo de extensión de la cuenca Cerralvo a partir de un análisis estructural.
- Proponer un modelo de deformación de la corteza en el Sistema Extensional Cerralvo.

### 1.6. Hipótesis

Con los datos colectados por CICESE se espera poder identificar estructuras geológicas asociadas a la formación del sistema de *rift* en la porción sur del GC. La cobertura sedimentaria que rellenan las cuencas debe tener un espesor tal que permita definir límites de secuencia y distintos tipos de roca, basados en el carácter sísmico, coherencia y continuidad lateral de los sismo-reflectores (Chopra y Marfut, 2007).

Diferentes modelos de deformación han sido propuestos para el GC donde se observan distintas cinemáticas en la región. La hipótesis sugiere diferentes estadios de deformación estructural desde que la península de Baja California y el continente norteamericano estaban unidos hasta la configuración actual del GC. La fase temprana de ruptura continental debe estar controlada por cizalla pura formando cuencas simétricas (McKenzie, 1978), que posteriormente quedaron abandonadas en los márgenes de *rift*, dando paso a la deformación por cizalla simple para formar cuencas asimétricas (Wernicke, 1981, 1985), donde el ascenso dinámico del manto permite la formación de complejos de núcleo metamórfico asociados a estructuras regionales tipo *Rolling hinge* (Lavier *et al.*, 1999; Fossen, 2010), con una fuerte componente de adelgazamiento cortical, para formar centros de dispersión y nuevo piso oceánico a lo largo del eje del golfo.

## Capítulo 2

---

### Marco oceanográfico y geológico

#### 2.1. Oceanografía del Golfo de California

El GC es un mar semi-cerrado localizado en una región semi-árida que colinda con la península de Baja California y al este con los estados de Sonora y Sinaloa; en su extremo sur se encuentra comunicado con el océano Pacífico (Rodén 1964; Lavín y Marinone, 2003). Presenta un clima que es más continental que oceánico lo que contribuye a los largos rangos de temperatura anuales y diurnos que se presentan ahí (Rodén 1964). Es una larga cuenca de evaporación con promedios anuales que se encuentran en un intervalo de 200 y 250 cm por año (Rodén 1964).

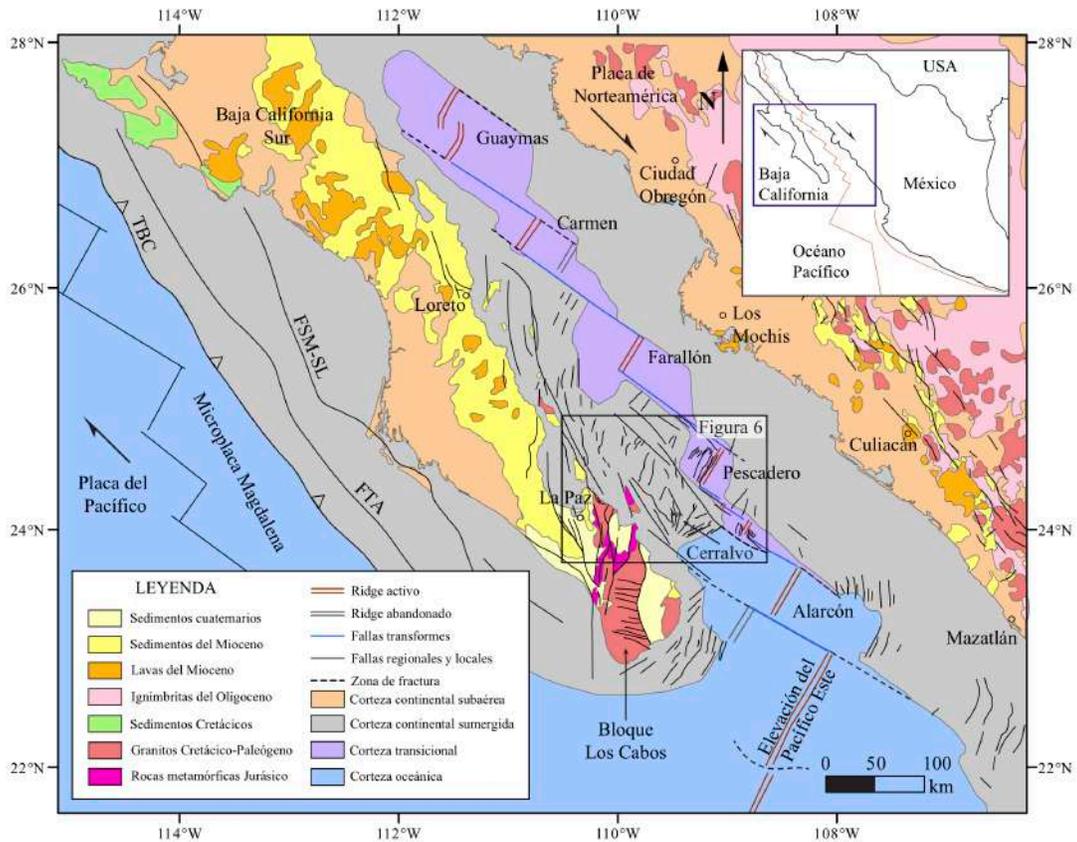
Comúnmente la capa superficial del golfo está ocupada en gran parte por el Agua del Golfo de California (AGC) la cual se distingue por su alta salinidad. También puede coexistir con la masa de Agua de la Corriente de California (ACC) y la masa de Agua Superficial Ecuatorial o Tropical (ASE). A mayor profundidad se encuentran las masas de Agua Subsuperficial Subtropical (ASsSt), Agua Intermedia del Pacífico (AIP) y Agua Profunda del Pacífico (APP) (Castro *et al.*, 2000).

El GC es el único mar marginal del Océano Pacífico oriental subtropical (Castro *et al.*, 2000). La porción sur del GC es una región de importancia desde el punto de vista geológico y oceanográfico. La combinación de diferentes procesos físicos como corrientes de marea, mezcla vertical y variaciones estacionales de temperatura, favorece la formación de importantes ecosistemas biológicos con altas concentraciones de biomasa fitoplanctónica, por lo que se considera como uno de los mares más productivos del mundo (Álvarez-Borrego y Lara-Lara 1991; Marinone 2012; Sarabia-Trejo, 2015; Goffredi *et al.*, 2017). En las zonas abisales, fluidos ácidos, alcalinos, fumarolas blancas y negras que alcanzan temperaturas *ca.* 290° – 349° C, se asocian con la formación de chimeneas hidrotermales (eg. Paduan *et al.*, 2018) en donde se ha originado un ambiente biológico extremófilo bastante diverso (Goffredi *et al.*, 2017).

## 2.2. Geología de la península de Baja California y noroeste de México

Las provincias magmáticas de la península de Baja California y el noroeste de México registran la historia tectónica de la subducción de la placa Farallón por debajo de la placa Norteamericana durante el Mesozoico (Gastil, 1993). Como resultado de esta tectónica convergente, el metamorfismo regional y el magmatismo asociado a la subducción resultó en la formación de un batolito peninsular compuesto principalmente por intrusiones de monzogranitos y gabros, mientras que en la parte oriental son comunes las granodioritas y las tonalitas (Figura 5; Silver y Chappell, 1988; Walawender *et al.*, 1990; Duque-Trujillo *et al.*, 2015; Bot *et al.*, 2016). El batolito peninsular, con una longitud de *ca.* 1000 km está bien expuesto a lo largo de la península y continúa hacia el sur de La Paz, en el BLC, donde se extiende por otros *ca.* 400 km (Figura 4; Gastil *et al.*, 1975; Montrella, 2004; Langenheim *et al.*, 2014; Duque-Trujillo *et al.*, 2015; Bot *et al.*, 2016).

Durante el Cenozoico dominaron los depósitos de origen volcánico y sedimentario (Figura 5). En el norte de la península, las secuencias volcánicas del Mioceno temprano a Mioceno medio se formaron por la activación de volcanes dacíticos a andesíticos durante la subducción de la Placa Farallón-Guadalupe (Stock y Lee, 1994; Martín-Barajas, 2000). Las secuencias volcanosedimentarias del Oligoceno tardío al Mioceno medio conocidas como el Grupo Comondú (Umhoefer *et al.*, 2001; Bryan *et al.*, 2014), se asocian con un magmatismo sin-tectónico ocurrido durante de la subducción del Oligoceno-Mioceno (Umhoefer *et al.*, 2001; Ferrari *et al.*, 2018). Este grupo se divide en tres miembros estratigráficos: (1) el miembro inferior (<300 m de espesor) consiste de secuencias de areniscas y conglomerados de origen fluvial que gradan a depósitos de sedimentos eólicos a escala local, con presencia de tobas félsicas y flujos de lava basáltica que representan facies distales de la Sierra Madre Occidental; (2) en el miembro intermedio (<750 m) predominan las brechas sedimentarias masivas intercaladas con flujos menores de andesita; y (3) el miembro superior (< 600 m) consiste de flujos de lava andesíticos y brechas volcánicas masivas (Hausback 1984; Sawlan y Smith 1984; Umhoefer *et al.*, 2001; Godinez *et al.*, 2010; Bryan *et al.*, 2014; Duque-Trujillo *et al.*, 2015).



**Figura 5.** Mapa regional que muestra la geología y estructura de la porción sur del Golfo de California (GC). TBC–trinchera de Baja California; FSM-SL–falla Santa Margarita-San Lorenzo; FTA–falla Tosco-Abreojos. Modificado de Fletcher y Munguía (2000); Fletcher *et al.* (2007); Montrella (2014); Duque-Trujiullo *et al.* (2015); Bot *et al.* (2016). El Sistema Extensional de Cerralvo se encuentra localizado en el recuadro de color negro (ver Figura 6).

### 2.3. Evolución tectónica del Golfo de California

El GC es una cuenca estructural caracterizada por una deformación transtensional con orientación NW-SE de *ca.* 1500 km de longitud y *ca.* 200 km de ancho, caracterizada por fallas de desplazamiento lateral que conectan una serie de cuencas tipo *pull-apart* formadas desde el Mioceno medio-tardío hasta el Reciente (Figura 5; Lonsdale, 1989; Stock y Hodges, 1989; Bohannon y Parsons, 1995; Henry y Aranda-Gómez, 2000; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Umhoefer, 2011; Contreras-Pérez *et al.*, 2012; Duque-Trujillo *et al.*, 2015). La parte norte del golfo se caracteriza por conectar cuencas amplias y someras conectadas por fallas transformes con paquetes de sedimentos de hasta 5 km, producto del aporte de terrígenos provenientes del río Colorado, desde el Mioceno Medio-Tardío hasta el Reciente

(cuencas Altar, Wagner, Consag, Delfín, Adair-Tepoca y Tiburón; Aragón-Arreola *et al.*, 2005; González-Fernández *et al.*, 2005; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Contreras-Pérez *et al.*, 2012). En contraste, la parte central y sur del golfo está caracterizada por grandes tirantes de agua, cuencas estrechas y alargadas con espesores sedimentarios de hasta 1 km, y conectadas por un arreglo bien desarrollado de fallas transformes dextrales que se extienden sobre corteza transicional y oceánica (cuencas Guaymas, Carmen, Farallón, Pescadero y Alarcón; Lonsdale, 1989; Fenby y Gastil, 1991).

Durante el Cenozoico la placa Farallón fue consumida debajo de la placa de Norteamérica (Atwater, 1970). Con este evento se dio inicio a una extensión tras-arco en el Oligoceno tardío al Mioceno temprano (Gans, 1997; McDowell *et al.*, 1997; Wong *et al.*, 2010; Ferrari *et al.*, 2013; Bryan *et al.*, 2014; Balestrieri *et al.*, 2017). A partir de *ca.* 12.5 Ma, tras el cese de la subducción y el abandono secuencial de pequeñas microplacas (*e.g.*, Guadalupe y Magdalena) a lo largo de la margen occidental de Baja California, una parte de la placa de Norteamérica se acopló a la placa del Pacífico por cizalla viscosa (Negrete-Aranda *et al.*, 2014) y desde entonces ha sido arrastrada hacia el noroeste (por una distancia de *ca.* 650 km) dando inicio a la ruptura continental, volcanismo intraplaca y la formación del GC (Bohannon y Parsons, 1995; Fletcher *et al.*, 2007; Negrete-Aranda *et al.*, 2014; Ferrari *et al.*, 2018).

Diferentes modelos cinemáticos han sido propuestos para describir la formación del GC (*e.g.*, Stock y Hodges, 1989; Henry y Aranda-Gómez, 2000; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Fletcher *et al.*, 2007). El modelo de evolución cinemático de apertura del GC en dos fases (*e.g.*, Stock y Hodges, 1989; Henry y Aranda-Gómez, 2000; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007), propone que la cizalla transtensiva asociada con el movimiento relativo entre las placas Pacífico y Norteamérica fue particionada en dos zonas de deformación en cada lado de la microplaca de Baja California. En esta primera fase se propone que toda la cizalla lateral derecha (300-350 km) fue acumulada exclusivamente a lo largo del sistema Tosco-Abreojos al oeste de Baja California y al mismo tiempo toda la componente extensiva fue acumulada en la región del futuro GC por fallas normales. Se propone que la segunda fase (*ca.* 6 a 0 Ma) inició cuando las fallas laterales al oeste de Baja California murieron y esta componente de movimiento relativo migró hacia la región del

futuro GC formando el régimen de cizalla transtensiva que se observa hoy en día (Stock y Hodges, 1989; Henry y Aranda-Gómez, 2000; Oskin y Stock, 2003; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Darin *et al.*, 2016; Balestrieri *et al.*, 2017).

Hasta la fecha de este trabajo, nadie ha intentado contestar dos preguntas fundamentales sobre la dinámica de este modelo cinemático. La primera es, por qué la cizalla dextral transtensiva fue particionada en dos zonas de cizalla distintas. La segunda es, porqué las fallas más dominantes de la frontera de placa al oeste de Baja California murieron hace 6 Ma. Existe mucha evidencia observacional en contra de este primer modelo de la apertura del GC en dos fases. Con base en correlaciones litológicas regionales, Fletcher *et al.* (2007) demostraron que el desplazamiento finito acomodado por la zona de cizalla al oeste de Baja California es menor a 150 km. Este sistema no solo consiste en fallas laterales sino también presenta grandes cuencas extensionales, lo cual demuestra que el régimen de cizalla es una de transtensión integrada (Fletcher *et al.*, 2007; Brothers *et al.*, 2012). Además, estudios geodésicos demuestran que este sistema de fallas sigue siendo activo en el presente (Dixon *et al.*, 2000; Gonzalez-Garcia *et al.*, 2003; Plattner *et al.*, 2007). En la Provincia Extensional del Golfo, varios estudios han demostrado que el inicio de un régimen de cizalla transtensiva ocurrió mucho antes de 6 Ma. Muchos estudios han demostrado que fallas laterales y el régimen de cizalla transtensiva fueron activados durante la primera fase de apertura *ca.* 12-6 Ma (Seiler *et al.*, 2010; Bennett *et al.*, 2013a; Ferrari *et al.*, 2013; Bennett, *et al.*, 2016; Darin *et al.*, 2016).

Fletcher *et al.* (2007) propusieron que desde el abandono del sistema de dorsales y fallas transformantes la paleo Elevación del Pacífico Oriental al oeste de Baja California hace *ca.* 12 Ma, la cizalla dextral transtensiva entre las placas Pacífico-Norteamérica fue acomodada principalmente en la región del futuro GC (450 km) con una cantidad menor (150 km) acomodada en el prisma de acreción al oeste de Baja California. En este modelo las dos zonas de deformación acomodaron cizalla transtensiva integrada desde el inicio de la interacción directa entre las placas del Pacífico y Norteamérica.

Más recientemente, Ferrari *et al.* (2013); Bryan *et al.* (2014) modificaron el modelo cinemático de la apertura del GC con base en evidencias de tectonismo extensional previo a la reorganización de la frontera de placas Pacífico-Norteamérica hace *ca.* 12 Ma. Estos

autores documentaron que a lo largo de la margen oriental del GC la corteza fue adelgazada a la mitad de su espesor original hace 11-10.5 Ma, cuando fueron emplazados flujos basálticos post-tectónicos, justo por encima del nivel de mar en Sinoloa y Nayarit. [Ferrari \*et al.\* \(2013\)](#) proponen que gran parte de la magnitud del adelgazamiento cortical ocurrió por extensión tras-arco que inició en el Oligoceno hace *ca.* 30 Ma. Su reconstrucción cinemática sólo requiere 350 km de cizalla transtensiva en la región del golfo después de *ca.* 12 Ma. Aunque todavía existe controversia sobre la cantidad de desplazamiento acumulado después de *ca.* 12 Ma, a la fecha de este trabajo existe un consenso sobre el carácter transtensivo de la cizalla durante este periodo.

#### **2.4. Geología y estructura del Bloque Los Cabos**

El BLC está ubicado en el extremo sur de la península de Baja California, justo en la transición entre el Golfo de California y el océano Pacífico ([Figura 5](#)). En esta región, la corteza continental está constituida por un basamento granítico, metamórfico y sedimentario de edad Mesozoico, sobre el cual sobreyacen sedimentos del Mioceno hasta el Cuaternario ([Figura 5](#); [Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1988](#); [Schaaf \*et al.\*, 2000](#); [Fletcher \*et al.\*, 2003](#); [Montrella, 2004](#); [Duque-Trujillo \*et al.\*, 2015](#); [Bot \*et al.\*, 2016](#); [Balestrieri \*et al.\*, 2017](#)).

En la margen occidental del BLC el basamento superior granítico contrasta con la geología circundante, la cual es dominada por sucesiones de ignimbritas, así como rocas volcanoclásticas y epiplásticas del grupo Comondú ([Figura 5](#); [Fletcher \*et al.\*, 2000](#); [Bryan \*et al.\*, 2014](#); [Ferrari \*et al.\*, 2017](#)). En la margen oriental, el BLC está caracterizado por la presencia de secuencias sedimentarias del Cenozoico, mientras que hacia el norte se observan en contacto con complejos metamórficos pre-batolíticos compuestos por rocas metasedimentarias y gneises tonalíticos ([Figura 5](#); [Aranda-Gómez y Pérez-Venzor, 1988](#); [Fletcher \*et al.\*, 2000](#); [Schaaf \*et al.\*, 2000](#); [Montrella, 2004](#)).

Las facies metasedimentarias encontradas en la Sierra La Gata e Isla Cerralvo representan el cinturón metamórfico del BLC ([Figura 5](#); [Montrella, 2004](#)). Hacia la margen oriental de la Sierra la Gata, la cuenca Los Barriles ([Figura 6](#)) está compuesta por una secuencia sedimentaria marina del Mioceno que gradúa hacia depósitos continentales del Plioceno y abanicos aluviales del Pleistoceno y Holoceno ([Schwennicke y Umhoefer, 2008](#);

Arreguín-Rodríguez y Schwennicke, 2013; Schwennicke *et al.*, 2017). Hacia la Isla Cerralvo el basamento está compuesto principalmente por rocas graníticas y metamórficas (Figura 5), cortadas por diques de composición máfica, que subyacen a rocas sedimentarias y volcánicas del Terciario y rocas carbonatadas del Plioceno (Montrella, 2004). Hacia a el fondo marino del BLC, frente a las islas Cerralvo, San José y cuenca Pescadero son comunes las intrusioniones de monzogranitos de edad Mioceno medio (Duque-Trujillo *et al.*, 2015; Balestrieri *et al.*, 2017).

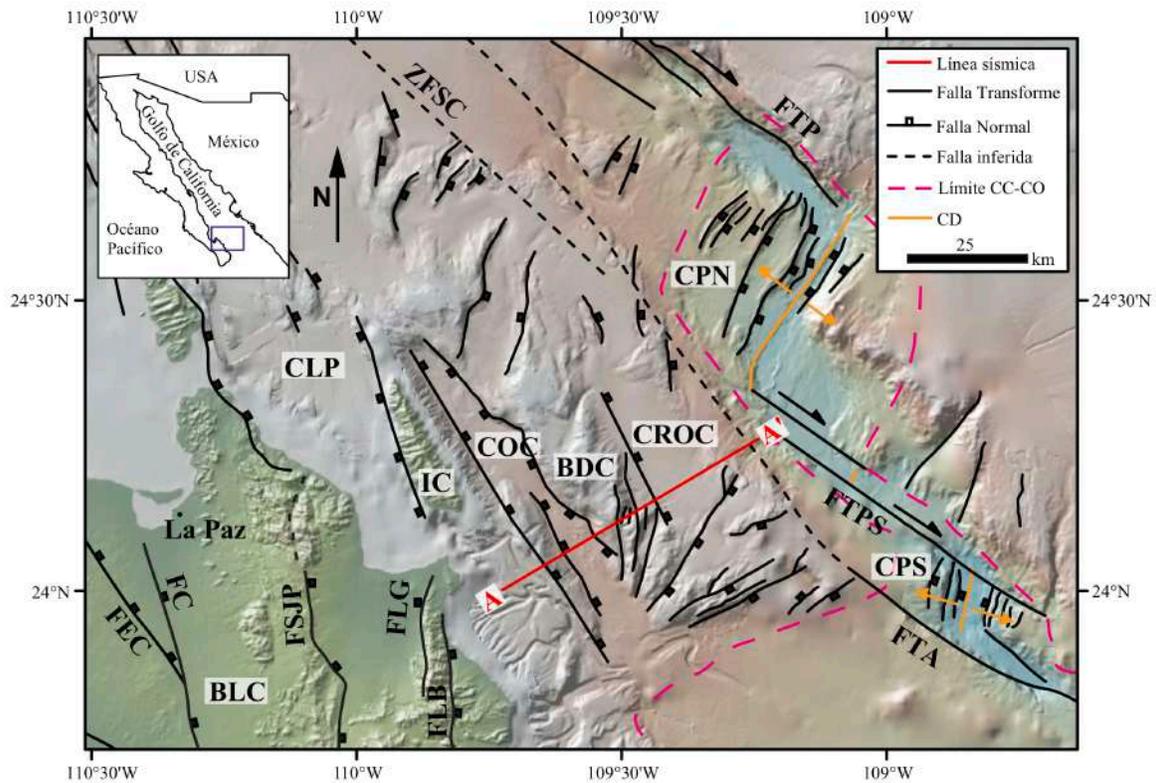


Figura 6. Mapa estructural de la porción sur del Golfo de California (Modificado de Fletcher *et al.*, 2007; Duque-Trujillo *et al.*, 2015). El modelo de elevación digital fue creado usando GeoMapApp (<http://www.GeoMapApp.org>). El Sistema Extensional de Cerralvo (sección sísmica AA') se encuentra delimitado por la cuenca Pescadero hacia el este, por el Bloque Los Cabos hacia el oeste, la Isla Cerralvo y cuenca La Paz hacia el norte, y la cuenca Alarcón hacia el sur. BLC–Bloque los Cabos; CLP–cuenca La Paz; FEC–falla El Carrizal; FC–falla Centenario; FSJP–falla San Juan de los Planes; FLG–falla La Gata; FLB–falla Los Barriles; IC–isla Cerralvo; COC–Cuenca Occidental de Cerralvo; BDC–Banco de Cerralvo; CROC–Cuenca Oriental de Cerralvo; CPN–cuenca Pescadero Norte; CPS–cuenca Pescadero Sur; ZFSC–zona de falla Santa Cruz; FTP–falla transforme Pescadero; FTAS–falla transforme Pescadero Sur; FTA–falla transforme Alarcón; CC–corteza continental; CO–corteza oceánica; CD–centro de dispersión.

Las estructuras en el BLC se componen de una serie de fallas normales regionales que buzan predominantemente hacia el este, delimitando cuencas continentales rellenas por sedimentos Terciarios (Martínez-Gutiérrez y Sethi, 1997; Fletcher *et al.*, 2000; Schwennicke *et al.*, 2017). Algunos autores sugieren que el sistema de fallas Los Barriles (Figura 6) no es la continuación de la falla San José del Cabo, sino que es un sistema independiente (Bot *et al.*, 2016; Schwennicke *et al.*, 2017). La activación del sistema de fallas Los Barriles comenzó a finales del Mioceno-medio e inicios del Mioceno tardío (Fletcher *et al.*, 2000). Sin embargo, otros autores proponen una edad más antigua (*ca.* 18 Ma), durante el Mioceno temprano (Bot *et al.*, 2016). Este evento coincide con el fallamiento extensional en la cuenca San José del Cabo, donde se generaron fallas actualmente sepultadas hacia su parte central (Busch *et al.*, 2011; Arreguín-Rodríguez y Schwennicke, 2013; Schwennicke *et al.*, 2017). El modelo estructural propuesto por Geoffroy y Pronost (2010); Bot *et al.* (2016) sugiere que la Falla Los Barriles se propaga a profundidad formando una superficie de despegue a profundidad que corre a lo largo de la corteza continental hacia la plataforma del GC, y sobre la cual el bloque de techo ha rotado en sentido anti-horario, poniendo en contacto lateral rocas del basamento con sedimentos marinos y continentales (Bot *et al.*, 2016).

## Capítulo 3

---

### Métodos

#### 3.1. Procesamiento de datos sísmicos

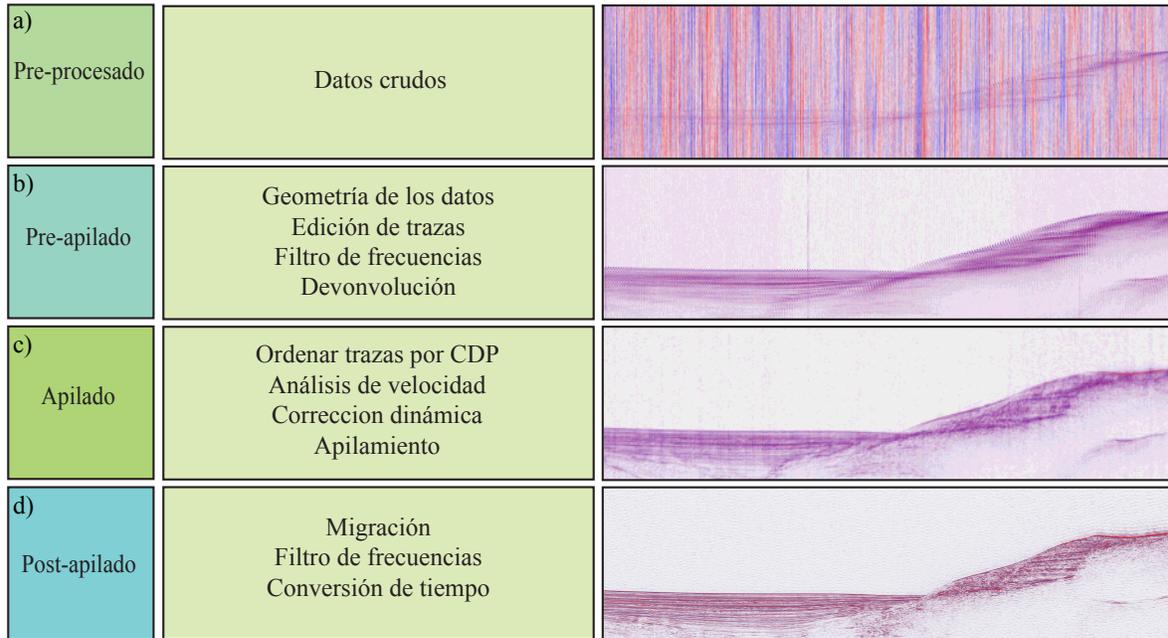
El procesado de datos sísmicos consiste en la selección y aplicación de una serie de parámetros y algoritmos a datos adquiridos en el campo (ver [Tabla I](#)). Los datos fueron colectados abordo del B.O. Francisco de Ulloa, propiedad del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), en colaboración con Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de California en San Diego, Estados Unidos, en septiembre de 2006.

**Tabla I. Parámetros de adquisición de los datos sísmicos en el Sistema Extensional de Cerralvo, sur del Golfo de California, México.**

Parámetros	Valores
Fuente de energía	Cañón de aire Sercel GI
Volúmen/presión	0.00245 m <sup>3</sup> / 13.8 MPa
Longitud del streamer	600 m
Distancia entre fuentes	37.5 m
Distancia entre receptores	12.5 m
Offset inicial	100 m
Número de canales	48
Tiempo de grabación	6000 ms
Intervalo de muestreo	1 ms
Muestras por traza	6000

El proceso se realizó en tres (3) etapas ([Figura 7](#)): pre-apilamiento, apilamiento y post-apilamiento ([Sheriff y Geldart, 1995](#); [Yilmaz, 2001](#)). En el pre-procesado se tiene la primera figura con los datos crudos ([Figura 7a](#)). En la primera ([Figura 7b](#)) etapa se ajustó la geometría de los datos a un sistema de referencia de coordenadas geográficas y se eliminaron trazas con un nivel de ruido alto. Se realizó un filtrado pasa banda para conservar las

frecuencias donde domina la señal de interés, así como un filtrado inverso (deconvolución; Peña-Domínguez, 2018). Este último paso permite recuperar altas frecuencias, atenuar reflexiones múltiples y equalizar las amplitudes de la señal (Yilmaz, 2001).



**Figura 7. Etapas del procesamiento de datos sísmicos: pre-procesado, pre-apilado, apilado y post-apilado.**

Durante la etapa de apilamiento (Figura 7c), se agruparon las trazas que pertenecen a un punto medio común (CDP) de reflexión en el subsuelo. El análisis de velocidad por semblanza se realizó mediante el proceso de corrección conocido como Normal-MoveOut (NMO; Sheriff y Geldart, 1995; Yilmaz, 2001). Aquí se aplica la velocidad media cuadrática (RMS) y se corrige el efecto de la distancia fuente-receptor. Las trazas de registros sísmicos diferentes con un punto medio común (CMP) son sumadas para formar trazas apiladas, lo que mejora la relación señal-ruido.

En la etapa de post-apilamiento (Figura 7d), el proceso de migración consiste en la extrapolación de la señal en el dominio de la frecuencia por medio de un operador de cambio de fase; esto corrige las trayectorias de rayos sísmicos, desplazando la señal hacia su posición correcta. Este proceso provoca el colapso de difracciones y mejora la calidad de la imagen de estructuras geológicas como fallas (Yilmaz, 2001). Por último (Figura 7d), se aplicó un

segundo filtrado de frecuencias para atenuar efectos espurios que se hayan generado durante cada etapa del procesado y se realizó una conversión de los datos de tiempo de viaje doble (TWTT) a profundidad en kilómetros a partir del análisis de velocidad (Yilmaz, 2001).

### 3.2. Análisis estructural

Para entender la cinemática de la deformación a lo largo del SEC es necesario introducir, primero, algunas relaciones geométricas simples basadas en el principio general de la mecánica de medios continuos de conservación de masa. Necesariamente, estas sólo capturan una realidad idealizada y simplificada de la evolución de cuencas extensionales en condiciones de deformación por cizalla pura con litología homogénea e isotrópica. Sin embargo, dichas relaciones han sido empleadas exitosamente en ambientes compresionales (*e.g.*, Yarbuh y Contreras 2017; Yarbuh *et al.*, 2018, y referencias ahí citadas). En particular, nos interesan parámetros estructurales que permiten cuantificar la deformación finita en términos de la magnitud de extensión,  $e$ , el estiramiento,  $s$ , y la distorsión,  $\varepsilon$  (Groshong, 1994; Fossen, 2010). Estas variables están relacionadas entre sí mediante la siguiente relación:

$$L_0 = L_1 - e, \quad (1)$$

donde  $L_0$  es la longitud inicial de la estructura,  $e$  es la magnitud de extensión lineal y  $L_1$  es la longitud final.  $L_1$  es conocido y corresponde con la longitud horizontal total del perfil de reflexión sísmica del SEC. La extensión,  $e$ , puede ser calculada a partir de la sumatoria de la componente horizontal de desplazamiento a lo largo de cada falla,  $e_i$ , contenida en la sección sísmica AA' (Figura 8)

$$e = \sum_{n=1}^i e_i. \quad (2)$$

El estiramiento estructural,  $s$ , por otra parte, es un parámetro relacionado con el adelgazamiento de la corteza, también conocido como factor  $\beta$  (Allen y Allen, 2005; Fossen, 2010) y se estima a partir de la relación

$$s = \frac{L_1}{L_0}. \quad (3)$$

El cambio en la longitud y la forma (deformación no-rígida) puede ser expresado en términos de la distorsión lineal,  $\varepsilon$  (en porcentaje), la cual se define como la razón de la deformación total respecto a las dimensiones iniciales del sistema extensional

$$\varepsilon = \left( \frac{e}{L_1 - e} \right) \times 100. \quad (4)$$

Asumiendo condiciones de deformación y sedimentación en estado estacionario, es decir, que las velocidades de extensión y la sedimentación sin-tectónica no varían con el tiempo, se puede estimar la tasa de subsidencia tectónica,  $v_e$ , y la tasa de sedimentación,  $d_s$ , por medio de las siguientes expresiones:

$$v_e = \frac{\delta_e}{t_u}, \quad (5)$$

$$d_s = \frac{\Delta_w}{t_u}, \quad (6)$$

donde  $\delta_e$  es la componente vertical de la depresión estructural,  $\Delta_w$ , es el espesor de los sedimentos sin-tectónicos (Figura 8) y  $t_u$  es el tiempo que marca el comienzo de la deformación

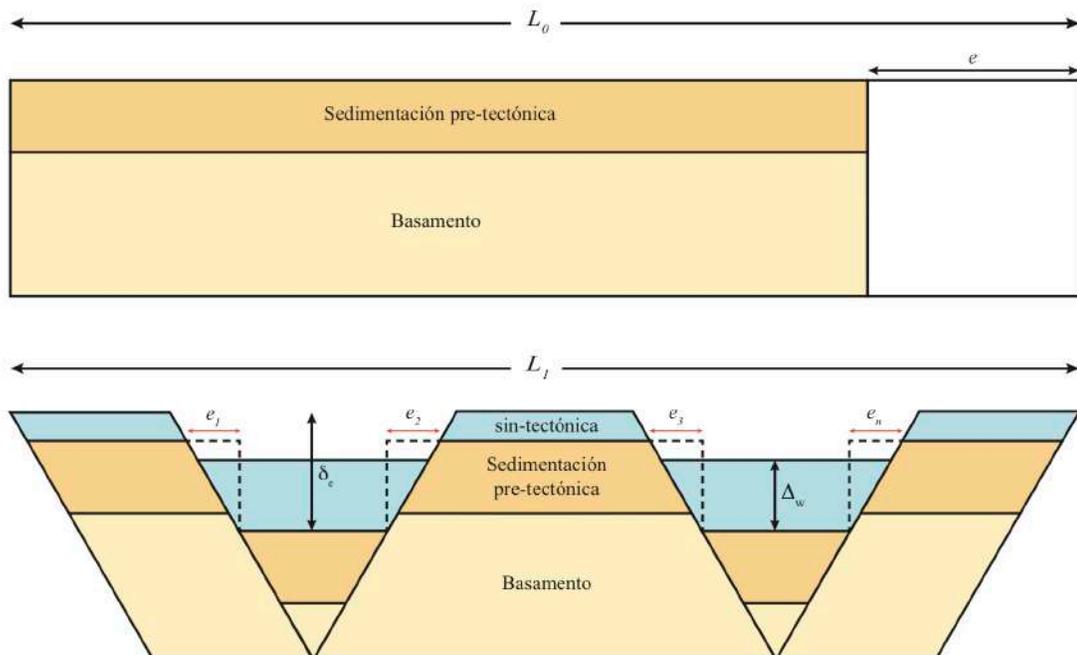


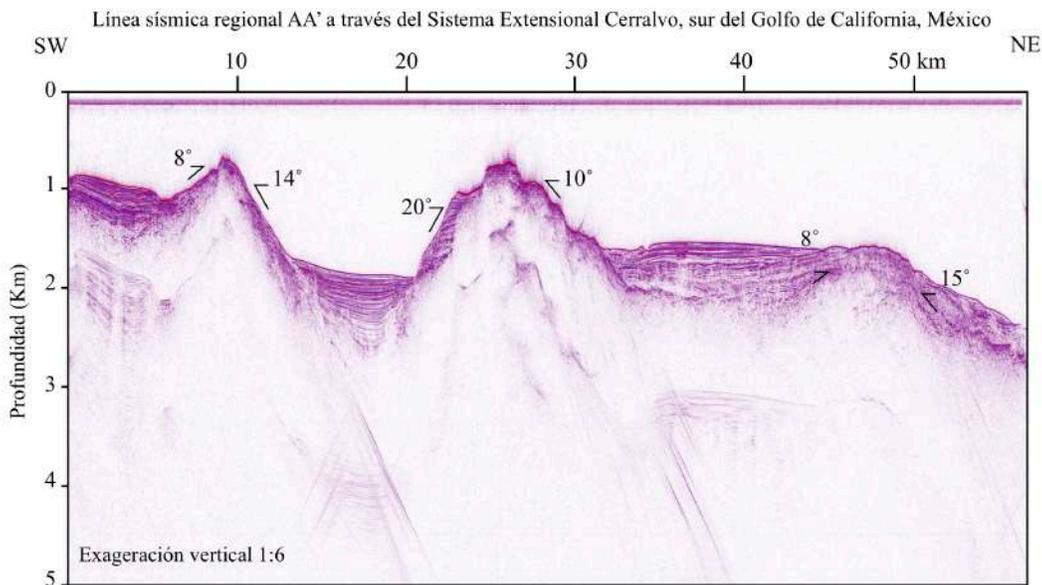
Figura 8. Diagrama que muestra los principales parámetros estructurales de un sistema extensional.  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$ ,  $e_n$ , son la componente horizontal de cada falla;  $e$  es la magnitud de extensión lineal;  $L_0$  es la longitud inicial de la estructura;  $L_1$  es la longitud final;  $\delta_e$  es la depresión estructural;  $\Delta_w$  es el espesor de los sedimentos sin-tectónicos. Modificado de Groshong (1994) y Fossen (2010).

## Capítulo 4

### Resultados

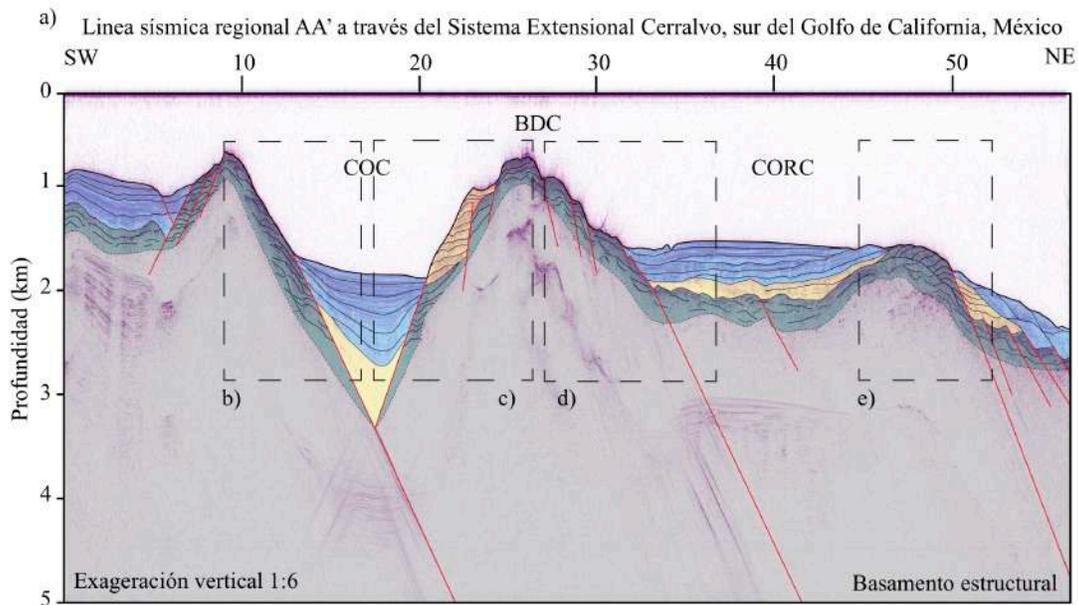
#### 4.1. Interpretación sísmica

La interpretación sísmo-estratigráfica se basa en el carácter sísmico, la continuidad lateral y la geometría interna de los sísmo-reflectores (Figura 9). Con base en estos atributos es posible identificar las diferentes facies de una imagen sísmica (Chopra y Martfurt, 2007).



**Figura 9.** Sección sísmica AA' del Sistema Extensional de Cerralvo, en la porción occidental de la cuenca Pescadero. El fondo marino varía entre 800 y 1900 m de profundidad. Observe los bajos ángulos de buzamiento de las pendientes de los taludes que delimitan las cuencas submarinas.

La sección sísmica AA' (Figura 10) puede resolver dos sísmofacies principales: un basamento acústico con una penetración de hasta 500 m de espesor, y diferentes paquetes sedimentarios de 800 m de espesor. El primero se caracteriza por una zona de deformación por cizalla simple en la transición entre el basamento y las capas sedimentarias superiores afectadas por deformación frágil. El segundo por una alternancia de materiales con contrastante intensidad de reflexión sísmica.



**Figura 10. Interpretación del perfil de reflexión sísmica AA' del Sistema Extensional de Cerralvo. El área de color verde representa el basamento acústico delimitado por zonas de cizalla simple; las áreas de color amarillo y azul representan la sedimentación sin-tectónica. El área de color azul representa la sedimentación tardía; las líneas de color rojo corresponden con fallamiento normal.**

En la Cuenca Occidental de Cerralvo (COC; [Figura 10a](#)), los sedimentos Terciarios parecen gradar de materiales gruesos en la base de la secuencia sedimentaria hacia capas delgadas de materiales finos en la cima. Estos podrían corresponder con la alternancia de materiales carbonatados, dada su buena continuidad lateral, baja intensidad de reflexión sísmica y poca coherencia (*e.g.*, [Chopra y Martfurt, 2007](#)). Típicamente estos sedimentos se observan en ambientes pelágicos (*e.g.*, [Rebesco \*et al.\*, 2014](#); [Figura 10b y c](#)). En el flanco occidental del COC, las pendientes abruptas promueven el desarrollo de flujos turbidíticos a escala local ([Figura 10b](#)). En el flanco oriental de la COC, la sucesión sismo-estratigráfica está compuesta por una alternancia de materiales finos, con alta reflectancia, buena coherencia y continuidad lateral, y materiales gruesos con reflexiones más atenuadas y con poca coherencia ([Figura 4c](#); [Kluesner \*et al.\*, 2014](#)). Hacia la cima de la sucesión, los sedimentos parecen formarse por flujos de masa superficial provenientes de la cresta del Banco de Cerralvo (BDC). Este cambio en la estratigrafía podría indicar el límite entre dos sucesiones estratigráficas sin-tectónicas.

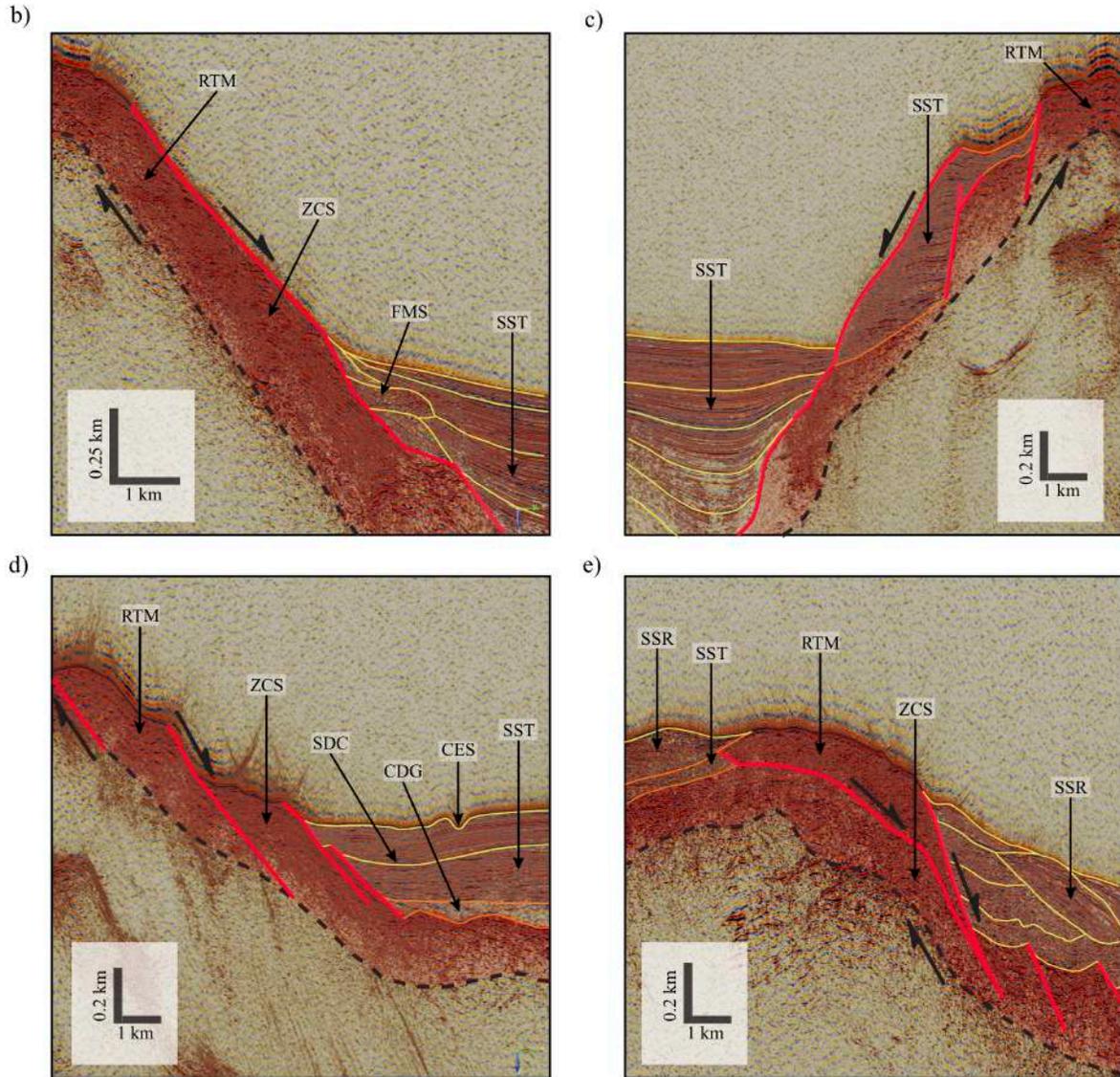
En el BDC (Figura 10a), se piensa que la corteza superior está representada por una serie de reflectores semicontinuos con aspecto fibroso (*ropey-layer*; e.g., Sutherland *et al.*, 2012), posiblemente de origen dúctil, con presencia de texturas foliadas, imbricadas y plegadas, lo que sugiere un basamento de origen metamórfico.

En la Cuenca Oriental de Cerralvo (CORC), el carácter sísmico de las rocas sugiere el límite entre el basamento acústico y la base de los estratos sin-tectónicos, corresponde con sedimentos con alto contenido de materia orgánica y con posibles concentraciones de fluidos. Este tipo de reflexiones sísmicas tenues se conocen como *dim spots* (Chopra y Martfurt, 2007). Esto es corroborado por geometrías alargadas con poca reflectancia y poca coherencia (Figura 10d). Hacia la cima de la sucesión, el desarrollo de una superficie de contorno generada por corrientes de fondo (Rebesco *et al.*, 2014), marca un cambio en la sedimentación hacia materiales depositados en capas delgadas de sedimentos finos, con posible alternancia de materiales carbonatados. En la superficie del fondo marino se puede apreciar además canales de erosión superficial hacia la parte occidental, mientras que acumulaciones sedimentarias de tipo “montículos” se observan hacia la parte oriental (Figura 4e; Rebesco *et al.*, 2014). Hacia la porción más oriental de la sección sísmica, los sedimentos modernos forman depósitos turbidíticos que migran hacia el este en dirección de las zonas abisales.

#### 4.2. Geometría y estructura

El SEC en el perfil de reflexión sísmica AA' abarca una serie de cuencas y altos estructurales delimitados por un arreglo de fallas normales con buzamientos  $< 25^\circ$  (Figura 9), que corren a lo largo del talud continental del BLC al oeste y se extiende hacia la COC, en contacto por falla con el BDC y la CORC (Figura 9; Sutherland *et al.*, 2012; Duque-Trujillo *et al.*, 2015). La geometría de las estructuras en el SEC presenta un arreglo de fallas regionales activas sub-paralelas con orientación N-NE, asociadas con fallas antitéticas más jóvenes con buzamiento hacia el oeste, formando cuencas que ponen en contacto lateral la superficie basal secuencias sin-tectónicas (Figura 10). Hacia el extremo oriental de la sección sísmica, el sistema de fallas normales paralelas da paso al desarrollo de la cuenca Pescadero Norte hacia las zonas abisales, donde la frontera de placas Pacífico-Norteamérica está

representada por la zona de fallas transformes Alarcón y Pescadero (Figura 5 y 6; Sutherland *et al.*, 2012; Duque-Trujillo *et al.*, 2015).



**Figura 10.** (b), (c), (d) y (e) corresponden a secciones ampliadas extraídas de la línea sísmica AA'. RTM–rocas con texturas metamórficas; ZCS–zona de cizalla simple; FMS–flujo de masa superficial; SST–sedimentación sin-tectónica; SDC–superficie de contorno; CES–canal de erosión superficial; CDG–concentraciones de gas; las líneas de color rojo corresponden con las fallas observadas; las líneas punteadas de color negro representan la superficie basal de la zona de cizalla simple.

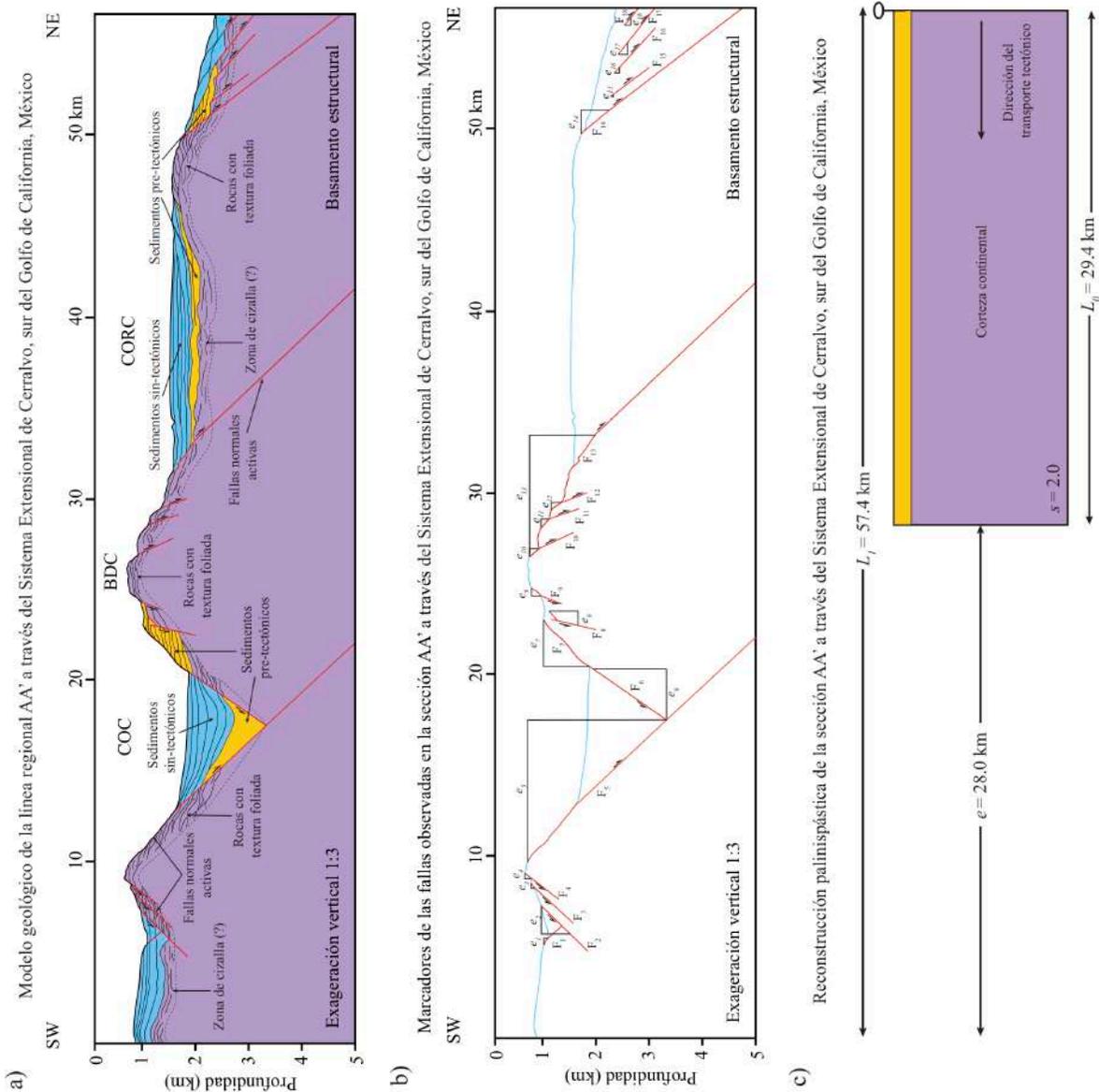
Se interpretaron un total de 18 fallas normales con ángulos de buzamiento entre 10 y 25°. La pendiente promedio de las fallas es de 18.2°, y la componente de extensión horizontal,  $e_i$ , varía entre 0.2 y 8.2 km (Figura 11; Tabla II). La magnitud de extensión total,  $e$ , es de 28.0 km, mientras que la longitud final de la sección sísmica,  $L_I$ , es de 57.4 km. La longitud inicial,  $L_0$ , es de 29.4 km (ver Ec. 1 y 2). Así, el factor de estiramiento estructural (Ec. 3),  $s$ , es de 2.0, mientras que la deformación del SEC expresada en términos de la distorsión lineal (Eq. 4) es de 95%.

**Tabla II. Desplazamiento horizontal y ángulo de buzamiento de las fallas asociadas al Sistema Extensional de Cerralvo, sur del Golfo de California, México.**

Falla	Extensión $e_i$ (km)	Buzamiento $\alpha$ (grados)
F <sub>1</sub>	0.5	10.3
F <sub>2</sub>	1.9	13.8
F <sub>3</sub>	0.3	13.2
F <sub>4</sub>	0.3	21.4
F <sub>5</sub>	8.2	15.3
F <sub>6</sub>	2.6	21.4
F <sub>7</sub>	1.9	24.1
F <sub>8</sub>	1.0	29.2
F <sub>9</sub>	0.6	19.4
F <sub>10</sub>	0.6	17.9
F <sub>11</sub>	0.6	15.5
F <sub>12</sub>	0.4	24.7
F <sub>13</sub>	6.8	10.3
F <sub>14</sub>	0.7	32.1
F <sub>15</sub>	0.2	15.7
F <sub>16</sub>	0.2	18.2
F <sub>17</sub>	0.7	10.6
F <sub>18</sub>	0.4	14.4
$L_0 = 29.4$ km	$e = 28.0$ km	$\alpha$ prom = 18.2°
$L_I = 57.4$ km	$\varepsilon = 95$ %	$s = 2.0$

Para cuantificar la tasa de subsidencia tectónica,  $v_e$ , y la tasa de sedimentación,  $d_s$  (Ec. 7 y 8), el valor del comienzo de la deformación,  $t_u$ , fue ajustado con base a diferentes

modelos de apertura del GC (e.g., Stock y Hodges, 1989; Fletcher y Munguía, 2000; Aragón-Arreola y Martín-Barajas, 2007; Fletcher *et al.*, 2007; Lizarralde *et al.*, 2007; Ferrari *et al.*, 2013; Duque-Trujillo *et al.*, 2015; Brune *et al.*, 2016; Balestrieri *et al.*, 2017).



**Figura 11. (a) Modelo geológico del Sistema Extensional de Cerralvo obtenido del procesamiento, análisis e interpretación de la sección de reflexión sísmica AA'. (b) Marcadores de las fallas observadas en el Sistema Extensional de Cerralvo. Las estructuras analizadas se muestran con las etiquetas  $F_1$  a  $F_{18}$  (ver [Tabla II](#)). La extensión horizontal de cada falla se muestra con las etiquetas  $e_1$  a  $e_{18}$ . (c) Sección estructural reconstruida del Sistema Extensional de Cerralvo.**

La datación radiométrica y por huellas de fisión en apatito de las muestras de rocas monzograníticas en el BDC indican que la deformación extensional en esta parte del Golfo comenzó hace *ca.* 8.1 Ma (Balestrieri *et al.*, 2017). Utilizando este valor como  $t_u$ , se estimó que la depresión estructural,  $\delta_e$ , promedio para el SEC es de 2.5 km, lo que se traduce en una tasa de subsidencia tectónica,  $v_e$ , de 0.3 mm/año. Adicionalmente el espesor promedio,  $\Delta_w$ , de los sedimentos sin-tectónicos en la fosa de Cerralvo y la cuenca oriental de Cerralvo es de 0.8 km, lo que resulta en tasas de sedimentación,  $d_s$ , de 0.1 mm/año.

## Capítulo 5

---

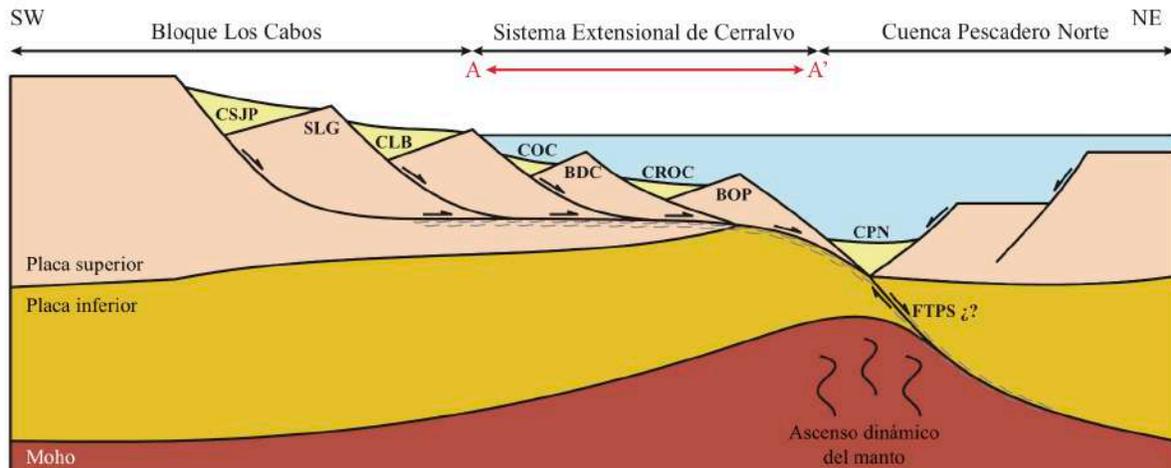
### Discusión

#### 6.1. Deformación de la corteza

A partir del análisis de los resultados presentados en este trabajo, se propone que el modelo geológico que mejor describe la formación y evolución del SEC (Figuras 11 y 12), es el modelo de cizalla simple, el cual está caracterizado por un sistema maestro de fallamiento de bajo ángulo con rotación de bloques hacia el oeste a través de una zona de despegue basal formando cuencas asimétricas controladas por fallas antitéticas (Wernicke, 1981, 1985). En este modelo, el basamento estructural (placa inferior) del SEC es considerado como una extensión del complejo metamórfico La Gata-BLC y del complejo metamórfico en Isla Cerralvo (Figuras 5 y 6; Montrella, 2004). Estas rocas consisten de intrusiones ígneas Cretácicas y de rocas metasedimentarias pre-Cretácicas (Garrow, 2002). En el modelo, el basamento está delimitado por zonas de deformación por cizalla simple con transporte tectónico hacia el este (Figura 12). Brady *et al.* (2000) discuten diferentes modelos genéticos que pueden producir este tipo de sistema de fallas y uno de ellos es el modelo *rolling hinge*, el cual fue propuesto por primera vez por Wernicke y Axen (1988). En la Figura 12 la forma antilítrica de la falla maestra de despegue es consistente con la geometría esperada en el modelo *rolling hinge*, y en este caso está mostrado esquemáticamente. Sin embargo, no descartamos la posibilidad de que el sistema de fallas en el SEC se haya formado siguiendo el modelo de rotación de bloques para formar estructuras tipo dominó (Brady *et al.*, 2000) debido a la alta cantidad de extensión acumulada en esta margen del GC.

La interpretación sísmica sugiere que la sedimentación en el SEC ocurrió en dos eventos: un primer evento de sedimentación temprana que subyace a un segundo pulso más joven de sedimentación sin-tectónica, el cual se caracteriza por la rotación y divergencia hacia los flancos (Figura 11; Sutherland *et al.*, 2012). A pesar de que la sedimentación presenta una geometría sub-horizontal, se infiere que este último pulso de sedimentación

ocurrió de manera sincrónica con la propagación de la falla antitética (e.g., escarpe oriental de la COC), después de la rotación de los bloques de techo hacia el oeste.



**Figura 12.** Modelo idealizado de la extensión de la corteza y formación de sistemas de *rift* en la porción sur del Golfo de California (Wernicke, 1981, 1985; Fossen, 2010). FEC–falla El Carrizal; CLP–cuenca La Paz; CSJP–cuenca San Juan de Los Planes; SLG–Sierra La Gata; CLB–cuenca Los Barriles; COC–Cuenca Occidental de Cerralvo; BDC–Banco de Cerralvo; CROC–Cuenca Oriental de Cerralvo; BOP–banco occidental de Pescadero; CPN–cuenca Pescadero Norte; FTPS–falla transforme Pescadero Sur; la línea de color rojo AA’ corresponde con la sección sísmica del Sistema Extensivo de Cerralvo; el área de color azul corresponde con las aguas del Golfo de California; el área de color amarillo claro corresponde con sedimentación Terciaria; el área de color rosa y amarillo oscuro corresponde con la placa superior e inferior, respectivamente; el área de color rojo corresponde con el manto litosférico.

Los resultados sugieren que las rocas del basamento han sufrido un segundo estadio de deformación post-Cretácico, asociado a mecanismos de deformación por cizalla dúctil, con desarrollo de texturas foliadas-plegadas bien definidas (Figura 10), y posiblemente asociadas con magmatismo sin-tectónico (Ferrari *et al.*, 2013). Observaciones similares se han documentado en la zona norte del GC (cuencas Tiburón y Delfín Superior), donde el modo de extensión cortical puede estar asociado a la formación de complejos de núcleo metamórficos a lo largo de un despegue basal, formando zonas de milonitización (González-Fernández *et al.*, 2005).

Duque-Trujillo *et al.* (2015); Balestrieri *et al.* (2017) muestran que en el SEC la corteza superior contiene plutones masivos de rocas monzograníticas que han sido fechadas en ca. 15 Ma por el método U/Pb en zircón. Estos autores interpretan estas rocas como

intrusivos sin-tectónicos. A pesar de esta interpretación, los perfiles sísmicos no permiten discernir estos intrusivos de otros plutones Cretácicos que forman parte del basamento cristalino pre-tectónico. Sin embargo, hay evidencias empíricas que indican que estos dos procesos de cizalla simple y magmatismo sin-tectónico no son necesariamente excluyentes. Resulta que estudios realizados en otros sistemas extensionales continentales similares, como la región del Egeo, Turquía Occidental (e.g., Erkül y Erkül, 2012) muestran el desarrollo de deformación por cizalla simple asociada con la formación de complejos de núcleo metamórfico y plutonismo sin-tectónico. En esta región, los granitoides se derivaron de un magma híbrido que se originó a partir de la mezcla de un magma félsico en la corteza inferior y magmas máficos originados en el manto litosférico durante los procesos de extensión. Otro estudio realizado en las montañas Buckskin y Rawhide en Arizona, USA (Singleton y Mosher, 2012), muestran la formación de un emplazamiento intrusivo producido por la milonitización de la placa inferior en una zona de despegue regional, en donde se han desarrollado complejos de núcleo metamórfico.

## 6.2. Magnitud y Modo de extensión

El modelo geológico es consistente con la cartografía de campo de fallas de bajo ángulo asociados con la deformación penetrativa a lo largo del sistema de fallas San José del Cabo-San Juan de Los Planes-Los Barriles al oeste y suroeste del SEC (Figuras 5 y 6; Bot *et al.*, 2016). Estos autores proponen que el BLC representa el bloque de piso exhumado de una falla de despegue regional marcada por una zona de cizalla quebradizo-dúctil con desplazamiento finito hacia la plataforma y el talud continental del sur del GC (Figura 12).

Aunque se piensa que el escarpe de falla sintético que controla la margen occidental de la depresión de Cerralvo es una estructura inactiva (Sutherland *et al.*, 2012; Lonsdale y Kluesner, 2010; Kluesner, 2011), el contexto estructural y la sismicidad en la región sugieren que el SEC es un sistema tectónicamente activo (Figura 13; Molnar *et al.*, 1973; Fletcher y Munguía, 2000; Munguía *et al.*, 2006; Duque-Trujillo *et al.*, 2015; Castro *et al.*, 2017). El análisis de mecanismos focales en la Figura 13 (ver Tabla III) muestra una predominancia de fallas de desplazamiento lateral derecho hacia el extremo oriental del SEC, cerca del eje del golfo y en las cercanías con los sistemas de fallas maestras que controlan la cuenca Pescadero.

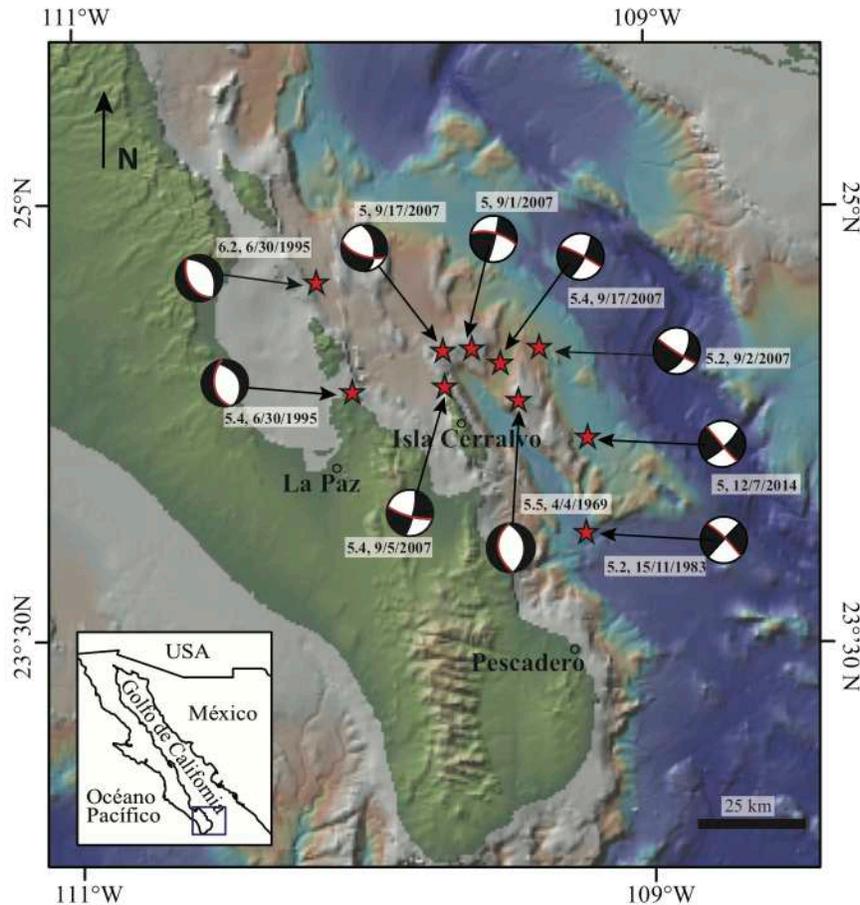
Por el contrario, los mecanismos focales con desplazamiento normal son más prominentes hacia el occidente del SEC, con excepción del sismo de magnitud 5.4 del 5 de septiembre de 2007. Sin embargo, la orientación de los planos nodales para este mismo evento no es compatibles con ningún rasgo topobatiométrico, lo cual podría sugerir que se trata de un evento producido por cizalla antitética (*i.e.*, lateral izquierda) al régimen esperado de deformación regional.

**Tabla III. Parámetros de mecanismos focales para sismos localizados en la región de Cerralvo-La Paz, sur del Golfo de California, México.**

Fecha	Mw	longitud	latitud	Rumbo (Grad)	Buzamiento (Grad)	Rumbo (Grad)	Buzamiento (Grad)
4/4/69	5.6	NA	NA	NA	NA	NA	NA
11/15/93	5.2	109.16°W	23.8°N	313	82	223	89
6/30/95	6.2	110.228°W	24.688°N	350	70	170	20
9/1/07	5	109.915°W	24.502°N	283	69	14	86
9/2/07	5.2	109.824°W	24.615°N	122	85	29	58
9/5/07	5.4	109.951°W	24.352°N	13	78	105	78
9/17/07	5	109.953°W	24.453°N	109	61	354	54
9/17/07	5.4	109.850°W	24.489°N	296	85	27	77
12/7/14	5	109.31°W	24.05°N	47	77	138	87

La deformación del SEC expresada en términos de la distorsión lineal (Eq. 4) es de 95%, compatible lo las mediciones en otros sistemas extensionales asociados a fallas de bajo ángulo (Axen, 1992; Axen *et al.*, 2000). Nuestras estimaciones para el SEC sugieren una extensión horizontal de 28.0 km con un factor  $\beta$  de 2.0 en la dirección sub-paralela al eje de máxima extensión instantánea (*ca.* 265°) en el GC. Este es un valor bajo y típico de zonas con relativamente baja extensión (Allen y Allen, 2005), lo cual sugiere que debe existir una componente adicional de adelgazamiento cortical asociada con la componente de deformación lateral a lo largo del sistema. Sin embargo, esta componente de cizalla lateral no puede ser medida directamente en la sección de reflexión sísmica del SEC. Otra posibilidad es que el déficit en la deformación se deba a la presencia de fallas subsísmicas (*i.e.*, fallas menores a 50 m) las cuales, por su escala, no son visibles a lo largo de la sección sísmica. Es bien conocido que la distribución de fallas sigue una ley de potencias y que las fallas subsísmicas, dado su gran número, pueden acomodar tanta deformación como las fallas

de mayor tamaño (*e.g.*, Groshong, 1994; Fossen y Rørnes, 1996). En conclusión, creemos que el valor de el factor  $\beta$  está subestimado y que podría alcanzar hasta dos veces la magnitud calculada en este trabajo. Estimaciones similares han sido calculadas al sur del GC hacia la Elevación del Pacífico Oriental (Figura 5; Páramo *et al.*, 2008).



**Figura 13.** Localización de epicentros y mecanismos focales correspondientes a eventos sísmicos seleccionados durante 1969-2014 con magnitud  $> 5.0$  (ver Tabla III). Observe que los sismos ocurridos a lo largo de los escarpes de fallas que delimitan la región de Cerralvo sugieren un sistema estructural tectónicamente activo. La topografía y batimetría fue tomada de GeoMapApp (<http://www.GeoMapApp.org>). El mecanismo focal del año 1969 fue tomado de Molnar *et al.* (1973). Los mecanismos focales del año 1995 fueron tomados de Munguía *et al.* (2006). El mecanismo focal del año 1983 fue tomado del catalogo CMT ([www.globalcmt.org](http://www.globalcmt.org)). Los mecanismos focales de los años 2007, 2014 fueron tomados del catalogo USGS-ANNS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage>). La línea de color rojo en el mecanismo focal representa la solución del plano de falla verdadero.

La extensión estimada en esta región es de 35 km, en la cual la corteza continental, 28 km de espesor, se ha adelgazado hasta alcanzar 7 km de corteza oceánica, lo que resulta en un factor de estiramiento de 4 (Páramo *et al.*, 2008; Brothers *et al.*, 2012; Bot *et al.*, 2016).

El análisis de la interacción entre la deformación y la sedimentación sin-tectónica en el SEC sugiere que la magnitud del transporte tectónico es hasta tres veces mayor en magnitud respecto a la sedimentación marina en la región, lo que resulta en tasas de sedimentación relativamente bajas en comparación con las cuencas sedimentarias del norte del GC, donde los sedimentos alcanzan espesores de hasta 5 km (*e.g.*, cuenca Tiburón; Contreras-Pérez *et al.*, 2012). Por lo tanto, la tasa de sedimentación,  $d_s$ , en esas regiones debe alcanzar valores de hasta 0.6 mm/año.

## Capítulo 6

---

### Conclusiones

El SEC es un sistema de deformación extensional activo cuya evolución geológica y estructural es compatible con un *rift* asimétrico, de cizalla simple, el cual está caracterizado por un sistema maestro de fallamiento de bajo ángulo con transporte tectónico hacia el este.

El basamento estructural del SEC está conformado por rocas cristalinas hacia la base y rocas metasedimentarias Mesozoicas hacia la cima. Estas han sufrido un episodio de metamorfismo dinámico a partir del Cenozoico, evidenciado por sismo-reflectores semicontinuos, con presencia de texturas foliadas, imbricadas y plegadas. Aquí los procesos de metamorfismo son diferentes a los observados en regiones vecinas (*e.g.*, metamorfismo de contacto; complejo metamórfico La Gata-BLC y complejo metamórfico en Isla Cerralvo).

La magnitud de extensión horizontal medida en Cerralvo es de 28.0 km, la cual es una estimación mínima debido a la presencia de fallas subsísmicas (*i.e.*, fallas menores a 50 m de longitud), las cuales, por motivos de escala y resolución, no pueden ser medidas a través del perfil de reflexión sísmica analizado.

El factor de estiramiento ( $\beta = 2.0$ ) medido en la región de Cerralvo es un valor que debe ser tomado con reservas. El adelgazamiento de la corteza continental es bajo con respecto a la porción central del GC, hacia la cuenca Pescadero, donde la extensión de la corteza transicional ha evolucionado para formar centros de dispersión bien definidos, caracterizados por el arreglo de fallas de alto ángulo, subparalelas, delimitadas por fallas maestras de cizalla lateral derecha, las cuales han acumulado desplazamientos horizontales de gran magnitud.

## Referencias

- Allen, P.A., Allen, J.R., 2005. Basin Analysis: Principles And Applications. Second edition. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, 549 pp.
- Álvarez-Borrego, S., Lara-Lara, J. R. (1991). The physical environment and primary productivity of the Gulf of California. *in*: J.P. Dauphin and B. Simoneit (eds.), The Gulf of California and Peninsular Province of the Californias. *American Association of Petroleum Geologists*, 47, 555-567.
- Aragón-Arreola, M., Martín-Barajas, A., 2007, Westward migration of extension in the northern Gulf of California, Mexico: *Geology*, 35(6), 571-574.
- Aranda-Gómez, J.J., Pérez-Venzor, J.A., 1988, Estudio geológico de Punta Coyotes, Baja California Sur: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 7(1), 1-21.
- Arreguín-Rodríguez, G. de J., Schwennicke, T., 2013, Estratigrafía de la margen occidental de la cuenca San José del Cabo, Baja California Sur: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(2), 481-496.
- Atwater, T. (1970). Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geological Society of America Bulletin*, 81(12), 3513-3536.
- Axen, G.J., 1988, The geometry of planar domino-style normal faults above a dipping basal detachment: *Journal of Structural Geology*, 10(4), 405-411.
- Axen, G. J., 1992. Pore pressure, stress increase, and fault weakening in low-angle normal faulting. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B6), 8979-8991.
- Axen, G. J., Grove, M., Stockli, D., Lovera, O. M., Rothstein, D. A., Fletcher, J. M., Farley, K., Abbott, P. L., 2000. Thermal evolution of Monte Blanco dome: Low-angle normal faulting during Gulf of California rifting and late Eocene denudation of the eastern Peninsular Ranges. *Tectonics*, 19(2), 197-212.
- Axen, G.J., Karner, G.D., 2004, Mechanics of low-angle normal faults, *in* Rheology and Deformation of the Lithosphere at Continental Margins: Columbia Univ. Press, New York, pp. 46–91.
- Balestrieri, M. L., Ferrari, L., Bonini, M., Duque-Trujillo, J., Cerca, M., Moratti, G., Corti, G., 2017. Onshore and offshore apatite fission-track dating from the southern Gulf of California: Insights into the time-space evolution of the rifting. *Tectonophysics*, 719, 148-161. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.05.012>

- Bennett, S.E.K., Oskin, M.E., Iriondo, A., 2013a. Transtensional rifting in the proto-Gulf of California, near Bahía Kino, Sonora, México. *Geol. Soc. of Am. Bull.* 125, 1752–1782. <http://dx.doi.org/10.1130/B30676.1>.
- Bennett, S. E., Oskin, M. E., Iriondo, A., Kunk, M. J., 2016. Slip history of the La Cruz fault: Development of a late Miocene transform in response to increased rift obliquity in the northern Gulf of California. *Tectonophysics*, 693, 409-435.
- Bohannon, R.G., Parsons, T., 1995, Tectonic implications of post–30 Ma Pacific and North American relative plate motions: *Geological Society of America Bulletin*, 107(8), 937-959.
- Bot, A., Geoffroy, L., Authemayou, C., Bellon, H., Graindorge, D., Pik, R., 2016, Miocene detachment faulting predating EPR propagation: Southern Baja California: *Tectonics*, 35(5), 1153-1176.
- Brady, R., Wernicke, B., Fryxell, J., 2000, Kinematic evolution of a large-offset continental normal fault system, South Virgin Mountains, Nevada: *Geological Society of America Bulletin*, 112(9), 1375-1397.
- Brothers, D., Harding, A., González-Fernández, A., Holbrook, W.S., Kent, G., Driscoll, N., Fletcher, J.M., Lizarralde, D., Umhoefer, P., Axen, G., 2012, Farallon slab detachment and deformation of the Magdalena Shelf, southern Baja California: *Geophysical Research Letters*, 39(9).
- Brune, S., Williams, S. E., Butterworth, N. P., Müller, R. D., 2016. Abrupt plate accelerations shape rifted continental margins. *Nature*, 536(7615), 201.
- Bryan, S.E., Orozco-Esquivel, T., Ferrari, L., López-Martínez, M., 2014. Pulling apart the Mid to Late Cenozoic magmatic record of the Gulf of California: is there a Comondú arc? In: Gómez-Tuena, A., Straub, S.M., Zellmer, G.F. (Eds.), *Orogenic Andesites and Crustal Growth*. 385. Geological Society of London, Special Publication:pp. 389–407. [http:// dx.doi.org/10.1144/SP385.8](http://dx.doi.org/10.1144/SP385.8)
- Busch, M.M., Coyan, J.A., Arrowsmith, J.R., Umhoefer, P.L., Martínez-Gutiérrez, G., 2011, Normal fault basin geometries from gravity analyses in the La Paz-Los Cabos region, Baja California Sur, Mexico: *Lithosphere*, 3,110-127.
- Carney, S. M., & Janecke, S. U. (2005). Excision and the original low dip of the Miocene-Pliocene Bannock detachment system, SE Idaho: Northern cousin of the Sevier Desert detachment?. *Geological Society of America Bulletin*, 117(3-4), 334-353.
- Castro, R., Mascarenhas, A. S., Durazo, R., & Collins, C. A. (2000). Seasonal variation of the temperature and salinity at the entrance to the Gulf of California, Mexico. *Ciencias Marinas*, 26(4), 561-583.

- Castro, R. R., Stock, J. M., Hauksson, E., Clayton, R. W., 2017. Active tectonics in the Gulf of California and seismicity ( $M > 3.0$ ) for the period 2002–2014. *Tectonophysics*, 719, 4-16.
- Chopra, S., Marfurt, K.J., 2007. Seismic attributes for prospect identification and reservoir characterization. Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers. Tulsa, Oklahoma, U.S.A. 457p.
- Coney, P.J., 1980, Cordilleran metamorphic core complexes: An overview, *Geological Society of America Memoir*, 153, 7-31.
- Contreras-Pérez, J., Ramírez-Zerpa, N., Negrete-Aranda, R., 2012, Modelos tectonoestratigráficos de las cuencas de Tiburón y Wagner en el norte del Golfo de California: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 29(1), 140-157.
- Contreras, J., Yarbuh, I., Lotero-Vélez, A., 2016. Derivation of the area balance relations of detachment folds from first principles. *Marine and Petroleum Geology*, 78, 247-253. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.09.015>
- Darin, M. H., Bennett, S. E. K., Dorsey, R. J., Oskin, M. E. Iriondo, A., 2016. Late Miocene extension in coastal Sonora, México: Implications for the evolution of dextral shear in the proto-Gulf of California oblique rift. *Tectonophysics*, 693, 378-408.
- Davis, G. H., Coney, P.J., 1979, Geologic development of the Cordilleran metamorphic core complexes: *Geology*, 7(3), 120–124.
- Dixon, T.H., Farina, F., DeMets, C., Suárez-Vidal, F., Fletcher, J.M., Marquez-Azua, B., Miller, M.M., Sanchez, O., Umhoefer, P.J., 2000. New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 Ma to present, II: Evidence for a “Baja California shear zone”. *Geophysical Research Letters*, 27(23), 3961-3964.
- Duque-Trujillo, J., Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., López-Martínez, M., Lonsdale, P., Bryan, S.E., Kluesner, J., Piñero-Lajas, D., Solari, L., 2015, Timing of rifting in the southern Gulf of California and its conjugate margins: insights from the plutonic record: *Geol. Soc. Am. Bull.* 127(5/6), 702–736.
- Erkül, S. T., Erkül, F., 2012. Magma interaction processes in syn-extensional granitoids: the Tertiary Menderes Metamorphic Core Complex, western Turkey. *Lithos*, 142, 16-33.
- Ferrari, L., López-Martínez, M., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., Duque-Trujillo, J., Lonsdale, P., Solari, L., 2013. Late Oligocene to middle Miocene rifting and syn-extensional magmatism in the southwestern Sierra Madre Occidental, Mexico: the beginning of the Gulf of California rift. *Geosphere* 9:1161–1200. <http://dx.doi.org/10.1130/GES00925.1>.

- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., Lopez-Martinez, M., Silva-Fragoso, A., 2018, Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift: *Earth-Science Reviews*, 183, 115-152.
- Fletcher, J.M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G.E., 2007, Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: Insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas: *Geological Society of America Bulletin*, 119(11-12), 1313-1336.
- Fletcher, J.M., Kohn, B.P., Foster, D.A., Gleadow, A.J.W., 2000, Heterogeneous Neogene cooling and exhumation of the Los Cabos block, southern Baja California: Evidence from fission-track thermochronology: *Geology*, 28, 107-110.
- Fletcher, J.M., Munguía, L., 2000, Active continental rifting in southern Baja California, Mexico: Implications for plate motion partitioning and the transition to seafloor spreading in the Gulf of California: *Tectonics*, 19(6), 1107-1123.
- Fletcher, J. M., Pérez-Venzor, J. A., González-Barba, G., Aranda-Gómez, J. J., 2003. Ridge-trench interactions and the ongoing capture of the Baja California microplate—New insights from the southern Gulf extensional province. In *Geologic Transects across Cordilleran México (resumen)*, en *Guidebook for Field Trips of the 99th Geological Society of America Cordilleran Section Annual Meeting* (pp. 13-31).
- Fletcher, J.M., Spelz, R.M., 2009, Patterns of Quaternary deformation and rupture propagation associated with an active low-angle normal fault, Laguna Salada, Mexico: Evidence of a rolling hinge?: *Geosphere*, 5(4), 385-407.
- Fossen, H., 2010, *Structural Geology*, in *Cambridge Univ. Press: Cambridge, U. K*, 463 pp.
- Fossen, H., Rørnes, A., 1996, Properties of fault populations in the Gullfaks Field, northern North Sea: *Journal of Structural Geology*, 18(2-3), 179-190.
- Frets, E. (2012). *Thermo-mechanical evolution of the subcontinental lithospheric mantle in an extensional environment Insights from the Beni Bousera peridotite massif (Rif belt, Morocco)* Petrography. Université Montpellier 2; Universidad de Granada, 2012. Tesis de doctorado.
- Gans, P.B., 1997. Large-magnitude Oligo-Miocene extension in southern Sonora, implications for the tectonic evolution of northwest Mexico. *Tectonics* 16:388–408. <http://dx.doi.org/10.1029/97TC00496>.
- Garrow, P.K., 2002, *Geology of the La Gata Metamorphic Complex, Los Cabos Block, Baja California Sur, Mexico*: San Diego State University, tesis doctoral, 109 pp.

- Gastil, R.G., 1993, Prebatholithic history of Peninsular California, *in* Gastil, R.G., and Miller, R.H., eds., *The Prebatholithic Stratigraphy of Peninsular California*, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 279,145-156.
- Gastil, R.G., Phillips, R.P., Allison, E. C., 1975, Reconnaissance geology of the state of Baja California: Geological Society of America Memoirs, 140, 1-201.
- Geoffroy, L.,J. Pronost, 2010, Late Pliocene to Early Quaternary extensional detachment in the La Paz–El Cabo area (Baja California Sur, Mexico): Implications on the opening of the Gulf of California and the mechanics of oblique rifting: *Terra Nova*, 22, 64–69.
- Godinez, N. S., Kimbrough, D. L., Kohel, C., 2010. Stratigraphy and petrologic evolution of the Oligocene–Miocene Comondú Group near Bahia Concepcion and Loreto, Baja California Sur, Mexico. In *Geological Society of America Abstracts with Programs* (Vol. 42, No. 4, p. 66).
- González-Fernández, A., Dañobeitia, J. J., Delgado-Argote, L. A., Michaud, F., Córdoba, D., & Bartolomé, R. (2005). Mode of extension and rifting history of upper Tiburón and upper Delfín basins, northern Gulf of California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B1).
- González-Fernández, A., Dañobeitia, J. J., Delgado-Argote, L.A., Michaud, F., Córdoba, D., Bartolomé, R., 2005, Mode of extension and rifting history of upper Tiburón and upper Delfín basins, northern Gulf of California: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B1), 1-17.
- Gonzalez-Garcia, J. J., Prawirodirdjo, L., Bock, Y., Agnew, D., 2003. Guadalupe Island, Mexico as a new constraint for Pacific plate motion. *Geophysical research letters*, 30(16).
- Goffredi, S. K., Johnson, S., Tunnicliffe, V., Caress, D., Clague, D., Escobar, E., Lundsten, L., Paudan, J. B., Rouse, G., Salcedo, D. L., Soto, L. A., Spelz-Madero, R., Zierenberg, R., Vrijenhoek, R. (2017). Hydrothermal vent fields discovered in the southern Gulf of California clarify role of habitat in augmenting regional diversity. *Proc. R. Soc. B*, 284(1859), 20170817
- Groshong Jr, R.H, 1994, Area balance, depth to detachment, and strain in extension: *Tectonics*, 13(6), 1488-1497.
- Gürbüz, A. (2010). Geometric characteristics of pull-apart basins. *Lithosphere*, 2(3), 199-206.

- Hausback, D.E., 1984, Cenozoic volcanic and tectonic evolution of Baja California Sur, Mexico, in *Geology of the Baja California Peninsula: Bakersfield, California*, Pacific Section, edited by V. A. Frizzell, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 219–236 pp.
- Henry, C.D., Aranda-Gomez, J.J., 2000, Plate interactions control middle-late Miocene, proto-Gulf and Basin and Range extension in the southern Basin and Range: *Tectonophysics*, 318(1-4), 1–26.
- Kluesner, J., 2011, *Marine Geophysical Study of Cyclic Sedimentation and Shallow Sill Intrusion in the Floor of the Central Gulf of California*: San Diego, California, University of California, tesis doctoral, 232 pp.
- Kluesner, J., Lonsdale, P., González-Fernández, A., 2014, Late Pleistocene cyclicity of sedimentation and spreading-center structure in the Central Gulf of California: *Marine Geology*, 347, 58-68.
- Langenheim, V.E., Jachens, R.C., Aiken, C., 2014, Geophysical framework of the Peninsular Ranges batholith: Implications for tectonic evolution and neotectonics, *in* Morton, D.M., and Miller, F.K., eds., *Peninsular Ranges Batholith, Baja California and Southern California*: Geological Society of America Memoir 211, 1–20.
- Lavier, L.L., Roger Buck, W., Poliakov, A.N., 1999, Self-consistent rolling-hinge model for the evolution of large-offset low-angle normal faults: *Geology*, 27(12), 1127-1130.
- Lavín, M. F., & Marinone, S. G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In *Nonlinear processes in geophysical fluid dynamics* (pp. 173-204). Springer, Dordrecht.
- Lizarralde, D., Axen, G.J., Brown, H.E., Fletcher, J.M., González-Fernández, A., Harding, A.J., Holbrook, W.S., Kent, G.M., Páramo, P., Sutherland, F., and Umhoefer, P.J., 2007, Variable styles of rifting in the Gulf of California: *Nature*, 448, 466–469. doi: 10.1038/nature06035.
- Lonsdale, P.F., 1989, Geology and tectonic history of the Gulf of California, *in* Winterer, E.L., Hussong, D.M., Decker, R.W., eds., *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*. Boulder, Colorado, Geological Society of America, *Decade of North American Geology*, 499–521 .
- Lonsdale, P.F., Kluesner, J., 2010, Routing of terrigenous clastics to oceanic basins in the Southern Gulf of California, inherited from features of the pre-spreading protogulf. San Francisco, California, American Geophysical Union, fall meeting supplement, abstract T33C-2265.

- Marinone, S. G. (2012). Seasonal surface connectivity in the Gulf of California: Estuarine, Coastal and Shelf Science, 100, 133-141.
- Martín-Barajas, A., 2000, Volcanismo y extensión en la Provincia Extensional del Golfo de California: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 53(1), 72-83.
- Martínez-Gutiérrez, G., Sethi, P. S., 1997, Miocene-Pleistocene sediments within the San José del Cabo Basin, Baja California Sur, México, *en* Johnson M.E., Ledesma-Vázquez, J. (eds.), Pliocene carbonates and related facies flanking the gulf of California, Baja California, Mexico: Boulder, United States of America, Geological Society of America Special Paper, 141-166.
- McDowell, F., Roldán-Quintana, J., Amaya-Martínez, R., 1997. Interrelationship of sedimentary and volcanic deposits associated with tertiary extension in Sonora, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.* 109:1349–1360. [http://dx.doi.org/10.1130/00167606\(1997\)109b1349:IOSA VDN2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1130/00167606(1997)109b1349:IOSA VDN2.3.CO;2).
- McKenzie, D., 1978, Some remarks on the development of sedimentary basins: *Earth and Planetary science letters*, 40(1), 25-32.
- Molnar, P., 1973. Fault plane solutions of earthquakes and direction of motion in the Gulf of California and on the Rivera Fracture Zone. *Geological Society of America Bulletin*, 84(5), 1651-1658.
- Montrella, J. J., 2004, Geology of Isla Cerralvo, Baja California Sur, Mexico: San Diego State University, Department of Geological Sciences, tesis doctoral, 113 pp.
- Munguía, L., González, M., Mayer, S., Aguirre, A., 2006, Seismicity and state of stress in the La Paz–Los Cabos region, Baja California Sur, Mexico: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(2), 624-636.
- Negrete-Aranda, R., Contreras, J., Spelz, R. M., 2013. Viscous dissipation, slab melting, and post-subduction volcanism in south-central Baja California, Mexico. *Geosphere*, 9(6), 1714-1728. <https://doi.org/10.1130/GES00901.1>
- Oskin, M., Stock, J., 2003, Pacific–North America plate motion and opening of the Upper Delfín basin, northern Gulf of California, Mexico: *Geological Society of America Bulletin*, 115(10), 1173-1190.
- Paduan, J. B., Zierenberg, R. A., Clague, D. A., Spelz, R. M., Caress, D. W., Troni, G., ... & Lupton, J. (2018). Discovery of hydrothermal vent fields on Alarcón Rise and in southern Pescadero Basin, Gulf of California. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 19(12), 4788-4819.

- Páramo, P., Holbrook, W.S., Brown, H.E., Lizarralde, D., Fletcher, J., Umhoefer, P., Kent, G., Harding, A., Gonzalez, A., Axen, G., 2008, Seismic structure of the southern Gulf of California from Los Cabos block to the East Pacific Rise: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B3).
- Peña-Domínguez, J.G., 2018, Estructura del ridge volcánico Tortuga en el Golfo de California a partir de sísmica de reflexión 2D: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, tesis de Maestría, 85 pp.
- Plattner, C., Malservisi, R., Dixon, T. H., LaFemina, P., Sella, G. F., Fletcher, J., Suarez-Vidal, F., 2007. New constraints on relative motion between the Pacific plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, 170(3), 1373-1380.
- Proffett Jr, J. M., 1977, Cenozoic geology of the Yerington district, Nevada, and implications for the nature and origin of Basin and Range faulting: *Geological Society of America Bulletin*, 88(2), 247-266.
- Rebesco, M., Hernández-Molina, F.J., Van Rooij, D., Wåhlin, A., 2014, Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: state-of-the-art and future considerations: *Marine Geology*, 352, 111-154.
- REY, P., VANDERHAEGHE, O. & TEYSSIER, C. 2001. Gravitational collapse of the continental crust: definition, regimes and modes. *Tectonophysics*, 342, 435–449.
- Roden, G. I. (1972). Thermohaline structure and baroclinic flow across the Gulf of California entrance and in the Revilla Gigedo Islands region. *Journal of Physical Oceanography*, 2(2), 177-183.
- Sarabia-Trejo, A. D. (2015). Islas prioritarias de conservación en el área natural protegida islas del Golfo de California, México: Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C., tesis de maestría, 82 pp.
- Sawlan, M. G., Smith, J. G., 1984. Petrologic characteristics, age and tectonic setting of Neogene volcanic rocks in northern Baja California Sur, Mexico. Frizzell, V.F. (Ed.), *Geology of the Baja California peninsula*, SEPM 39, 237-251.
- Schaaf, P., Boehnel, H., Perez-Venzor, J.A., 2000, Pre-Miocene palaeogeography of the Los Cabos Block, Baja California Sur; Geochronological and palaeomagnetic constraints: *Tectonophysics*, 318, 53-69.
- Schwennicke, T., Umhoefer, P.J., 2008, Evolución tectonoestratigráfica a lo largo del margen oriental de la cuenca de San José del Cabo, *en Primer Congreso sobre la Evolución Geológica y Ecológica del Noroeste de México*: Hermosillo, Sonora, México, resumen, 107.

- Schwennicke, T., Santisteban-Mendivil, D.M., Pérez-Venzor, J.A., Cortés-Martínez, M.Y., Plata-Hernández, E., 2017, Evolución estratigráfica de la cuenca Los Barriles, Baja California Sur, México: *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 34(3), 212-233.
- Seiler, C., Fletcher, J.M., Quigley, M.C., Gleadow, A.J., Kohn, B.P., 2010, Neogene structural evolution of the Sierra San Felipe, Baja California: Evidence for proto-gulf transtension in the Gulf Extensional Province?: *Tectonophysics*, 488(1-4), 87-109.
- Sheriff, R.E., Geldart, L.P., 1995. *Exploration Seismology Volume I: History, Theory and Data Acquisition*. Cambridge University Press, Cambridge, 559 pp.
- Silver, L.T., Chappell, B.W., 1988, The Peninsular Ranges Batholith: an insight into the evolution of the Cordilleran batholiths of southwestern North America: *Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh*, 79(2-3), 105-121.
- Singleton, J. S., Mosher, S., 2012. Mylonitization in the lower plate of the Buckskin-Rawhide detachment fault, west-central Arizona: Implications for the geometric evolution of metamorphic core complexes. *Journal of Structural Geology*, 39, 180-198.
- Stewart, S.A., 1999, Geometry of thin-skinned tectonic systems in relation to detachment layer thickness in sedimentary basins: *Tectonics*, 18(4), 719-732.
- Stock, J.M., Hodges, K.V., 1989, Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific plate: *Tectonics*, 8(1), 99-115.
- Stock, J.M., Lee, J., 1994, Do microplates in subduction zones leave a geological record?: *Tectonics*, 13(6), 1472-1487.
- Sutherland, F.H., Kent, G.M., Harding, A.J., Umhoefer, P.J., Driscoll, N.W., Lizarralde, D., Fletcher, J.M., Axen, G.J., Holbrook, W.S., González-Fernández, A., Lonsdale, P., 2012, Middle Miocene to early Pliocene oblique extension in the southern Gulf of California: *Geosphere*, 8(4), 752–770.
- Teyssier, C., Ferré, E. C., Whitney, D. L., Norlander, B., Vanderhaeghe, O., & Parkinson, D. (2005). Flow of partially molten crust and origin of detachments during collapse of the Cordilleran orogen. *Geological Society, London, Special Publications*, 245(1), 39-64.
- Umhoefer, P.J., 2011. Why did the southern Gulf of California rupture so rapidly?—Oblique divergence across hot, weak lithosphere along a tectonically active margin: *GSA Today*, 21(11), 4-10.
- Umhoefer, P.J., Dorsey, R.J., Willsey, S., Mayer, L., Renne, P., 2001, Stratigraphy and geochronology of the Comondu Group near Loreto, Baja California Sur, Mexico. *Sedimentary Geology*, 144(1-2), 125-147.

- Valdéz, I. (2017). Análisis mediante modelos analógicos del sistema de cuencas pull- apart en la parte sur del golfo de California (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Walawender, M.J., Gastil, R.G., Clinkenbeard, J.P., McCormick, W.V., Eastman, B.G., Wernicke, R.S., Wardlaw, M.S., Gunn, S.H., Smith, B.M., 1990, Origin and evolution of the zoned La Posta-type plutons, eastern Peninsular Ranges Batholith, southern and Baja California, *in* Anderson, J., ed., *The Nature and Origin of Cordilleran Magmatism*. Geological Society of America Memoir 174, 1–18.
- Wernicke, B., 1981, Low-angle normal faults in the Basin and Range Province: Nappe tectonics in an extending orogen: *Nature*, 291, 645–648.
- Wernicke, B., 1985, Uniform-sense normal simple shear of the continental lithosphere: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22(1), 108-125.
- Wernicke, B., 1995, Low-angle normal faults and seismicity: A review: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B10), 20159-20174.
- Wernicke, B., Axen, G. J., 1988, On the role of isostasy in the evolution of normal fault systems: *Geology*, 16(9), 848-851.
- Whitney, D.L., Teyssier, C., Rey, P., Buck, W. R., 2013, Continental and oceanic core complexes: *Geological Society of America Bulletin*, 125(3-4), 273-298.
- Wong, M.S., Gans, P.B., Scheier, J., 2010. The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology of core complexes and other basement rocks in Sonora, Mexico: Implications for Cenozoic tectonic evolution of northwestern Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 115 (B07414):pp. 19. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JB007032>
- Yarbu, I., Contreras, J., 2017. The interplay between deformation, erosion and sedimentation in the deep-water Mexican Ridges foldbelt, western Gulf of Mexico basin. *Basin Research*, 29(S1), 446–464. <https://doi.org/10.1111/bre.12157>
- Yarbu, I., González-Fernández, A., Spelz-Madero, R. M., Negrete-Aranda, R., Contreras, J., 2018. Development of detachment folds in the Mexican Ridges foldbelt, western Gulf of Mexico basin. *Tectonics*, 37(7), 2013-2028. <https://doi.org/10.1029/2017TC004948>
- Yilmaz, Ö., 2001, *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*, vol. 1, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 2027 pp.

## Anexo

```
#=====
#####
#
#
#          PROCESADO LINEA SISMICA 55745_57267 PESCADERO
# (PLATAFORMA)          #
#
#
#=====
#####

# PASO 1. Cambio de formato .SGY a .su #

segyread tape=55001.SGY >55001.su
segyread tape=56001.SGY >56001.su
segyread tape=57001.SGY >57001.su

          # reviso informacion de los archivos #

surange < 55001.su #todo en orden#
surange < 56001.su #todo en orden#
surange < 57001.su #todo en orden#

# Concateno los tres archivos para convertirlo en uno

cat 55001.su 56001.su 57001.su > 55001_1.su

# PASO 2. Elimino trazas que no pertenecen a la linea (47001 a
47239 y 48516 a 49000)#

segyread tape=59001.SGY >59001.su
segyread tape=60001.SGY >60001.su
cat 59001.su 60001.su > 1.su

suwind < 60001.su > Linea.su key=fldr min=60832 max=60999
suwind < Linea.su > Linea_1.su key=tracf min=1 max=48
sufilter <Linea_1.su > Linea_pb.su f=13,16,130,135 amps=0,1,1,0
sudipfilt <Linea_pb.su > Linea_FK.su dx=12.5 slopes=-0.00021,-
0.000096,0.00035,0.00050 amps=0,1,1,0
supef < Linea_FK.su > Linea_deconv.su minlag=0.003 maxlag=0.06
sufilter <Linea_deconv.su > Linea_PB2.su f=13,16,120,125
amps=0,1,1,0
sushw < Linea_PB2.su > offset.su key=offset a=16 b=2 j=48
```

```
sushw < offset.su > sx.su key=sx a=160 c=6 j=48
suchw < sx.su > gx.su key1=gx key2=sx key3=offset b=1 c=-1 d=1
suchw < gx.su > cdp.su key1=cdp key2=sx key3=gx b=1 c=1 d=2
sushw < cdp.su > Linea_geom.su key=offset a=100 b=12.5 j=48
susort < Linea_geom.su > Linea_7_2.su cdp offset
surange < Linea_7_2.su
```

```
# PASO 9. Analisis de velocidad por semblanza #
```

```
suximage <47240_gcdp.su f2=105 d2=1 d2num=200 cmap=rgb1 grid1=dot
grid2=dash\gridcolor=black perc=90 windowtitle='Apilado determinar
Cdps'
```

```
    # Para Picar Tab s o Ctrl s #
    # cdp de linea 105 13040 #
```

```
# Se crearan super cdps de 6 unidades. count=48 #
```

```
#####
######
# SCRIPT PARA ANALISIS DE VELOCIDAD POR SEMBLANZA
#
#####
######
```

```
suwind <45042_gcdp.su > cdp$1.su key=cdp min=159 max=164 count=48
sushw < cdp$1.su > temp1.su key=cdp a=1
susort < temp1.su > supercdp$1.su cdp offset
suvelan < supercdp$1.su > anavel.su fv=1400 nv=510 dv=5
suximage < anavel.su f2=1400 d2=5 d2num=200 cmap=rgb1 grid1=dot\
grid2=dash gridcolor=black perc=99.99 windowtitle='Analisis de
Velocidad' mpicks=picks161.txt
```

```
rm anavel.su cdp.su supercdp.su temp1.su
```

```
#####
######
# SCRIPT para generar archivos .par (parametros.sh)
#
#####
######
```

```
sort <picks3605.txt -n |mkparfile string1=tnmo string2=vnmo >p.pk
sed <p.pk
```

```
    s/tnmo/xin/
    s/vnmo/yin/
```

```
' >picks3605.par
rm p.pk
```

```
#=====
#####
# Paso 1
# Interpolar y extrapolar los archivos de picado de velocidades.
Esto ocurre traza a #
# traza, por lo tanto la interpolacion es en el eje del tiempo. El
comando utilizado se #
# llama unisam.
#
#=====
#####
```

```
unisam par=picks107.par nout=8000 dxout=0.001 method=linear >1
```

```
cat 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264
265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280
281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296
297 298 299 300 >300.bin
```

```
cat 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315
316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331
332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347
348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363
364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379
380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395
396 397 398 399 400 >400.bin
```

```
cat 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415
416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431
432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447
448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463
464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479
480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495
496 497 498 499 500 >500.bin
```

```
cat 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515
516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531
532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547
548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563
564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579
580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595
596 597 598 599 600 >600.bin
```

cat 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611  
612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622  
623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633  
634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644  
645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655  
656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666  
667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677  
678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688  
689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699  
700 >700.bin

cat 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711  
712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722  
723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733  
734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744  
745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755  
756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766  
767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777  
778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788  
789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799  
800 >800.bin

cat 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811  
812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822  
823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833  
834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844  
845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855  
856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866  
867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877  
878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888  
889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899  
900 >900.bin

cat 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911  
912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922  
923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933  
934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944  
945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955  
956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966  
967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977  
978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988  
989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999  
1000 >1000.bin

cat 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011  
1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022  
1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033  
1034 1035 1036 1037 1038 1039 1040 1041 1042 1043 1044

```

1045  1046  1047  1048  1049  1050  1051  1052  1053  1054  1055
1056  1057  1058  1059  1060  1061  1062  1063  1064  1065  1066
1067  1068  1069  1070  1071  1072  1073  1074  1075  1076  1077
1078  1079  1080  1081  1082  1083  1084  1085  1086  1087  1088
1089  1090  1091  1092  1093  1094  1095  1096  1097  1098  1099
1100 >1100.bin

cat 1101  1102  1103  1104  1105  1106  1107  1108  1109  1110  1111
1112  1113  1114  1115  1116  1117  1118  1119  1120  1121  1122
1123  1124  1125  1126  1127  1128  1129  1130  1131  1132  1133
1134  1135  1136  1137  1138  1139  1140  1141  1142  1143  1144
1145  1146  1147  1148  1149  1150  1151  1152  1153  1154  1155
1156  1157  1158  1159  1160  1161  1162  1163  1164  1165  1166
1167  1168  1169  1170  1171  1172  1173  1174  1175  1176  1177
1178  1179  1180  1181  1182  1183  1184  1185  1186  1187  1188
1189  1190  1191  1192  1193  1194  1195  1196  1197  1198  1199
1200 >1200.bin

cat 1201  1202  1203  1204  1205  1206  1207  1208  1209  1210  1211
1212  1213  1214  1215  1216  1217  1218  1219  1220  1221  1222
1223  1224  1225  1226  1227  1228  1229  1230  1231  1232  1233
1234  1235  1236  1237  1238  1239  1240  1241  1242  1243  1244
1245  1246  1247  1248  1249  1250  1251  1252  1253  1254  1255
1256  1257  1258  1259  1260  1261  1262  1263  1264  1265  1266
1267  1268  1269  1270  1271  1272  1273  1274  1275  1276  1277
1278  1279  1280  1281  1282  1283  1284  1285  1286  1287  1288
1289  1290  1291  1292  1293  1294  1295  1296  1297  1298  1299
1300 >1300.bin

cat 1301  1302  1303  1304  1305  1306  1307  1308  1309  1310  1311
1312  1313  1314  1315  1316  1317  1318  1319  1320  1321  1322
1323  1324  1325  1326  1327  1328  1329  1330  1331  1332  1333
1334  1335  1336  1337  1338  1339  1340  1341  1342  1343  1344
1345  1346  1347  1348  1349  1350  1351  1352  1353  1354  1355
1356  1357  1358  1359  1360  1361  1362  1363  1364  1365  1366
1367  1368  1369  1370  1371  1372  1373  1374  1375  1376  1377
1378  1379  1380  1381  1382  1383  1384  1385  1386  1387  1388
1389  1390  1391  1392  1393  1394  1395  1396  1397  1398  1399
1400 >1400.bin

cat 1401  1402  1403  1404  1405  1406  1407  1408  1409  1410  1411
1412  1413  1414  1415  1416  1417  1418  1419  1420  1421  1422
1423  1424  1425  1426  1427  1428  1429  1430  1431  1432  1433
1434  1435  1436  1437  1438  1439  1440  1441  1442  1443  1444
1445  1446  1447  1448  1449  1450  1451  1452  1453  1454  1455
1456  1457  1458  1459  1460  1461  1462  1463  1464  1465  1466
1467  1468  1469  1470  1471  1472  1473  1474  1475  1476  1477
1478  1479  1480  1481  1482  1483  1484  1485  1486  1487  1488

```

```

1489 1490 1491 1492 1493 1494 1495 1496 1497 1498 1499
1500 >1500.bin

cat 1501 1502 1503 1504 1505 1506 1507 1508 1509 1510 1511
1512 1513 1514 1515 1516 1517 1518 1519 1520 1521 1522
1523 1524 1525 1526 1527 1528 1529 1530 >1530.bin

cat 300.bin 400.bin 500.bin 600.bin 700.bin 800.bin 900.bin
1000.bin 1100.bin 1200.bin 1300.bin 1400.bin 1500.bin
1530.bin>45042.bin

#=====
#=====#
# Paso 2
#
# Interpolar y extrapolar entre archivos, es decir, en el eje de
distancias #
# (No. de traza o de CDP. En este caso (9284-105)+1=9180)
#
# Nota: primero se transponen los datos para trabajar en la
vertical (n1= z max en twtt)#
#porque el programa #
# no trabaja sobre la horizontal (n2= numero de par creados)#
#=====
#=====#

transp <45042.bin >55745t.bin n1=8000 n2=1280

unisam2 <55745t.bin
x1=1601,1607,1613,1619,1625,1631,1637,1643,1649,1655,1661,1667,167
3,1679,1685,1691,1697,1703,1709,1715,1721,1727,1733,1739,1745,1751
,1757,1763,1769,1775,1781,1787,1793,1799,1805,1811,1817,1823,1829,
1835,1841,1847,1853,1859,1865,1871,1877,1883,1889,1895,1901,1907,1
913,1919,1925,1931,1937,1943,1949,1955,1961,1967,1973,1979,1985,19
91,1997,2003,2009,2015,2021,2027,2033,2039,2045,2051,2057,2063,206
9,2075,2081,2087,2093,2099,2105,2111,2117,2123,2129,2135,2141,2147
,2153,2159,2165,2171,2177,2183,2189,2195,2201,2207,2213,2219,2225,
2231,2237,2243,2249,2255,2261,2267,2273,2279,2285,2291,2297,2303,2
309,2315,2321,2327,2333,2339,2345,2351,2357,2363,2369,2375,2381,23
87,2393,2399,2405,2411,2417,2423,2429,2435,2441,2447,2453,2459,246
5,2471,2477,2483,2489,2495,2501,2507,2513,2519,2525,2531,2537,2543
,2549,2555,2561,2567,2573,2579,2585,2591,2597,2603,2609,2615,2621,
2627,2633,2639,2645,2651,2657,2663,2669,2675,2681,2687,2693,2699,2
705,2711,2717,2723,2729,2735,2741,2747,2753,2759,2765,2771,2777,27
83,2789,2795,2801,2807,2813,2819,2825,2831,2837,2843,2849,2855,286
1,2867,2873,2879,2885,2891,2897,2903,2909,2915,2921,2927,2933,2939

```

, 2945, 2951, 2957, 2963, 2969, 2975, 2981, 2987, 2993, 2999, 3005, 3011, 3017, 3023, 3029, 3035, 3041, 3047, 3053, 3059, 3065, 3071, 3077, 3083, 3089, 3095, 3101, 3107, 3113, 3119, 3125, 3131, 3137, 3143, 3149, 3155, 3161, 3167, 3173, 3179, 3185, 3191, 3197, 3203, 3209, 3215, 3221, 3227, 3233, 3239, 3245, 3251, 3257, 3263, 3269, 3275, 3281, 3287, 3293, 3299, 3305, 3311, 3317, 3323, 3329, 3335, 3341, 3347, 3353, 3359, 3365, 3371, 3377, 3383, 3389, 3395, 3401, 3407, 3413, 3419, 3425, 3431, 3437, 3443, 3449, 3455, 3461, 3467, 3473, 3479, 3485, 3491, 3497, 3503, 3509, 3515, 3521, 3527, 3533, 3539, 3545, 3551, 3557, 3563, 3569, 3575, 3581, 3587, 3593, 3599, 3605, 3611, 3617, 3623, 3629, 3635, 3641, 3647, 3653, 3659, 3665, 3671, 3677, 3683, 3689, 3695, 3701, 3707, 3713, 3719, 3725, 3731, 3737, 3743, 3749, 3755, 3761, 3767, 3773, 3779, 3785, 3791, 3797, 3803, 3809, 3815, 3821, 3827, 3833, 3839, 3845, 3851, 3857, 3863, 3869, 3875, 3881, 3887, 3893, 3899, 3905, 3911, 3917, 3923, 3929, 3935, 3941, 3947, 3953, 3959, 3965, 3971, 3977, 3983, 3989, 3995, 4001, 4007, 4013, 4019, 4025, 4031, 4037, 4043, 4049, 4055, 4061, 4067, 4073, 4079, 4085, 4091, 4097, 4103, 4109, 4115, 4121, 4127, 4133, 4139, 4145, 4151, 4157, 4163, 4169, 4175, 4181, 4187, 4193, 4199, 4205, 4211, 4217, 4223, 4229, 4235, 4241, 4247, 4253, 4259, 4265, 4271, 4277, 4283, 4289, 4295, 4301, 4307, 4313, 4319, 4325, 4331, 4337, 4343, 4349, 4355, 4361, 4367, 4373, 4379, 4385, 4391, 4397, 4403, 4409, 4415, 4421, 4427, 4433, 4439, 4445, 4451, 4457, 4463, 4469, 4475, 4481, 4487, 4493, 4499, 4505, 4511, 4517, 4523, 4529, 4535, 4541, 4547, 4553, 4559, 4565, 4571, 4577, 4583, 4589, 4595, 4601, 4607, 4613, 4619, 4625, 4631, 4637, 4643, 4649, 4655, 4661, 4667, 4673, 4679, 4685, 4691, 4697, 4703, 4709, 4715, 4721, 4727, 4733, 4739, 4745, 4751, 4757, 4763, 4769, 4775, 4781, 4787, 4793, 4799, 4805, 4811, 4817, 4823, 4829, 4835, 4841, 4847, 4853, 4859, 4865, 4871, 4877, 4883, 4889, 4895, 4901, 4907, 4913, 4919, 4925, 4931, 4937, 4943, 4949, 4955, 4961, 4967, 4973, 4979, 4985, 4991, 4997, 5003, 5009, 5015, 5021, 5027, 5033, 5039, 5045, 5051, 5057, 5063, 5069, 5075, 5081, 5087, 5093, 5099, 5105, 5111, 5117, 5123, 5129, 5135, 5141, 5147, 5153, 5159, 5165, 5171, 5177, 5183, 5189, 5195, 5201, 5207, 5213, 5219, 5225, 5231, 5237, 5243, 5249, 5255, 5261, 5267, 5273, 5279, 5285, 5291, 5297, 5303, 5309, 5315, 5321, 5327, 5333, 5339, 5345, 5351, 5357, 5363, 5369, 5375, 5381, 5387, 5393, 5399, 5405, 5411, 5417, 5423, 5429, 5435, 5441, 5447, 5453, 5459, 5465, 5471, 5477, 5483, 5489, 5495, 5501, 5507, 5513, 5519, 5525, 5531, 5537, 5543, 5549, 5555, 5561, 5567, 5573, 5579, 5585, 5591, 5597, 5603, 5609, 5615, 5621, 5627, 5633, 5639, 5645, 5651, 5657, 5663, 5669, 5675, 5681, 5687, 5693, 5699, 5705, 5711, 5717, 5723, 5729, 5735, 5741, 5747, 5753, 5759, 5765, 5771, 5777, 5783, 5789, 5795, 5801, 5807, 5813, 5819, 5825, 5831, 5837, 5843, 5849, 5855, 5861, 5867, 5873, 5879, 5885, 5891, 5897, 5903, 5909, 5915, 5921, 5927, 5933, 5939, 5945, 5951, 5957, 5963, 5969, 5975, 5981, 5987, 5993, 5999, 6005, 6011, 6017, 6023, 6029, 6035, 6041, 6047, 6053, 6059, 6065, 6071, 6077, 6083, 6089, 6095, 6101, 6107, 6113, 6119, 6125, 6131, 6137, 6143, 6149, 6155, 6161, 6167, 6173, 6179, 6185, 6191, 6197, 6203, 6209, 6215, 6221, 6227, 6233, 6239, 6245, 6251, 6257, 6263, 6269, 6275, 6281, 6287, 6293, 6299, 6305, 6311, 6317, 6323, 6329, 6335, 6341, 6347, 6353, 6359, 6365, 6371, 6377, 6383, 6389, 6395, 6401, 6407, 6413, 6419, 6425, 6431, 6437, 6443, 6449, 6455, 6461, 6467, 6473, 6479, 6485, 6491, 6497, 6503, 6509, 6515, 6521, 6527, 6533, 6539, 6545, 6551, 6557, 6563, 6569, 6575, 6581, 6587, 6593, 6599, 6605, 6611, 6617, 6623, 6629, 6635, 6641, 6647, 6653, 6659, 6665, 6671, 6677, 6683, 6689, 6695, 6701, 6707, 6713, 6719, 6725, 6731, 6737, 67

```
43,6749,6755,6761,6767,6773,6779,6785,6791,6797,6803,6809,6815,682
1,6827,6833,6839,6845,6851,6857,6863,6869,6875,6881,6887,6893,6899
,6905,6911,6917,6923,6929,6935,6941,6947,6953,6959,6965,6971,6977,
6983,6989,6995,7001,7007,7013,7019,7025,7031,7037,7043,7049,7055,7
061,7067,7073,7079,7085,7091,7097,7103,7109,7115,7121,7127,7133,71
39,7145,7151,7157,7163,7169,7175,7181,7187,7193,7199,7205,7211,721
7,7223,7229,7235,7241,7247,7253,7259,7265,7271,7277,7283,7289,7295
,7301,7307,7313,7319,7325,7331,7337,7343,7349,7355,7361,7367,7373,
7379,7385,7391,7397,7403,7409,7415,7421,7427,7433,7439,7445,7451,7
457,7463,7469,7475,7481,7487,7493,7499,7505,7511,7517,7523,7529,75
35,7541,7547,7553,7559,7565,7571,7577,7583,7589,7595,7601,7607,761
3,7619,7625,7631,7637,7643,7649,7655,7661,7667,7673,7679,7685,7691
,7697,7703,7709,7715,7721,7727,7733,7739,7745,7751,7757,7763,7769,
7775,7781,7787,7793,7799,7805,7811,7817,7823,7829,7835,7841,7847,7
853,7859,7865,7871,7877,7883,7889,7895,7901,7907,7913,7919,7925,79
31,7937,7943,7949,7955,7961,7967,7973,7979,7985,7991,7997,8003,800
9,8015,8021,8027,8033,8039,8045,8051,8057,8063,8069,8075,8081,8087
,8093,8099,8105,8111,8117,8123,8129,8135,8141,8147,8153,8159,8165,
8171,8177,8183,8189,8195,8201,8207,8213,8219,8225,8231,8237,8243,8
249,8255,8261,8267,8273,8279,8285,8291,8297,8303,8309,8315,8321,83
27,8333,8339,8345,8351,8357,8363,8369,8375,8381,8387,8393,8399,840
5,8411,8417,8423,8429,8435,8441,8447,8453,8459,8465,8471,8477,8483
,8489,8495,8501,8507,8513,8519,8525,8531,8537,8543,8549,8555,8561,
8567,8573,8579,8585,8591,8597,8603,8609,8615,8621,8627,8633,8639,8
645,8651,8657,8663,8669,8675,8681,8687,8693,8699,8705,8711,8717,87
23,8729,8735,8741,8747,8753,8759,8765,8771,8777,8783,8789,8795,880
1,8807,8813,8819,8825,8831,8837,8843,8849,8855,8861,8867,8873,8879
,8885,8891,8897,8903,8909,8915,8921,8927,8933,8939,8945,8951,8957,
8963,8969,8975,8981,8987,8993,8999,9005,9011,9017,9023,9029,9035,9
041,9047,9053,9059,9065,9071,9077,9083,9089,9095,9101,9107,9113,91
19,9125,9131,9137,9143,9149,9155,9161,9167,9173,9179,9185,9191,919
7,9203,9209,9215,9221,9227,9233,9239,9245,9251,9257,9263,9269,9275
,9281 n1=7680 d1=1 f1=1593 n2=8000 d2=0.001 f2=0 nx2=8000
dx2=0.001 fx2=0 method1=linear >55745t1.bin
```

```
transp <55745t1.bin >55745t2.bin n1=9180 n2=8000
```

```
ximage <55745t2.bin n2=1050 f2=105 d2=1 n1=8000 f1=0 d1=0.001
cmap=hsv2 legend=1 units="m/s" windowtitle="velocity" &
```

```
#Suavisar (este paso es opcional). Vamos a realizar un suavizado
bajo#
```

```
smooth2 <55745t2.bin >55745vel.bin n2=9180 n1=8000 r1=1 r2=10
```

```
#Graficar nuevamente y comparar#
```

```
ximage <55745vel.bin n2=9180 f2=105 d2=1 n1=8000 f1=0 d1=0.001
cmap=hsv2 legend=1 units="m/s" windowtitle="velocity suavizado" &
```

```
#=====
#####
# APILADO. Con los resultados del análisis de velocidad y una vez
aplicadas las #
# correcciones NMO se procede a obtener la sección sísmica. Así
pues, una sección #
# sísmica está formada por todas las trazas CDP y representa una
imagen de los #
# reflectores presentes en el subsuelo en de offset cero y modo
tiempo doble. #
# Esta sección obtenida aún no es la definitiva, sino que aún
deben realizarse #
# determinados tratamientos cuyo número de aplicación, al igual
que ocurre con la edición#
# de los tiros depende de la calidad de los datos.
#Tarea: Normal move out y apliado
#
#=====
#####
```

```
sunmo <45042_gcdp.su >temp5.su par=55745vel.bin
sustack <temp5.su >sustack3.su
suximage <sustack3.su perc=99 windowtitle='Análisis de Velocidad'
&
```

```
#=====
#####
# Igual que el anterior pero utilizando velocidad constante igual
a 1400 m/s. Este es #
# el algoritmo que mejor se ajusta al producto final
#
#=====
#####
```

```
sustolt <sustack3.su >55745_stolt.su tmig=0 vmig=1400 dxcdp=6.25
cdpmin=105 cdpmax=9284
suximage <55745_stolt.su perc=99 windowtitle='Migracion3' &
```

```
# Para migrar datos con tomando en cuenta el análisis de
velocidades para mayor detalle
```

```
velconv < 55745vel.bin > 55745_v11.bin intype=vrms outtype=vintt
sumigps < sustack3.su > 55745_migps.su dx=6.25 vfile=55745_v11.bin
suximage < 55745_migps.su perc=99 windowtitle='Migracion_ps'
```

```
## convertir a profundidad con analisis de velocidad ##  
suttoz <45042_migps.su >45042_z.su vfile=45042_vel.bin  
suximage <45042_z.su perc=99 windowtitle='PROFUNDIDAD' &  
## GEOMETRIA FINAL ##  
dos2unix NAV_CDP.csv  
# se copia el archivo NAV_CDP.csv y se le cambia el nombre a  
linea_CDP #  
a2b < 45042_CDP n1=3 > 45042_CDP.bin  
sushw < 45042_z.su key=sx,sy,cdp infile=45042_CDP.bin >  
45042_edit.su  
surange < 45042_edit.su  
## TRANSFORMAR SGY DE SALIDA ##  
segymhdrs <45042_edit.su >45042_CDP.su  
segymwrite <45042_CDP.su tape=45042_CDP.SGY
```