

# CAPÍTULO 5

## Discusión y conclusiones

Este capítulo pone fin a este trabajo de tesis; el propósito de este apartado es reunir y discutir la información del Capítulo 2 concerniente a la apertura del golfo de California con los datos de espesor de la litosfera calculados en el Capítulo 3 y analizados en el Capítulo 4, para discutir el estado actual de la litosfera que rodea al golfo de California.

Iniciaremos el capítulo revisando nuestros resultados de las *FRS* en tiempo, continuamos con el análisis de nuestros resultados en profundidad de la litosfera relacionados a los diferentes procesos tectónicos ligados a la apertura del golfo de California.

Para aceptar cualquier hipótesis sobre los procesos tectónicos que sucedieron o se llevan a cabo en el golfo de California es indispensable conocer las propiedades físicas de la litosfera en la zona de estudio. Con el propósito de contribuir a tales conocimientos en este trabajo se ha llevado a cabo la estimación de la profundidad de la frontera litosfera-astenosfera, además al hacer ese cálculo también estamos estimando el grosor de las secciones rígidas de la litosfera (placas tectónicas) que se mueven como una unidad sobre el material de la astenosfera.

### 5.1 Frontera litosfera-astenosfera mapeada en las *FRS* en tiempo

El manto superior está relacionado con una zona de bajas velocidades sísmicas probablemente asociadas a zonas de fusión parcial del manto (Wittlinger et al., 2004). La respuesta sísmica de la frontera litosfera-astenosfera está representada por la fase convertida  $S_{LABP}$  observable en las trazas de *FRS* mostradas en el capítulo anterior.

En este apartado examinaremos primero las estaciones ubicadas en la península de Baja California (NE70, NE71, NE72, NE73, NE74, NE75, NE76, NE77, NE79, NE84 y NE85).

Los valores en tiempo leídos para la fase convertida  $S_{LABP}$  es mayor para las estaciones situadas al norte y centro (excepto la estación NE70); en estos valores se encuentra reflejado el efecto de una gran tasa de sedimentación en la zona o de una capa muy gruesa (González-Fernández et al., 2005).

La estación NE70 se encuentra sobre el límite entre placas Pacífico-Norteamérica, los valores en tiempos leídos para la fase  $S_{LABP}$  son menores (4.3-9.6 s) con respecto a la estación más cercana NE71 (9.5-14 s); las lecturas de la estación NE70 son menores debido a la influencia de la región de Salton Through, que es una zona que fue afectada por procesos de extensión en la corteza. Persaud et al. (2007) mostraron mediante *FRP* en estaciones cercanas a la estación NE70 que la corteza tiene un espesor pequeño con respecto a las demás estaciones (~20 km), de ahí que los valores en tiempo leído para la respuesta de la frontera litosfera-astenosfera son consistentes con los valores leídos para el Moho.

En estaciones ubicadas en los márgenes del golfo observamos que los tiempos leídos de los pulsos interpretados como la frontera litosfera-astenosfera son menores que las de aquellas estaciones que no lo están, tal es el caso de la estación NE85. Este adelgazamiento es consistente con la disminución en espesor observado en la corteza (por ejemplo, Persaud et al., 2007).

Comparando en su conjunto las estaciones ubicadas en la península de Baja California y las que se encuentran en Sonora y Sinaloa, observamos que los valores leídos que son significativamente diferentes son aquellos que provienen de estaciones ubicadas en el sur de la península de Baja California (tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 del Capítulo anterior).

La variación que existe entre los valores en tiempo leídos para las estaciones localizadas en Sonora y Sinaloa (NE80, NE81, NE82 y NE83) es mínima aunque es posible observar que en el norte los valores leídos son mayores (por ejemplo la estación NE80).

## **5.2 Profundidad de la litosfera bajo la red estaciones NARS-Baja**

En el mapa de la Figura 5.1 se encuentran los principales rasgos tectónicos de la región del golfo de California y el movimiento relativo y absoluto de las placas (Pacífico y Norteamérica). Además se muestra la red de estaciones empleada en este trabajo y los perfiles que se discutirán posteriormente. Con el propósito de comparar los resultados obtenidos, primero analizaremos aquéllos en la península de Baja California, después proseguiremos con las estaciones localizadas en Sonora y Sinaloa.

A partir de los cinco perfiles trazados en la Figura 5.1 es posible dilucidar el estado que guarda el espesor de la litosfera a lo largo de la península de Baja California (perfil D-D', Figura 5.2). Los perfiles A-A', B-B' y C-C' (figuras 5.3 a 5.5), van de norte a sur, son paralelos entre sí y transversales a los perfiles D-D' y E-E'; incluyen estaciones tanto en la península de Baja California como en Sonora y Sinaloa, permitiendo comparar directamente el espesor de la litosfera en la península de Baja de California y en la placa de Norteamérica. El perfil E-E' (Figura 5.6) es paralelo al perfil D-D' y se encuentra ubicado en los estados de Sonora y Sinaloa.

### **5.2.1 Península de Baja California**

La Provincia Extensional del Golfo representa un lugar muy interesante en la región del golfo de California (observar Figura 5.1). Esta zona fue resultado de la transferencia de la península de Baja California a la placa del Pacífico; se encuentra limitada al oeste por la cordillera de Baja California y al este por la Sierra Madre Occidental. Se piensa que dicha provincia se formó principalmente en dos fases: un primer período temprano de extensión y separación continental que formaron las primeras cuencas marinas; la segunda fase continuó con un período de expansión de piso oceánico y formación de fallas transformantes (Fletcher & Munguía, 2000), estos últimos procesos continúan hoy en día. De acuerdo a lo anterior, el régimen de los márgenes del golfo se comportarían mecánicamente de manera diferente con respecto al régimen al interior del golfo (Fletcher & Munguía, 2000). La manera en que este comportamiento se encuentra reflejado en nuestros resultados es el siguiente: observamos



La estación NE70 nos permite conocer el espesor de la litosfera al norte del golfo de California. El régimen de extensión durante la apertura del golfo y posterior movimiento entre placas (Pacífico y Norteamérica) que sufrió esta zona ha causado un adelgazamiento importante de la corteza continental; esta extensión se encuentra evidenciada por la existencia de cuencas abandonadas y activas (como la cuenca de Wagner), además de sistemas de fallas pobremente organizadas. A su vez, dicho adelgazamiento de la corteza se encuentra reflejado en el espesor de la litosfera reportado en nuestro trabajo (ver Figura 5.7), aunque nuestro valor de espesor estimado para la litosfera es pequeño, correlaciona muy bien con el ambiente tectónico; a pesar de dicha extensión, en la región no existe evidencia de generación de nuevo piso oceánico como sucede en la boca del golfo (Larson et al., 1972; Klitgord et al., 1974; Lonsdale, 1989).

La subducción y posterior ruptura de la antigua placa oceánica de Farallón dio como resultado la aparición de dos micro-placas: la de Guadalupe y Magdalena, placas que cesaron su subducción hace aproximadamente 12 millones de años, en varios artículos se ha reportado remanentes de dichas micro-placas (por ejemplo, Zhang et al., 2007; Persaud et al., 2007). De acuerdo con evidencias de anisotropía, Persaud et al. (2007) mostraron que podrían existir remanentes de la placa de Farallón en la estación NE75. La posible ubicación de tales micro-placas se encuentra representada en la Figura 5.1; de ahí que se espera la respuesta de dichos remanentes en las estaciones NE74, N75, NE76, NE77 y NE84.

En general, las estaciones de Baja California Norte y centro (perfil D-D', Figura 5.2) presentan un valor de profundidad a la frontera litosfera-astenosfera mayor que las estaciones de Baja California Sur (excepto la estación NE70). La diferencia en espesores entre el norte-centro y el sur es de 15.9 km, tomando en cuenta que el promedio del espesor para las estaciones del norte-centro es de  $84.5 \pm 9.3$  km y para el sur es de  $68.9 \pm 13.5$  km.

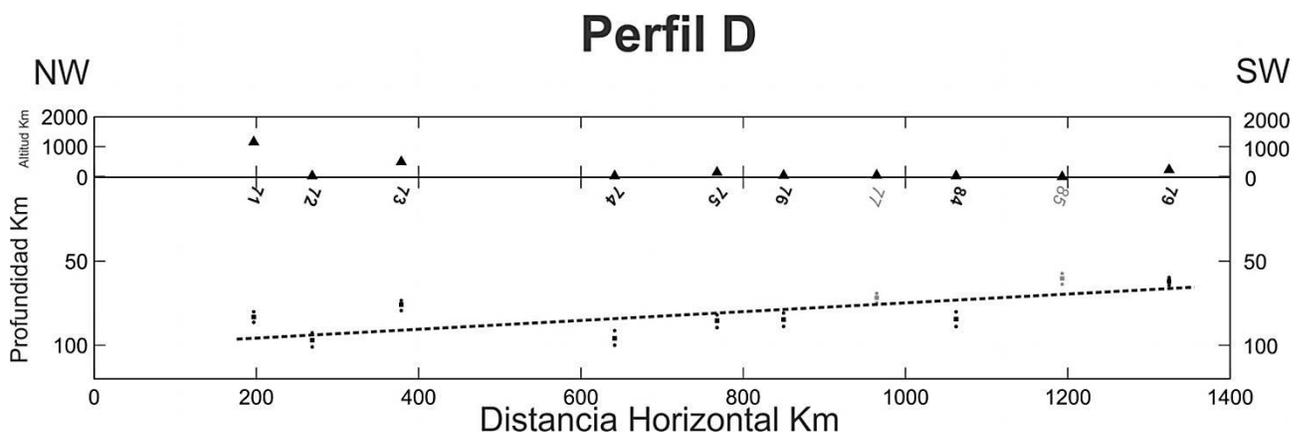


Figura 5.2. Profundidad a la frontera litosfera-astenosfera a lo largo de perfil D-D'. Panel inferior: el eje de las abscisas corresponde la distancia horizontal a lo largo perfil y en el eje de las ordenadas la profundidad; la línea punteada denota la frontera litosfera-astenosfera. La escala vertical del panel está exagerada dos veces. En el panel superior se representa a las estaciones con un triángulo y su respectiva elevación. Las estaciones NE77 y NE85 (gris claro) son estaciones ubicadas en la costa Este de la península de Baja California y cuyo valor es significativamente diferente a las estaciones hacia el Oeste.

El espesor de la litosfera también varía de oeste a este (perfil A-A', Figura 5.3; perfil B-B', Figura 5.4; perfil C-C', figura 5.5; perfil D-D', Figura 5.2) en la península de Baja California (a excepción de la estación NE76); las estaciones del oeste muestran un valor de espesor mayor que las del este.

La variación promedio de la profundidad a la frontera litosfera-astenosfera en las estaciones en la península de Baja California de oeste (NE72) a este (NE71 y NE73, profundidad promedio de  $79.6 \pm 5.3$  km), en el perfil A-A' (Figura 5.3) es de 17.3 km.

En el perfil B-B' (Figura 5.4) se puede ver que la variación del espesor de la litosfera de oeste a este es de hasta de 24.1 km (diferencia entre las profundidades encontradas en las estaciones NE74, al oeste, y NE77, al este). Mientras que la diferencia en las estaciones ubicadas en Sonora y Sinaloa es de 3.6 km.

En el perfil C-C' (Figura 5.5), la diferencia de profundidad a la frontera litosfera-astenosfera entre las estaciones del oeste (NE84) y del este (NE85 y NE79, profundidad promedio de  $61.2 \pm 1.2$  km) en península de Baja California es de 23.2 km.

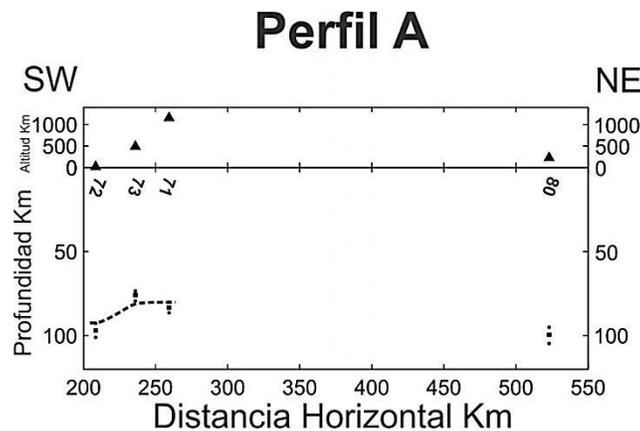


Figura 5.3. Profundidad hacia la frontera litosfera-astenosfera a lo largo del perfil A-A'. En este perfil hay estaciones ubicadas en la península de Baja California, Sonora y Sinaloa (ver Figura 5.1). Panel inferior: el eje de las abscisas corresponde a la distancia horizontal del perfil y el eje de las ordenadas, a la profundidad; la línea punteada es el espesor (adelgazándose en dirección oeste-este en la península) de la litosfera interpretada. La escala vertical está exagerada dos veces. En el panel superior se representa a las estaciones con un triángulo y su respectiva elevación.

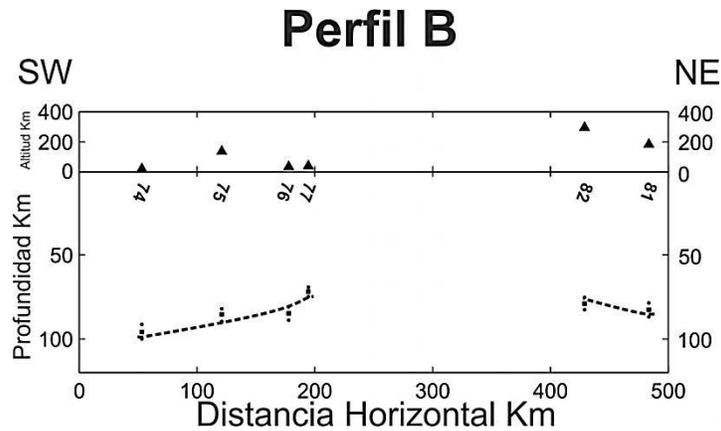


Figura 5.4. Profundidad de la frontera litosfera-astenosfera a lo largo del perfil B-B'. En este perfil hay estaciones ubicadas en la península de Baja California, Sonora y Sinaloa (ver Figura 5.1). Panel inferior: el eje de las abscisas corresponde a la distancia horizontal del perfil y el eje de las ordenadas, a la profundidad; la línea punteada es el espesor (adelgazándose en dirección oeste-este) de la litosfera interpretada. En el panel superior se representa a las estaciones con un triángulo y su respectiva elevación. La escala vertical del panel inferior esta exagerada dos veces.

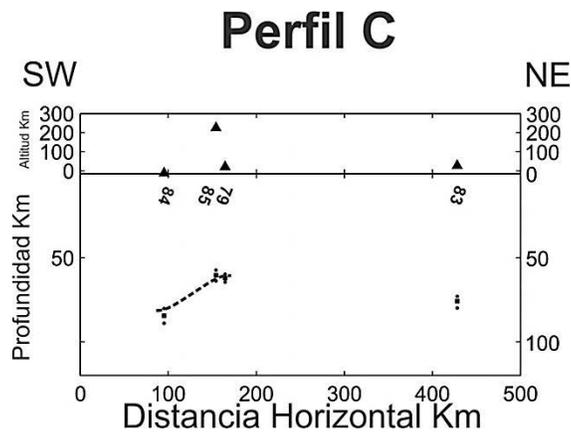


Figura 5.5. Profundidad de la frontera litosfera-astenosfera a lo largo de perfil C-C'. En este perfil hay estaciones ubicadas en la península de Baja California, Sonora y Sinaloa (ver Figura 5.1). Panel inferior: el eje de las abscisas corresponde a la distancia horizontal del perfil y el eje de las ordenadas, a la profundidad; la línea punteada es el espesor (adelgazándose en dirección oeste-este en la península) de la litosfera interpretada. La escala vertical del está exagerada dos veces. En el panel superior se representa a las estaciones con un triángulo y su respectiva elevación.

### 5.2.2 En la placa de Norteamérica (estados de Sonora y Sinaloa, México)

El espesor de la litosfera en esta zona disminuye de norte a sur (perfil E-E', Figura 5.6) alcanzando su valor máximo en la estación NE80 y el mínimo en la estación NE83, esta variación es observable también en la corteza (ver Figura 5.6). La diferencia de los espesores de la litosfera entre estas dos estaciones es de 23.8 km.

## Perfil E

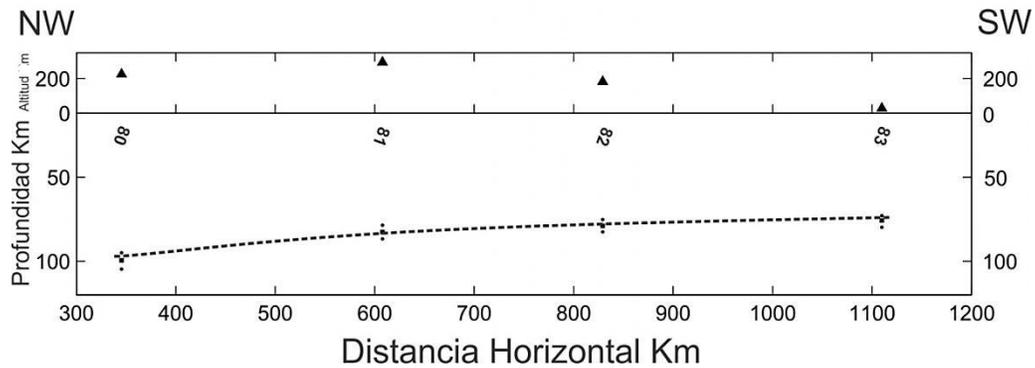


Figura 5.6. Profundidad de la frontera litosfera-astenosfera a lo largo del perfil E-E'. Estaciones ubicadas en Sonora y Sinaloa (ver Figura 5.1). Panel inferior: el eje de las abscisas corresponde a la distancia horizontal del perfil y el eje de las ordenadas, a la profundidad; la línea punteada es el espesor (adelgazándose hacia el sur) de la litosfera interpretada. La escala vertical está exagerada dos veces. En el panel superior se representa las estaciones con un triángulo y su respectiva elevación.

Las estaciones NE80, NE82 y NE83 se encuentran en la zona que se ha marcado como la Provincia Extensional del Golfo; dado que la estación NE81 no se encuentra en dicha zona nos podría servir de referencia, entonces tenemos que en esta estación el valor estimado para la litosfera no varía en gran proporción con respecto a las estaciones cercanas (NE80 y NE82) y más aun, nuestros resultados nos hacen pensar en una litosfera por debajo del continente americano de espesor con muy poca variación.

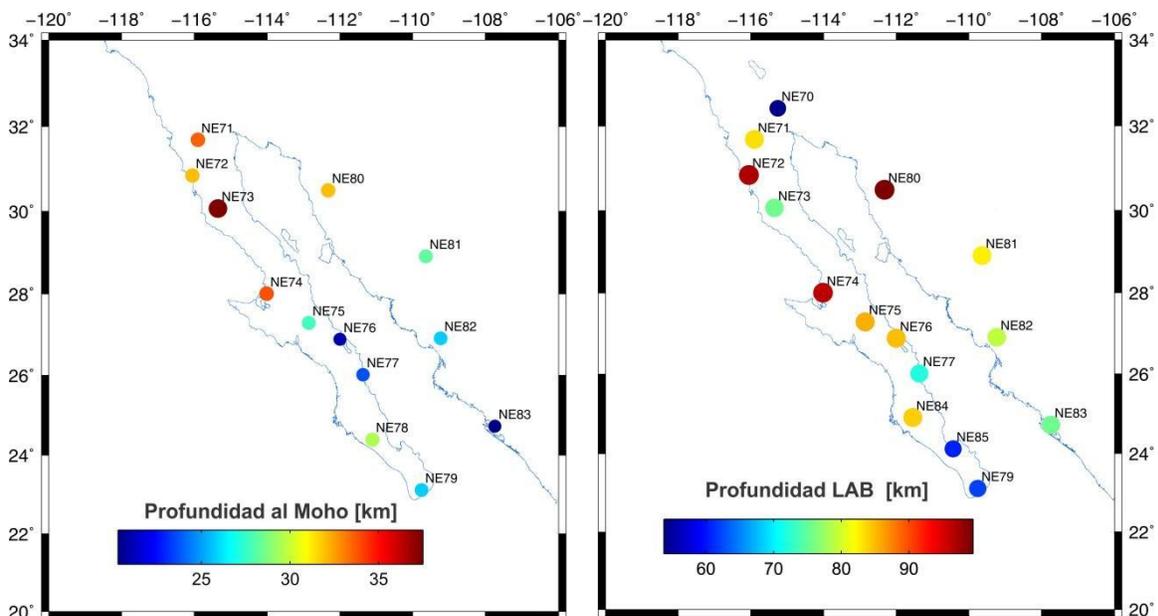


Figura 5.7. Profundidades al Moho (izquierda, los valores fueron tomados de Persaud et al., 2007), y profundidades a la frontera litosfera-astenosfera (derecha), modelo de referencia IASP91.

Las variaciones de espesor de la litosfera reportadas en los perfiles anteriormente presentados son consistentes con la variación del espesor de la corteza (Figura 5.7). Persaud y colaboradores (2007) obtuvieron mediante un análisis de *FRP* valores de espesor de la corteza determinando que disminuye de norte a sur (con un factor de dos) y de oeste a este en la península de Baja California.

### 5.2.3 Estudios preexistentes de espesor de la litosfera alrededor del golfo de California

Trabajos previos han mapeado la profundidad de la frontera litosfera-astenosfera a nivel global, coincidiendo en que el promedio de grosor de la frontera litosfera-astenosfera varía según el ambiente tectónico, los valores que se han calculado son los siguientes (Rychert & Shearer, 2009):  $70\pm 4$  km (océanos);  $81\pm 2$  km (regiones orogénicas del Fanerozoico y cinturones magmáticos);  $82\pm 6$  km (plataformas del Fanerozoico) y  $95\pm 4$  km (escudos del Precámbrico y plataformas). Asimismo, en trabajos previos se ha investigado el espesor de la litosfera en la región del golfo de California (por ejemplo, Rychert & Shearer, 2009; Abt et al., 2010; Seavey et al., 2010; Fischer et al., 2010), dichos estudios se han llevado a cabo sobre todo al norte del golfo, la Tabla 5.1 muestra los resultados obtenidos por los diferentes trabajos.

Tabla 5.1. Valores de profundidad (en kilómetros) para la frontera litosfera-astenosfera calculados por diferentes autores.

Estación	Rychert & Shearer (2009) <sup>1</sup>	Fischer et al. (2010) <sup>2</sup>	Abt et al. (2010)	Seavey et al. (2010)	Este trabajo
NE70	x	50	52	X	53.8 (52.8,55.5)
NE71	60	63	67	X	83.3 (80.1,86.4)
NE79	X	X	x	58	62 (59.7,64.4)
NE81	X	X	x	73	82.6 (78.6,86.7)

<sup>1</sup> Valor tomado de un mapa global de profundidades de la frontera litosfera-astenosfera publicado por Rychert & Shearer, (2009).

<sup>2</sup> Datos obtenidos de Fischer et al. (2010) a partir de un mapa global.

Analizando los valores de la Tabla 5.1 observamos:

- En la estación NE70, el valor de profundidad calculado en este trabajo concuerda prácticamente con el obtenido por Fischer et al. (2010) y el conseguido por Abt et al. (2010). El valor de Seavey et al. (2010) presentado en la tabla 5.1 corresponde al valor de profundidad de la litosfera-astenosfera calculado en Salton Trough. La estación NE70 se encuentra en una zona que fue afectada por procesos de extensión que probablemente provocaron un adelgazamiento en la litosfera, de tal manera que los resultados son consistentes con la historia tectónica de la zona.
- Bajo la estación NE71 estimamos un espesor de la litosfera de 83 km, valor 16 km mayor al presentado por los demás autores (Rychert & Shearer, 2009; Fischer et al., 2010; Abt et al., 2010; Seavey et al., 2010). Cabe destacar que en esta estación fue particularmente difícil marcar los pulsos correspondientes a la respuesta de la frontera litosfera-astenosfera. Los valores presentados por Rychert & Shearer (2009) y

Fisher et al. (2010) provienen de un mapa global (resultado de un método de interpolación), mientras que las estimaciones de profundidad a la frontera litosfera-astenosfera presentadas en este trabajo son estimaciones de espesor de la litosfera por debajo de las estaciones.

Parte de la diferencia entre los valores de Abt et al. (2010) es atribuible a la falta de robustez en el método para calcular las profundidades. La falta de robustez en el procedimiento es provocada por la gran dependencia que existe entre  $H_2$  (espesor del manto litosférico) y  $\kappa_2=V_p/V_s$  (cociente del promedio de velocidades de onda P y S en el manto litosférico); ésta puede ser reducida como comentábamos en el Capítulo 4 incorporando al algoritmo las lecturas de la fase  $S_{\text{MohoP}}$ .

- La estación NE79 representa un punto de coincidencia entre los resultados obtenidos por Seavey et al. (2010) y los nuestros, la diferencia es de tan sólo 4 km. Es una diferencia razonable considerando que los cálculos fueron hechos con métodos diferentes; Seavey et al. (2010) realizaron sus cálculos a partir de estudios de ondas Rayleigh. Cabe mencionar que en la estación NE79, las *FRS* calculadas son de buena calidad, esta condición contribuye a que la estimación de profundidad realizada tenga un menor margen de error.
- En la estación NE81, la diferencia entre los resultados calculados por Seavey et al. (2010) y los nuestros es de 9.6 km. La calidad y cantidad de trazas de *FRS* en la estación NE81 es una de las mejores de este trabajo. Esta condición nos permite respaldar el resultado que ofrecemos en este trabajo.

### 5.3 Conclusiones

Hemos constado que la técnica de *FRS* es una buena herramienta para mapear la frontera litosfera-astenosfera, debido a sus características técnicas. Probablemente la más importante de ellas es que las trazas de *FRS* no se encuentran contaminadas por múltiples de la corteza. Los tiempos de arribo de la fase  $S_{\text{LABP}}$  cambian de acuerdo a la región mapeada:

- a) Las estaciones ubicadas en Sonora y Sinaloa (placa de Norteamérica, estaciones NE80, NE81, NE82 y NE83) en general presentan mayores tiempos de arribos que aquellas situadas en la península de Baja California. Estas estaciones muestran a la litosfera en esa zona como un gran bloque que disminuye su espesor de norte a sur.
- b) En las estaciones ubicadas en la península de Baja California (NE71, NE72, NE73, NE74, NE75, NE76, NE77, NE84, NE85 y NE79) se observa que los cambios en los tiempos de arribo se dan de oeste a este y de norte a sur. Las estaciones que se encuentran más cercanas al golfo de California presentan tiempos de arribo menores que aquellas que no lo están. En tanto que las estaciones que se encuentran al norte y centro de la península de Baja California presentan lecturas de tiempos de arribo mayores (excepto NE70) que aquellas que se encuentran al sur (NE84, NE85 y NE79).

La compleja historia tectónica de la apertura del golfo de California se encuentra muy relacionada con la separación de la península de Baja California de la placa de Norteamérica.

Además de la subducción de antiguas placas tectónicas (placa de Farallón). Esta historia se encuentra evidenciada en el adelgazamiento reportado en la corteza por Persaud et al. (2007) y Zhang et al. (2007). Tal adelgazamiento también se encuentra reflejado en los resultados de espesor de la litosfera registrados en este trabajo.

El espesor de la litosfera ( $H_2$ ) y el cociente  $\kappa_2=V_p/V_s$  pueden ser estimados con el procedimiento de apilamiento de *FRS* mostrado en el Capítulo 4. Sin embargo, aunque el método empleado para obtener las profundidades de la frontera litosfera-astenosfera da una buena aproximación, el método puede ser mejorado incorporando al procedimiento las lecturas de los arribos de la fase  $S_{\text{MohoP}}$  y los múltiples de la fase  $S_{\text{LABP}}$ . Para poder utilizar estos múltiples necesitaríamos ventanas de tiempo que incluyeran al menos 120 s antes del arribo de la onda S.

Este trabajo constituye un primer vistazo a la frontera litosfera-astenosfera de la región del golfo de California. Con el objetivo de obtener un modelo más general de la zona y continuando con nuestra línea de estudio es necesario obtener *FRS* de todas las estaciones disponibles en la zona; una vez calculadas dichas *FRS*, mostrarlas de diferentes maneras, por ejemplo en perfiles, migradas a profundidad, etc.; además de incluir eventos con distancias epicentrales en el intervalo de  $85^\circ$ - $105^\circ$  para estudiar la fase *SKS* con el propósito de mapear otras discontinuidades (por ejemplo la discontinuidad de Lehmann o las discontinuidades a 410 ó 660 km). Todo con el único fin de describir las características del golfo de California que puedan ser referidas mediante la evidencia sísmica.