

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA



Geometría de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, y su relación con la geometría de la subducción de Nazca bajo Sudamérica en el sur de Chile

Nicole Catalán Ormeño

**Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico**

Marzo de 2013

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**Geometría de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, y su relación con la geometría de la
subducción de Nazca bajo Sudamérica en el sur de Chile**

Nicole Catalán Ormeño

**Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico**

Profesor Guía:

Dr. Klaus Bataille

Comisión:

Dr. Matthew Miller, Dr. Andrés Tassara



Marzo de 2013

Dedicado a mi familia

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a mi familia, a mis padres y hermanos, ya que todo lo que soy lo debo a su esfuerzo, amor y constante apoyo.

Agradezco a mi profesor guía, el profesor Klaus Bataille, por su dirección y ayuda en este trabajo. Agradezco sinceramente la confianza que ha puesto en mí a lo largo de este proceso.

Agradezco a los profesores Matt Miller y Andrés Tassara por aceptar ser parte de esta comisión evaluadora.

Al proyecto FONDECYT n°1101034 “Convergence Partitioning at the Southern Andes (CONPARSA): Numerical modeling of crustal deformation”.

A quienes conforman el Departamento de Geofísica, por su siempre buena disposición a ayudarme. A quienes han sido mis compañeros durante estos 5 años, especialmente “la Naty”.

A mi amiga Paulina por acompañarme siempre, y brindarme todas esas conversaciones interminables.

Agradezco finalmente, a todas las personas que con un consejo o una opinión, me impulsaron a tomar las decisiones que me han traído hasta aquí.

RESUMEN

La convergencia oblicua entre las placas de Nazca y Sudamérica en los Andes del Sur, se particiona en una componente normal y una componente paralela a la fosa, esta última, acomodada a lo largo de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO), estructura de movimiento transpresional dextral, ubicada, aproximadamente, entre 39°-47°S. Se presenta a continuación, un análisis de esfuerzos en el sur de Chile (37°-46°S), que permite definir la geometría de la ZFLO y su relación con la geometría de la subducción en la región.

Para el desarrollo de este estudio, se calcularon, inicialmente, los esfuerzos en un semi-espacio homogéneo, debido a una o más fallas rectangulares finitas con componentes de deslizamiento en dirección normal y paralela al eje de la fosa. El número de fallas utilizadas, dependió del modelo considerado para representar la deformación intersísmica en la zona: Back slip model (BSM) o Elastic subducting plate model (ESPM), donde este último, a diferencia del primero, le atribuye un valor no nulo al espesor de la placa subductante.

Luego, la geometría de la ZFLO se definió en base a la orientación del plano en que el esfuerzo de cizalle en dirección paralelo a la fosa, es máximo.

Conociendo los valores de cizalle obtenidos a lo largo de las distintas ZFLO calculadas, las que se considera, comienzan a distintas profundidades, en la zona de contacto entre las placas Nazca y Sudamérica, se determinó que el máximo valor de este se alcanza en la ZFLO cuya profundidad de inicio coincide con la profundidad de la zona de ruptura, esto implica que en superficie, la distancia entre la ZFLO y la fosa sea de ~110 km. Las discrepancias entre este valor y la distancia observada entre la fosa Perú-Chile y la ZFLO (>250 km.), sugieren que la geometría de esta última no está controlada por la geometría de la subducción en la región, sino que más bien por otros factores, tales como, el régimen termal en la zona. Esto, no impide que ciertos parámetros que caracterizan la zona de subducción afecten la geometría de la ZFLO. Los resultados obtenidos muestran que, cambios en el ángulo de inclinación, la profundidad de la zona de ruptura y profundidad que alcanza el slab (ESPM) provocan diferencias en la geometría de la ZFLO, así como también el uso de distintos modelos de deformación.

Finalmente, al considerar una distancia entre la fosa y la ZFLO más cercana a lo observado en la zona de estudio, se obtuvo que la geometría que presenta la ZFLO en esas condiciones resulta ser, vertical en superficie, y más bien inclinada en profundidad, lo cual difiere de la actual forma de representar la ZFLO, como una estructura vertical desde la superficie hasta la zona de contacto entre las placas de Nazca y Sudamérica.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	01
1.1. Zona de Estudio	02
1.2. Objetivos	02
1.2.1. Objetivo General	02
1.2.2. Objetivos Específicos	02
1.3. Hipótesis	03
2. Metodología	05
2.1. Modelo de una falla rectangular finita con componentes dip-slip y strike-slip	05
2.2. Generación de modelos de deformación intersísmica	07
2.3. Cálculo de la trayectoria de la ZFLO	09
2.3.1. Criterio de Coulomb	09
2.3.2. Criterio de Coulomb sin considerar el esfuerzo normal	09
2.3.3. Criterio de Coulomb considerando el esfuerzo normal	10
3. Resultados	12
3.1. Ángulo de deslizamiento	12
3.2. Ángulo de inclinación	13
3.3. Profundidad de la zona de ruptura	13
3.4. Profundidad que alcanza el slab	14
3.5. Modelos de deformación	14
3.6. Geometría de la ZFLO	22
3.7. Esfuerzo Normal	29
4. Discusión	31
5. Conclusión	34
6. Referencias	35

ÍNDICE FIGURAS

1.1.	Mapa de la zona de estudio. Ubicación de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui	04
2.1.	Geometría de 3 diferentes fuentes rectangulares finitas	07
2.2.	Perfil en profundidad de los distintos modelos de deformación intersísmica: BSM y ESPM	08
2.3.	Cálculo de la trayectoria de la ZFLO	11
3.1.1.	Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar el ángulo de deslizamiento en una zona de subducción modelada según BSM	15
3.1.2.	Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar el ángulo de deslizamiento en una zona de subducción modelada según ESPM	16
3.2.1.	Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar el ángulo de inclinación en una zona de subducción modelada según BSM	17
3.2.2.	Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar el ángulo de inclinación en una zona de subducción modelada según ESPM	18
3.3.1.	Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar la profundidad de la zona de ruptura en una zona de subducción modelada según BSM	19
3.3.2.	Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar la profundidad de la zona de ruptura en una zona de subducción modelada según ESPM	20
3.4.1.	Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar la profundidad que alcanza el slab en una zona de subducción modelada según ESPM	21
3.6.1.	Variación de S a lo largo de la ZFLO. Modelo BSM. Geometría de la ZFLO calculada sin considera el esfuerzo normal	23
3.6.2.	Variación de S a lo largo de la ZFLO. Modelo ESPM. Geometría de la ZFLO calculada sin considera el esfuerzo normal	24
3.6.3.	Geometría de la ZFLO, en base a su distancia a la Fosa Perú-Chile	26
3.6.4.	Ubicación en superficie de la ZFLO a lo largo de la Fosa Perú-Chile	28
3.7.1.	Geometrías calculadas para la ZFLO, considerando el esfuerzo normal distinto de cero, para los modelos de deformación BSM y ESPM	30
5.1.	Perfil TIPTEC a 38.2°S: Reflector posiblemente asociado al arco volcánico	32

1. INTRODUCCIÓN

En los Andes del Sur, la subducción de la placa de Nazca bajo Sudamérica es oblicua con respecto al límite entre ambas placas, la fosa Perú-Chile. La tasa de convergencia, calculada en la latitud 40°S, es de 61.8 mm/año, en dirección N80.6°E [Kendrick et al. (2003)].

La convergencia oblicua entre las placas, se particiona en una componente normal a la fosa, de tipo dip-slip, y una componente paralela a la fosa, de tipo strike-slip. Considerando que el azimut de la fosa Perú-Chile es alrededor de 7°E en la zona (Figura 1.1), el ángulo de oblicuidad, ángulo entre el vector de convergencia de las placas y la normal a la fosa, puede estimarse en 18°. La estructura que evidencia la partición de la convergencia en la región, acomodando la componente paralela a la fosa, es la denominada Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (ZFLO).

La ZFLO corresponde a una zona de cizalle, activada como una estructura transpresional dextral desde, por lo menos, los últimos 6 Ma. [Cembrano et. al. (1996); Cembrano et. al. (2002)]. Se extiende desde los ~39°S, cerca de la localidad de Liquiñe, hasta el Istmo de Ofqui (~47°S), mostrándose alineada a los volcanes pertenecientes a la Zona Volcánica Sur (ZVS), Figura 1.1.

En cuanto a cómo es la geometría de la ZFLO en profundidad, no se han encontrado estudios capaces de dilucidar esta interrogante, y actualmente la ZFLO es modelada como una estructura vertical, ubicada bajo el arco volcánico. En este trabajo, se pretende contribuir a dar respuesta a esta inquietud, determinando la geometría de la ZFLO en profundidad, y su relación con las características de la subducción de Nazca bajo Sudamérica en el sur de Chile.

De la actividad sísmica observada en la ZFLO, destaca el terremoto de Aysén, $M_w=6.2$, ocurrido el 21 de abril de 2007 (45.48°S, 72.95°W), y que correspondió al último de un conjunto de sismos ocurridos en la zona entre los meses de enero y abril de ese año. Señalar también, que se ha registrado actividad volcánica reciente en la ZVS, como por ejemplo, la erupción de los volcanes Llaima y Chaitén, el año 2008, y Puyehue-Cordón Caulle, el año 2011. Lo anterior, muestra la importancia de realizar estudios que proporcionen información respecto de las características de la zona, permitiendo entender su comportamiento, esto ya que, queda en evidencia su capacidad de generar eventos que impactan directamente en la población.

1.1. Zona de estudio

La Figura 1.1 muestra la zona de estudio, que comprende el sur de Chile, desde los 37°S hasta la latitud aproximada del punto triple, 46°S.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar la geometría de la ZFLO, y especificar la influencia que tiene sobre ella la geometría de la subducción de Nazca bajo Sudamérica en el sur de Chile, .

1.2.2. Objetivos específicos

- Calcular los esfuerzos en la zona de estudio, generados por una subducción oblicua.
- Determinar la geometría de la ZFLO, en base a la orientación del plano en que el esfuerzo de cizalle, en dirección paralelo a la fosa, es máximo.
- Evaluar el efecto que tienen sobre la geometría de la ZFLO los siguientes parámetros, propios de la zona de subducción: Ángulo de deslizamiento, ángulo de inclinación, profundidad de la zona de ruptura y profundidad que alcanza el slab.
- Comparar la geometría de la ZFLO obtenida con distintos modelos de deformación, para el periodo intersísmico: Back slip model (BSM) [Savage (1983)] y Elastic subducting plate model (ESPM) [Kanda y Simons (2010)].
- Contrastar los resultados obtenidos con las observaciones existentes, respecto a la ubicación de la ZFLO en la zona de estudio.

- Analizar las diferencias que se generan en la geometría de la ZFLO cuando se incluye el esfuerzo normal en los cálculos (Criterio de Coulomb).

1.3. Hipótesis

La geometría de la ZFLO está determinada por la geometría de la subducción de Nazca bajo Sudamérica en el sur de Chile.

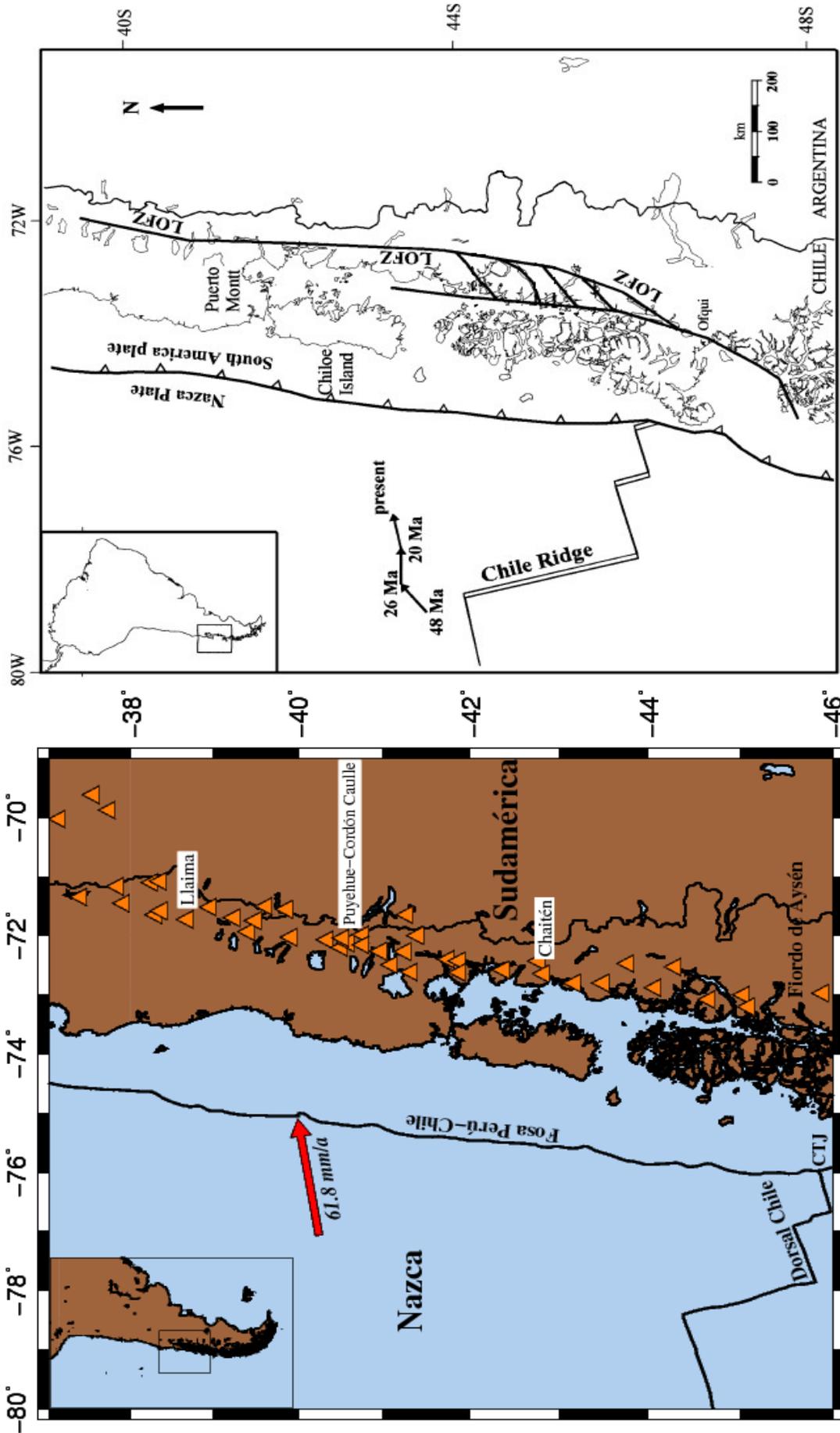


Figura 1.1. Izquierda: Mapa de la zona de estudio. La flecha roja representa dirección y velocidad de convergencia de las placas Nazca y Sudamérica [Kendrick et al. (2003)]. Se muestra la ubicación del punto triple (CTJ). Se muestra la ubicación de las placas Nazca, Sudamericana y Antártica. En triángulos anaranjados, los volcanes de la Zona Volcánica Sur. Derecha: Ubicación de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui (LOFZ). La serie de flechas corresponde a los vectores de convergencia de las placas Nazca y Sudamérica para los últimos 48 Ma. [Cembrano et. al. (2002). Figura 1. Modificada]

2. METODOLOGÍA

2.1. Modelo de una falla rectangular finita con componentes dip-slip y strike-slip

Utilizando las expresiones analíticas descritas en Okada (1992), se calcularon los desplazamientos y deformación interna en un semi-espacio, causados por una falla rectangular finita de tipo dip-slip y de tipo strike-slip. Luego, se calcularon las matrices de esfuerzo asociadas a cada tipo de falla, las cuales finalmente se sumaron para obtener en cada punto del espacio, el esfuerzo producido por una falla rectangular finita con componentes de tipo dip-slip y strike-slip, describiendo de esta forma, el fenómeno de partición del desplazamiento.

Lo anterior, se llevó a cabo en los siguientes pasos:

- Se implementaron en Matlab las expresiones analíticas descritas en Okada (1992) para el cálculo de desplazamiento y deformación interna en un semi-espacio, generado por una falla rectangular finita de tipo dip-slip y de tipo strike-slip. Cada falla fue definida por los siguientes parámetros: Largo, ancho, profundidad, ángulo de inclinación y deslizamiento. La Figura 2.1, muestra la geometría de ambos tipos de falla.

Dado que lo que se busca representar es una falla, la cual posee componentes dip-slip y strike-slip, los parámetros de largo, ancho, profundidad y ángulo de inclinación, fueron considerados iguales para ambos tipos de falla. El deslizamiento, en cambio, se calculó para cada falla, de la siguiente manera:

$$\text{Deslizamiento falla strike-slip} \quad : U_1 = U \cos(\lambda)$$

$$\text{Deslizamiento falla dip-slip} \quad : U_2 = U \sin(\lambda)$$

Donde U es el valor del deslizamiento, en nuestro caso, 1 m. y λ corresponde al ángulo de deslizamiento.

- Una vez encontrados, para ambos tipos de falla, los desplazamientos asociados, y sus derivadas, se calculó para cada una de ellas, la matriz de deformación, de la forma:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} + \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) \quad ; \quad i,j=x,y,z \quad (1)$$

Donde u representa el desplazamiento. La dirección de los ejes coordenados (x,y,z) se esquematiza en la Figura 2.1.

- Luego, se calculó la matriz de esfuerzo asociada a cada tipo de falla, para esto se utilizó la ley de Hooke, que permite relacionar las matrices de deformación y esfuerzo, mediante la expresión:

$$\tau_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2 \mu \varepsilon_{ij} \quad ; \quad i,j=x,y,z \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

Donde, $\varepsilon_{kk} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$.

En este trabajo, se calculó τ/λ , para $\lambda=\mu$, los parámetros de Lamé (no confundir λ con el ángulo de deslizamiento, que utiliza el mismo símbolo), por lo tanto, cuando en adelante nos refiramos a la matriz de esfuerzo, esta corresponderá al valor de τ/λ :

$$\frac{\tau_{ij}}{\lambda} = \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2 \varepsilon_{ij} \quad ; \quad i,j = x,y,z \quad (3)$$

- Finalmente, las matrices de esfuerzo encontradas para cada tipo de falla, se sumaron, de manera de poder calcular en cada punto del espacio, el esfuerzo generado por una falla con componentes de tipo dip-slip y strike-slip, representando así, la partición del desplazamiento.

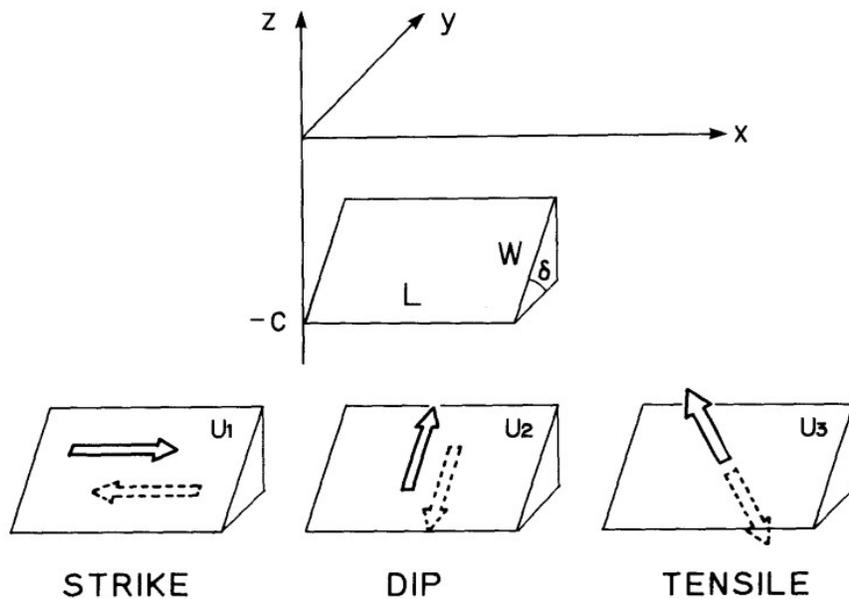


Figura 2.1: Geometría de 3 diferentes fuentes rectangulares finitas, descritas por: Largo (L), ancho (W), ángulo de inclinación (δ) y deslizamiento (U_1, U_2, U_3) [Okada (1992), Fig. 3]. En este estudio solo se utilizan fallas tipo Strike y Dip.

2.2. Generación de modelos de deformación intersísmica

Uno de nuestros objetivos, es comparar los modelos de deformación BSM y ESPM, este último, a diferencia del primero, le atribuye un espesor a la placa subductante. Luego, cuando el espesor de dicha placa es 0, ambos modelos coinciden.

En el caso de BSM, la zona de subducción se representó mediante una falla rectangular finita de profundidad igual a la profundidad de la zona de ruptura, con dirección del deslizamiento correspondiente a una falla de tipo oblicua normal-sinestral, lo que representa el periodo intersísmico en la zona, como se muestra en la Figura 2.2.A.

En tanto, el ESPM requirió para su implementación modelar 3 fallas rectangulares finitas, las que permiten representar la subducción de Nazca bajo Sudamérica, atribuyéndole a la primera cierto espesor. Dichas fallas se dispusieron de la forma que presenta la Figura 2.2.B, donde se observan además las direcciones de deslizamiento que debe poseer cada una de ellas para representar el fenómeno de la partición del desplazamiento en la zona. Vale decir que en este modelo de deformación intersísmica, la zona de ruptura permanece bloqueada. Luego, la matriz de esfuerzo asociada a ESPM corresponde a la suma de las matrices de esfuerzo de las 3 fallas descritas anteriormente.

Destacar que se realizó un cambio de coordenadas desde el sistema (x,y,z) mostrado en la Figura 2.1, al sistema (x',y',z') , Figura 2.2, el cual, cuando la fosa tiene un azimut de 0° , coincide con las direcciones norte, este y profundidad, respectivamente.

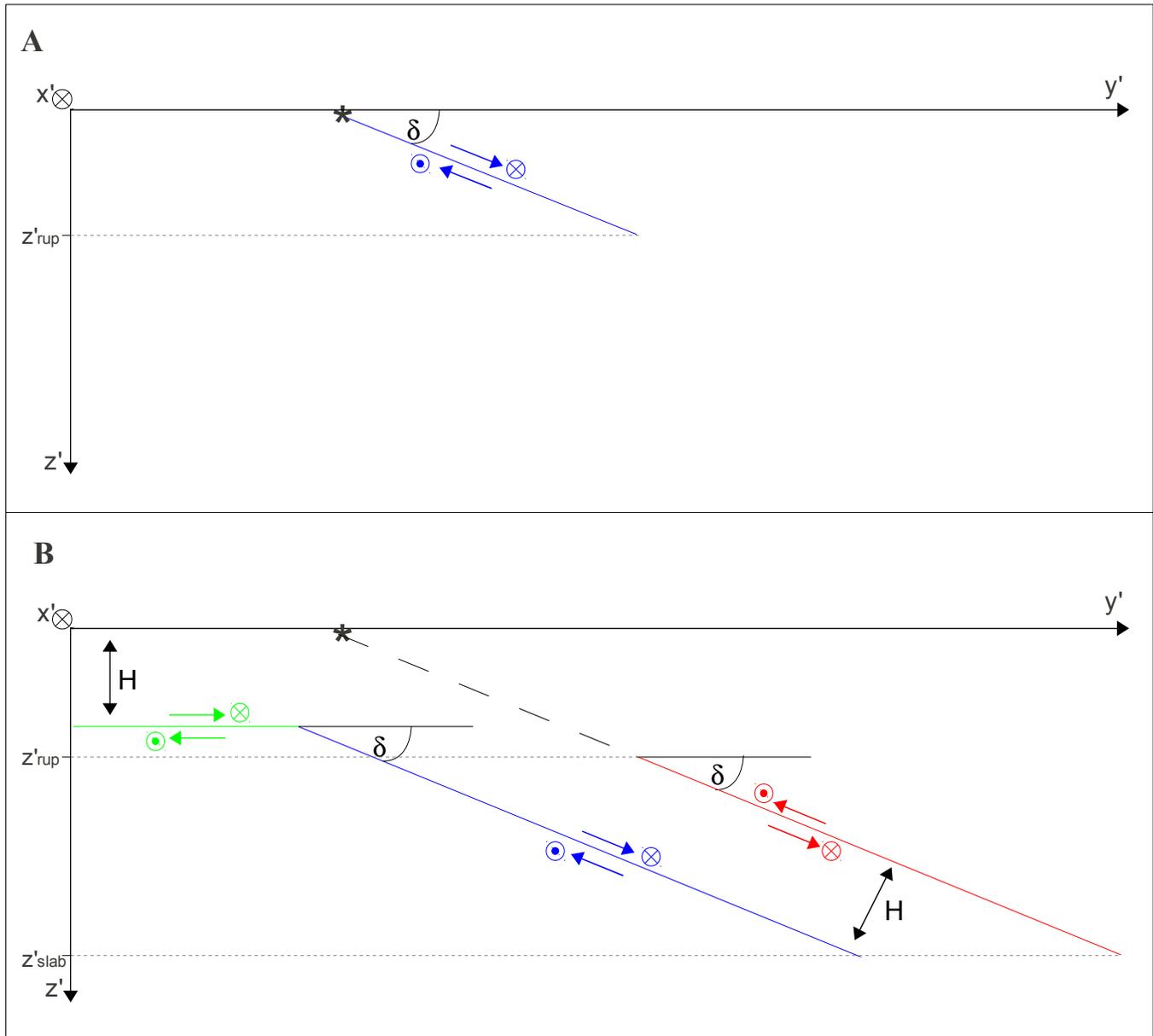


Figura 2.2. Perfil en profundidad de los modelos de deformación intersísmica. A: BSM, consta de una falla rectangular finita, con componentes de deslizamiento de tipo dip y strike-slip. B: ESPM, la placa subductada, de espesor H , se construye utilizando 3 fallas rectangulares finitas (en colores rojo, azul y verde), cada una con las direcciones de deslizamiento indicadas. En línea punteada la zona de ruptura, que permanece bloqueada. z'_{rup} y z'_{slab} corresponden, respectivamente, a la profundidad que alcanza la zona de ruptura y el slab. (*) representa la ubicación de la fosa y δ es el ángulo de inclinación (ángulo entre la superficie y el plano de falla). Cuando el valor de H es 0, ambos modelos de deformación coinciden.

2.3. Cálculo de la trayectoria de la ZFLO

2.3.1. Criterio de Coulomb

El criterio de Coulomb postula que una roca romperá por un plano, si en dicho plano el esfuerzo de cizalle supera la resistencia cohesiva de la roca más la fuerza de rozamiento que se opone al deslizamiento de dos bloques de roca, a ambos lados del plano.

El criterio de Coulomb se escribe:

$$|\tau| = S + \mu \sigma \quad (4)$$

Donde τ = Esfuerzo de cizalle sobre el plano

σ = Esfuerzo normal sobre el plano

S = Resistencia cohesiva

μ = Coeficiente de fricción

La trayectoria de la ZFLO se calculó en base a lo anterior, considerando que la roca romperá por aquel plano donde S sea máximo.

$$S = |\tau| - \mu \sigma \quad (5)$$

2.3.2. Criterio de Coulomb sin considerar el esfuerzo normal

En primera instancia, se consideró el caso en que el valor del esfuerzo normal sobre el plano es cero, esto significa que S, descrito en la ecuación 6, corresponderá al esfuerzo de cizalle necesario para romper una roca por dicho plano.

$$S = |\tau| \quad (6)$$

Lo que hicimos entonces, fue tomar un punto del espacio, específicamente posicionados en la zona de contacto entre las placas de Nazca y Sudamérica, y buscar el plano en que S, valor absoluto del cizalle en dirección paralelo a la fosa, es máximo. El cizalle en dirección paralelo a la fosa se calcula:

$$\tau_{x'n} = \tau_{x'y'} n_y + \tau_{x'z'} n_z \quad (7)$$

Con \mathbf{n} el vector normal al plano. Luego (7) puede escribirse de la forma,

$$\tau_{x'n} = \tau_{x'y'} \text{sen}(\theta) + \tau_{x'z'} \text{cos}(\theta) \quad (8)$$

Donde θ representa el ángulo entre la superficie y el plano de ruptura.

Se calcularon entonces, los distintos valores de $S(\theta) = |\tau_{x'n}(\theta)|$, para $\theta = [0:180]^\circ$ y, considerando que la roca romperá por aquel plano en que S sea máximo, se determinó el ángulo θ que hace máximo el valor de S, definiéndose así la orientación del plano de ruptura. Esta operación se repitió hasta definir la trayectoria de la ZFLO, calculándose cada cierta distancia, definida previamente, un nuevo plano de ruptura, procedimiento que se ejemplifica en la Figura 2.3.

2.3.2. Criterio de Coulomb considerando el esfuerzo normal

Con el fin de evaluar los efectos que tiene considerar el esfuerzo normal en el cálculo de la trayectoria de la ZFLO, esta se determinó siguiendo el procedimiento anterior, pero con la diferencia de que esta vez, el valor de S se calculó resolviendo la ecuación (5) para $\sigma \neq 0$.

De esta forma, la ecuación (5) se reescribe:

$$S = |\tau_{x'y'} n_y + \tau_{x'z'} n_z| - \mu(\tau_{y'y'} n_y^2 + 2 \tau_{y'z'} n_y n_z + \tau_{z'z'} n_z^2) \quad (9)$$

$$S = |\tau_{x'y'} \text{sen}(\theta) + \tau_{x'z'} \text{cos}(\theta)| - \mu(\tau_{y'y'} \text{sen}^2(\theta) + 2 \tau_{y'z'} \text{sen}(\theta) \text{cos}(\theta) + \tau_{z'z'} \text{cos}^2(\theta)) \quad (10)$$

Con \mathbf{n} el vector normal al plano, θ el ángulo entre la superficie y el plano de ruptura y $\mu=0.85$.

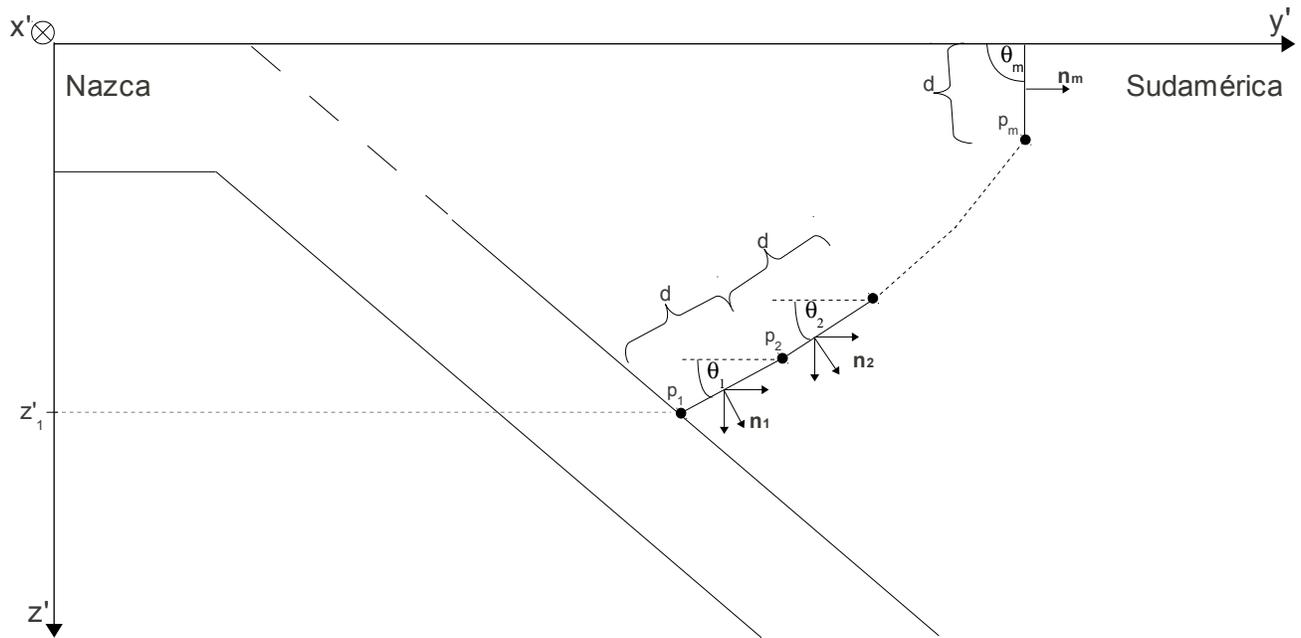


Figura 2.3: Cálculo de la trayectoria de la ZFLO. Se considera que el inicio de la ruptura ocurre en la zona de contacto entre las placas Nazca y Sudamérica, a una cierta profundidad z'_1 . En este punto, p_1 , se calcula la orientación del plano en que S es máximo (Criterio de Coulomb) y luego, en base al ángulo θ_1 encontrado, y la conocida distancia d , se determina la ubicación del siguiente punto p_2 , donde se busca nuevamente la orientación del plano en que S es máximo, y así sucesivamente hasta llegar a la superficie, definiéndose así la trayectoria de la ZFLO. n_i corresponde al vector normal al plano de orientación θ_i . En la figura se muestra el procedimiento considerando ESPM, pero este es indistinto para el caso en que se utiliza BSM.

3. RESULTADOS

Para representar la subducción de Nazca bajo Sudamérica, se modeló una falla de largo 1000 km. El ángulo de deslizamiento, ángulo de inclinación, profundidad de la zona de ruptura y profundidad que alcanza el slab, tomaron diferentes valores durante los cálculos, para poder definir así, el efecto que cada uno de estos parámetros tiene sobre la geometría de la ZFLO.

Se utilizaron en los análisis, los modelos de deformación BSM y ESPM, con el fin de determinar las diferencias que aparecen en la geometría de la ZFLO al usar cada uno de ellos. En el caso de ESPM, se consideró un valor para el espesor de la placa subductante $H=30$ km.

La geometría de la ZFLO se determinó considerando que la ruptura de esta se inicia en la zona de contacto entre las placas Nazca y Sudamérica (Figura 2.3), luego, para cada zona de subducción modelada, se calcularon distintas ZFLO, cada una de las cuales se inicia a diferentes profundidades sobre la zona de contacto, profundidades entre 10 y 100 km, a intervalos de 10 km.

3.1. Ángulo de deslizamiento

Se modelaron zonas de subducción con diferentes ángulos de deslizamiento, que representasen la subducción oblicua de Nazca bajo Sudamérica. Los ángulos de deslizamiento utilizados fueron $\lambda=285^\circ$, 288° , 291° y 294° , que corresponden a una falla oblicua normal-sinestral con ángulo de oblicuidad igual a 15° , 18° , 21° y 24° , respectivamente, lo que representa el periodo intersísmico en la zona.

En las Figuras 3.1.1 y 3.1.2, se presentan las ZFLO obtenidas con los distintos ángulos de deslizamiento, para el caso en que se utiliza BSM y ESPM, respectivamente. A partir de estas figuras, se puede establecer que la geometría de la ZFLO no se ve alterada cuando el ángulo de deslizamiento es modificado.

3.2. Ángulo de inclinación

Ángulos de inclinación $\delta=15^\circ$, 20° , 25° y 30° en la zona de subducción, se utilizaron para evaluar el efecto de este parámetro sobre la geometría de la ZFLO. Los resultados, considerando BSM y ESPM, se presentan en las Figuras 3.2.1 y 3.2.2, respectivamente. En ellas se advierte que las distintas ZFLO sufren un corrimiento hacia la izquierda en su posición, a medida que aumenta el ángulo de inclinación. Se observa por ejemplo que, cuando δ varía 5° , la ubicación en superficie de la ZFLO se modifica en 15 a 40 km., en el caso de la ZFLO que se inicia a 40 km. de profundidad (profundidad zona de ruptura), mientras que, en la ZFLO que se inicia a 100 km. de profundidad, este valor varía entre 25-85 km.

3.3. Profundidad de la zona de ruptura

El efecto que provoca la variación en la profundidad de la zona de ruptura, z'_{rup} , sobre la geometría de la ZFLO, utilizando BSM y ESPM, se muestra en las Figuras 3.3.1 y 3.3.2, respectivamente. Los valores utilizados para este parámetro fueron, $z'_{rup}=20, 30, 40$ y 50 km., obteniendo que, las ZFLO que se inician precisamente en la profundidad de la zona de ruptura, resultan ser siempre verticales. Luego, aquellas ZFLO que comienzan a profundidades mayores que la máxima profundidad considerada para la zona de ruptura, se alejan de la fosa cuando la profundidad de la zona de ruptura aumenta. Por ejemplo, si se observa la ZFLO que se inicia a la profundidad de 60 km., vemos que esta se aleja alrededor de 10 km. de la fosa, cada vez que la profundidad de la zona de ruptura aumenta en 10 km.

3.4. Profundidad que alcanza el slab

La Figura 3.4.1, muestra las distintas geometrías obtenidas para la ZFLO, al utilizar valores para la profundidad del slab $z'_{\text{slab}}=200, 300, 400$ y 500 km. En esta ocasión, solo se presentan los resultados obtenidos al utilizar el ESPM, esto porque en el BSM el valor de este parámetro es irrelevante, pues solo considera una falla de profundidad igual a la profundidad de la zona de ruptura (Figura 2.2.A). Observando la Figura 3.4.1, vemos que aquellas ZFLO que se ubican en la zona de ruptura, no ven alterada su geometría cuando z'_{slab} varía, en cambio, las ZFLO que se ubican fuera ella, se alejan de la fosa a medida que el slab alcanza mayores profundidades. Diferencias menores a 3 km. de distancia a la fosa en superficie, se encontraron al variar en hasta 200 km. la profundidad que alcanza el slab, para el caso en que la ruptura se inicia a 50 km. de profundidad. Este valor alcanzó los 10 km. de distancia a la fosa, cuando la ZFLO se inicia a 100 km. de profundidad.

3.5. Modelos de deformación

Las Figuras 3.1.1 - 3.3.2 muestran distintos casos en que se consideró BSM y ESPM en los cálculos de la geometría de la ZFLO. Si centramos la atención en las diferencias que se presentan entre ambos modelos de deformación, cuando las características de la zona de subducción permanecen constantes, podemos decir que, en el caso de aquellas ZFLO que se ubican en la zona de ruptura, su geometría no cambia al utilizar BSM o ESPM. Luego, los modelos solo generan diferencias en la geometría de las ZFLO que se inician a profundidades mayores a la profundidad de la zona de ruptura. Las imágenes muestran que, por ejemplo, para el caso en que el ángulo de inclinación es 20° , el uso de uno u otro modelo de deformación prácticamente no afecta la geometría de las ZFLO encontradas, distinto es el caso en que el ángulo de inclinación es 15° , ya que aquí las ZFLO aparecen ubicadas más hacia la izquierda cuando se utiliza ESPM, que cuando se considera BSM, todo lo contrario ocurre para los ángulos de inclinación mayores que 20° . (Figuras 3.2.1 y 3.2.2)

En el caso en que se varió la profundidad de la zona de ruptura (Figuras 3.3.1 y 3.3.2), los resultados fueron ZFLO ubicadas más a la izquierda, lo que implica que su posición en superficie aparece más cercana a la fosa, en la medida que se consideraba ESPM en los cálculos por sobre BSM, principalmente en aquellos casos en que la profundidad de la zona de ruptura es menor.

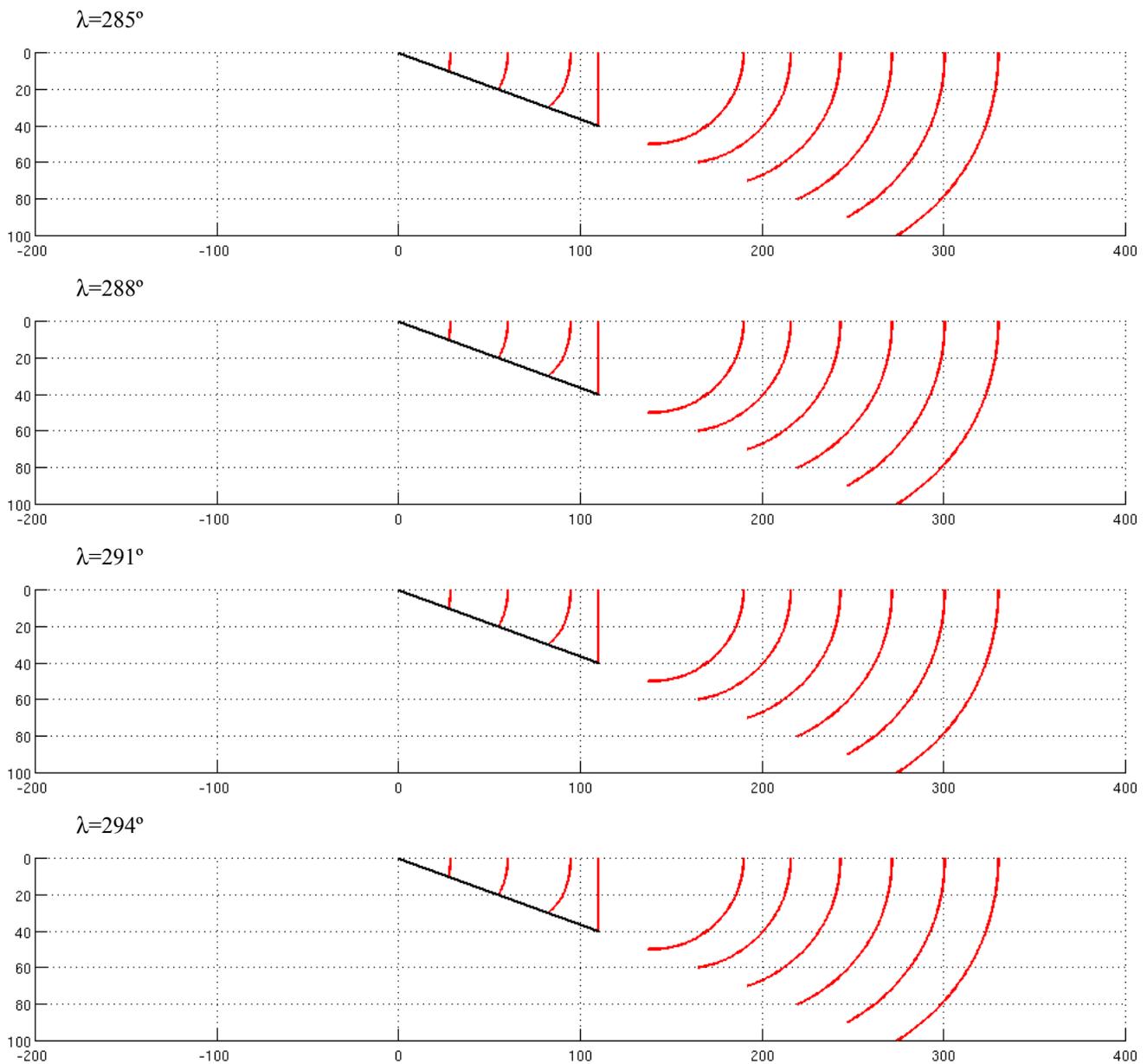


Figura 3.1.1: Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar el ángulo de deslizamiento en una zona de subducción modelada según BSM.

Perfiles calculados en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.). El eje horizontal corresponde al eje y' : Distancia a la fosa, en dirección perpendicular a la misma (km) y el eje vertical z' , es profundidad (km). Se presentan los resultados obtenidos para 4 valores diferentes del ángulo de deslizamiento λ , especificados en el extremo superior izquierdo de cada imagen. Las otras características de la zona de subducción permanecen constantes: $\delta=20^\circ$ y $z'_{rup}=40$ km. La zona de subducción y las distintas ZFLO calculadas en cada caso, aparecen graficadas en color negro y rojo, respectivamente. Se observa que, variar el ángulo de deslizamiento, no modifica la geometría de las distintas ZFLO.

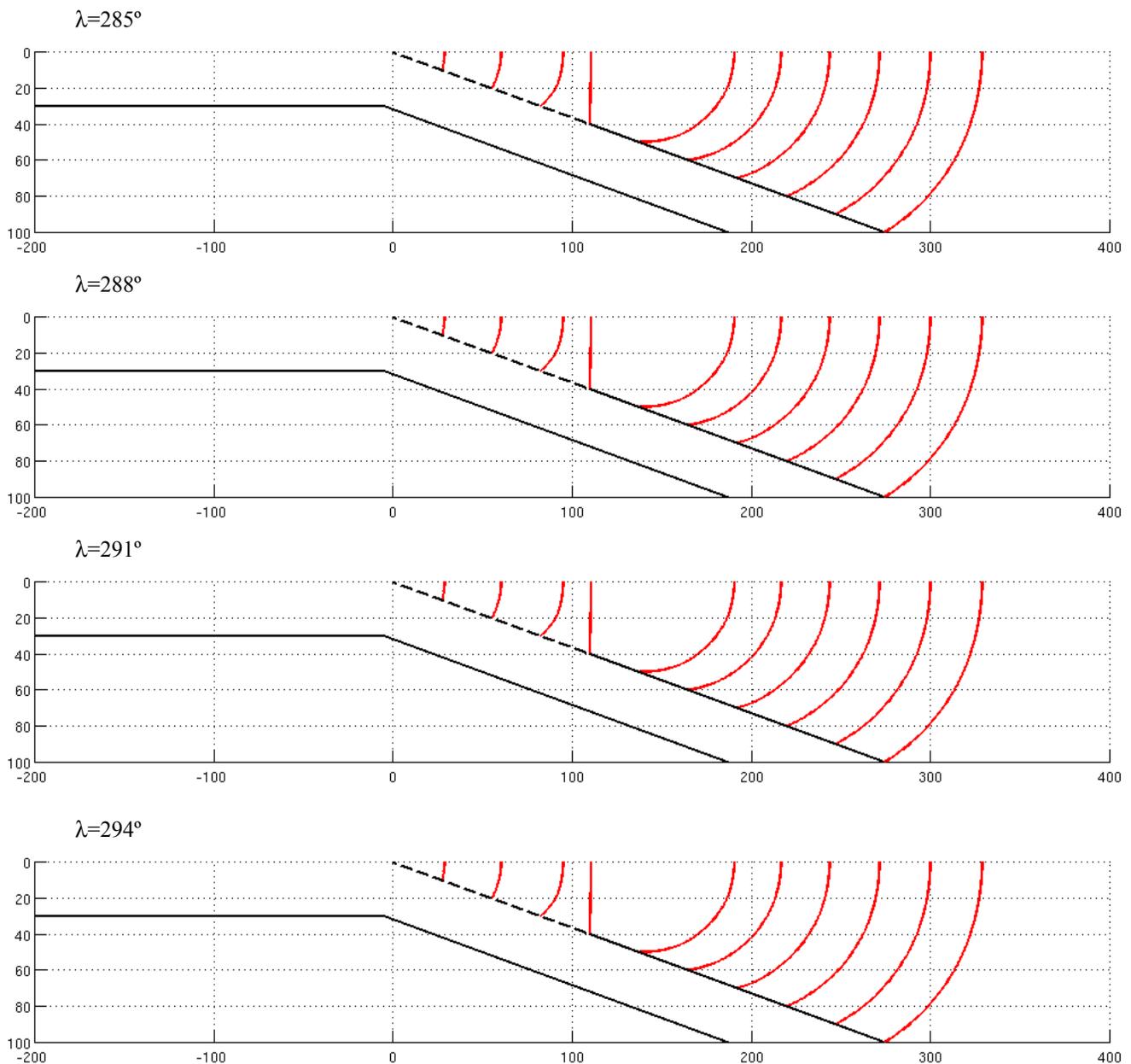


Figura 3.1.2: Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar el ángulo de deslizamiento en una zona de subducción modelada según ESPM ($H=30$ km.).

Perfiles calculados en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.). El eje horizontal corresponde al eje y' : Distancia a la fosa, en dirección perpendicular a la misma (km) y el eje vertical z' , es profundidad (km). Se presentan los resultados obtenidos para 4 valores diferentes del ángulo de deslizamiento λ , especificados en el extremo superior izquierdo de cada imagen. Las otras características de la zona de subducción permanecen constantes: $\delta=20^\circ$, $z'_{rup}=40$ km. y $z'_{slab}=400$ km. La zona de subducción y las distintas ZFLO calculadas en cada caso, aparecen graficadas en color negro y rojo, respectivamente.

Se observa que, variar el ángulo de deslizamiento, no modifica la geometría de las distintas ZFLO.

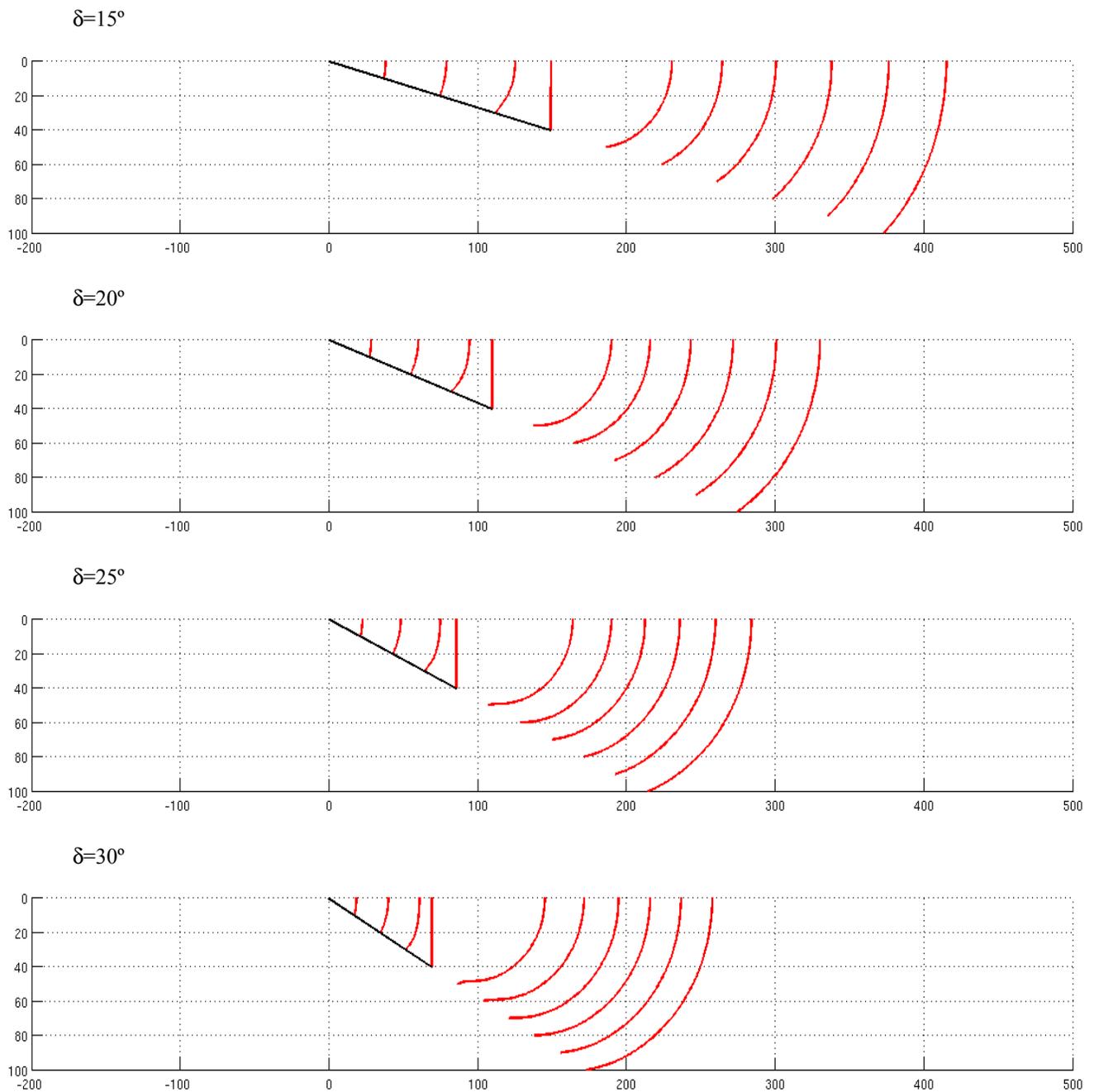


Figura 3.2.1: Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar el ángulo de inclinación en una zona de subducción modelada según BSM.

Perfiles calculados en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.). El eje horizontal corresponde al eje y' : Distancia a la fosa, en dirección perpendicular a la misma (km) y el eje vertical z' , es profundidad (km). Se presentan los resultados obtenidos para 4 valores diferentes del ángulo de inclinación δ , especificados en el extremo superior izquierdo de cada imagen. Las otras características de la zona de subducción permanecen constantes: $\lambda=288^\circ$ y $z'_{rup}=40$ km. La zona de subducción y las distintas ZFLO calculadas en cada caso, aparecen graficadas en color negro y rojo, respectivamente. Se observa que, a medida que aumenta el ángulo de inclinación, las distintas ZFLO se ubican más hacia la izquierda, es decir, más cerca de la fosa.

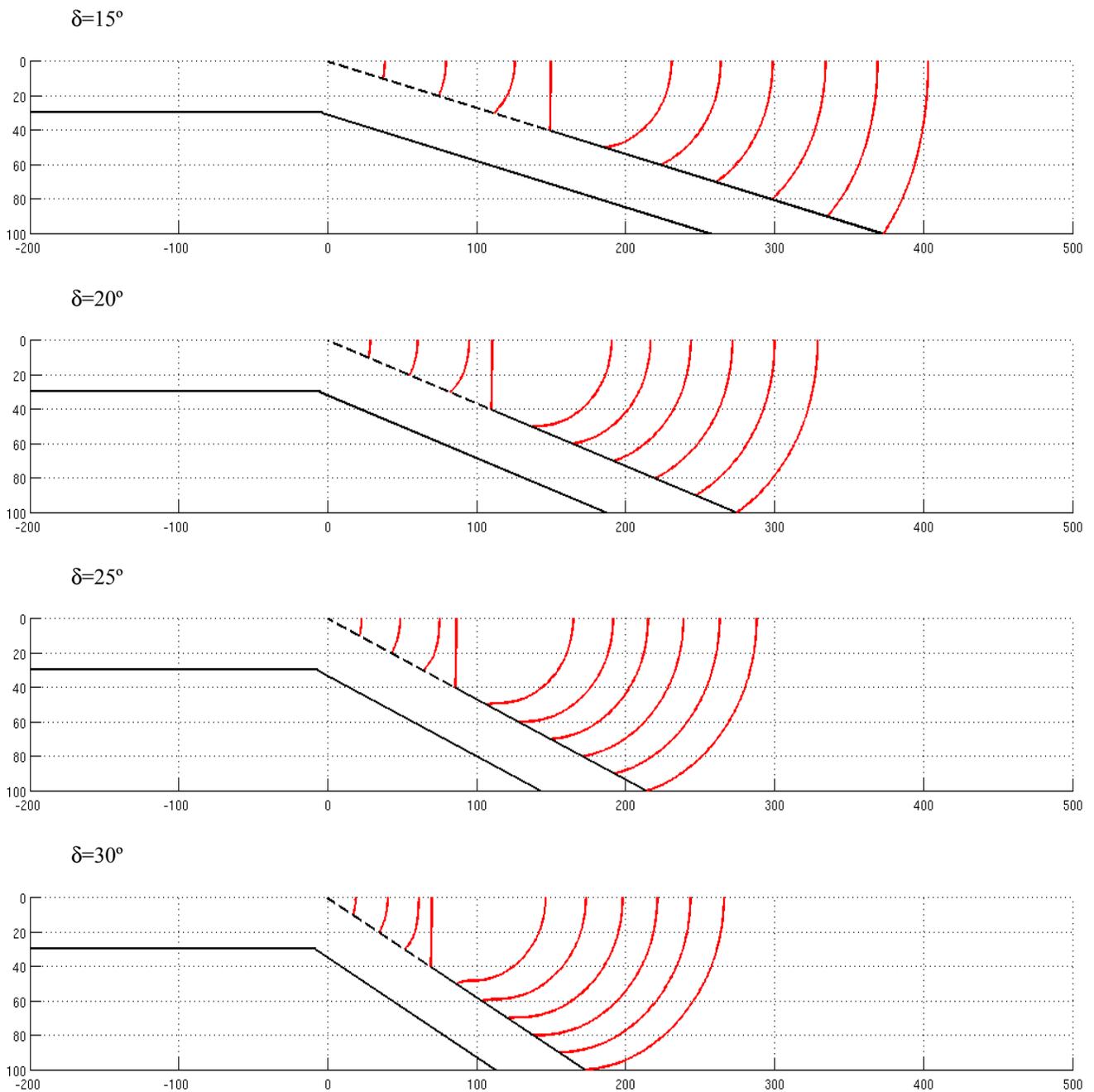


Figura 3.2.2: Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar el ángulo de inclinación en una zona de subducción modelada según ESPM ($H=30$ km.).

Perfiles calculados en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.). El eje horizontal corresponde al eje y' : Distancia a la fosa, en dirección perpendicular a la misma (km) y el eje vertical z' , es profundidad (km). Se presentan los resultados obtenidos para 4 valores diferentes del ángulo de inclinación δ , especificados en el extremo superior izquierdo de cada imagen. Las otras características de la zona de subducción permanecen constantes: $\lambda=288^\circ$, $z'_{rup}=40$ km. y $z'_{slab}=400$ km. La zona de subducción y las distintas ZFLO calculadas en cada caso, aparecen graficadas en color negro y rojo, respectivamente.

Se observa que, a medida que aumenta el ángulo de inclinación, las distintas ZFLO se ubican más hacia la izquierda, es decir, más cerca de la fosa.

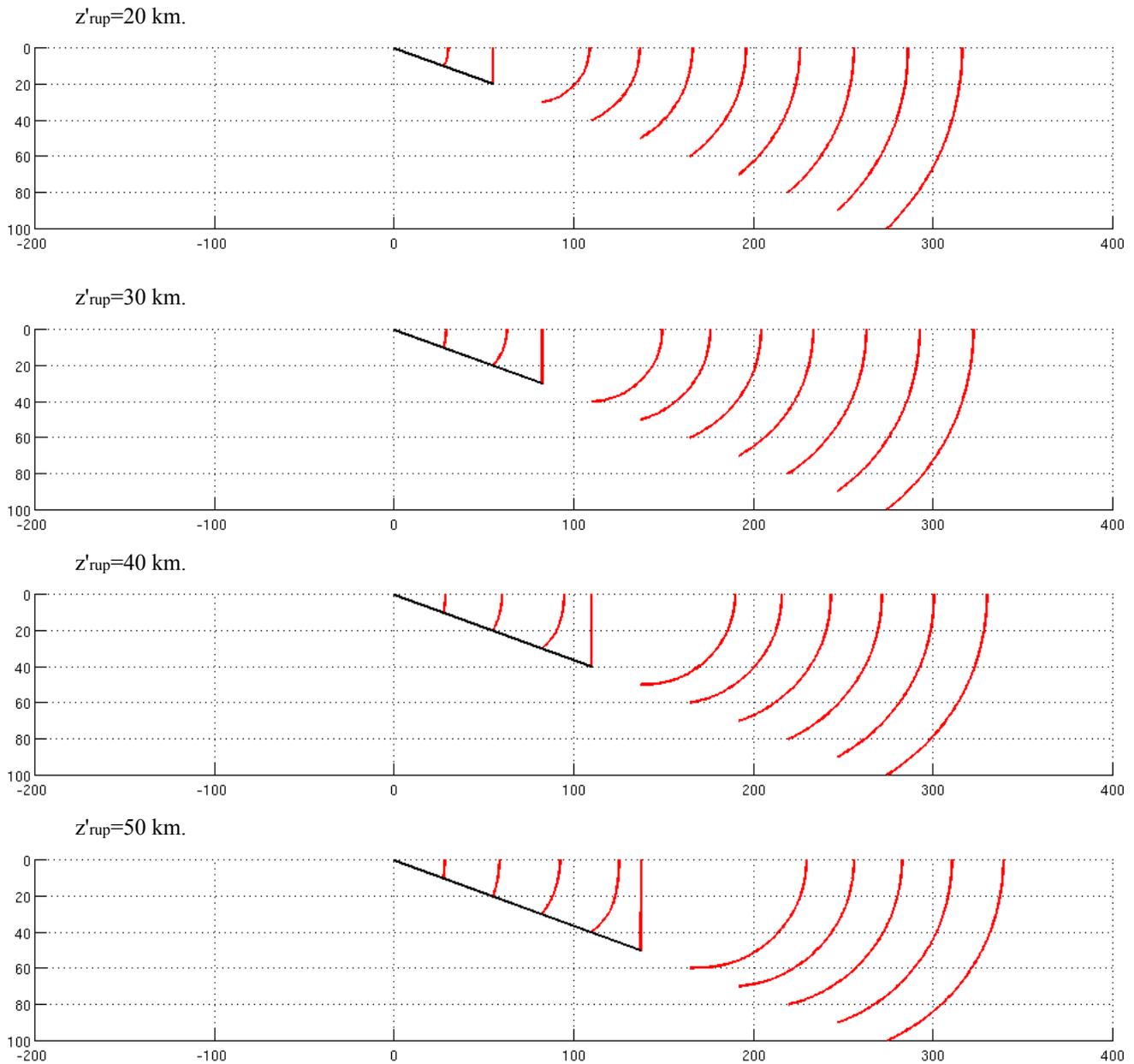


Figura 3.3.1: Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar la profundidad de la zona de ruptura en una zona de subducción modelada según BSM.

Perfiles calculados en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.). El eje horizontal corresponde al eje y' : Distancia a la fosa, en dirección perpendicular a la misma (km) y el eje vertical z' , es profundidad (km). Se presentan los resultados obtenidos para 4 valores diferentes de la profundidad de la zona de ruptura z'_{rup} , especificados en el extremo superior izquierdo de cada imagen. Las otras características de la zona de subducción permanecen constantes: $\lambda=288^\circ$ y $\delta=20^\circ$. La zona de subducción y las distintas ZFLO calculadas en cada caso, aparecen graficadas en color negro y rojo, respectivamente.

Se observa que, a medida que aumenta la profundidad de la zona de ruptura, las ZFLO se ubican más alejadas de la fosa, esto sin contar la ZFLO que se inicia en la profundidad de la zona de ruptura, la que es siempre vertical.

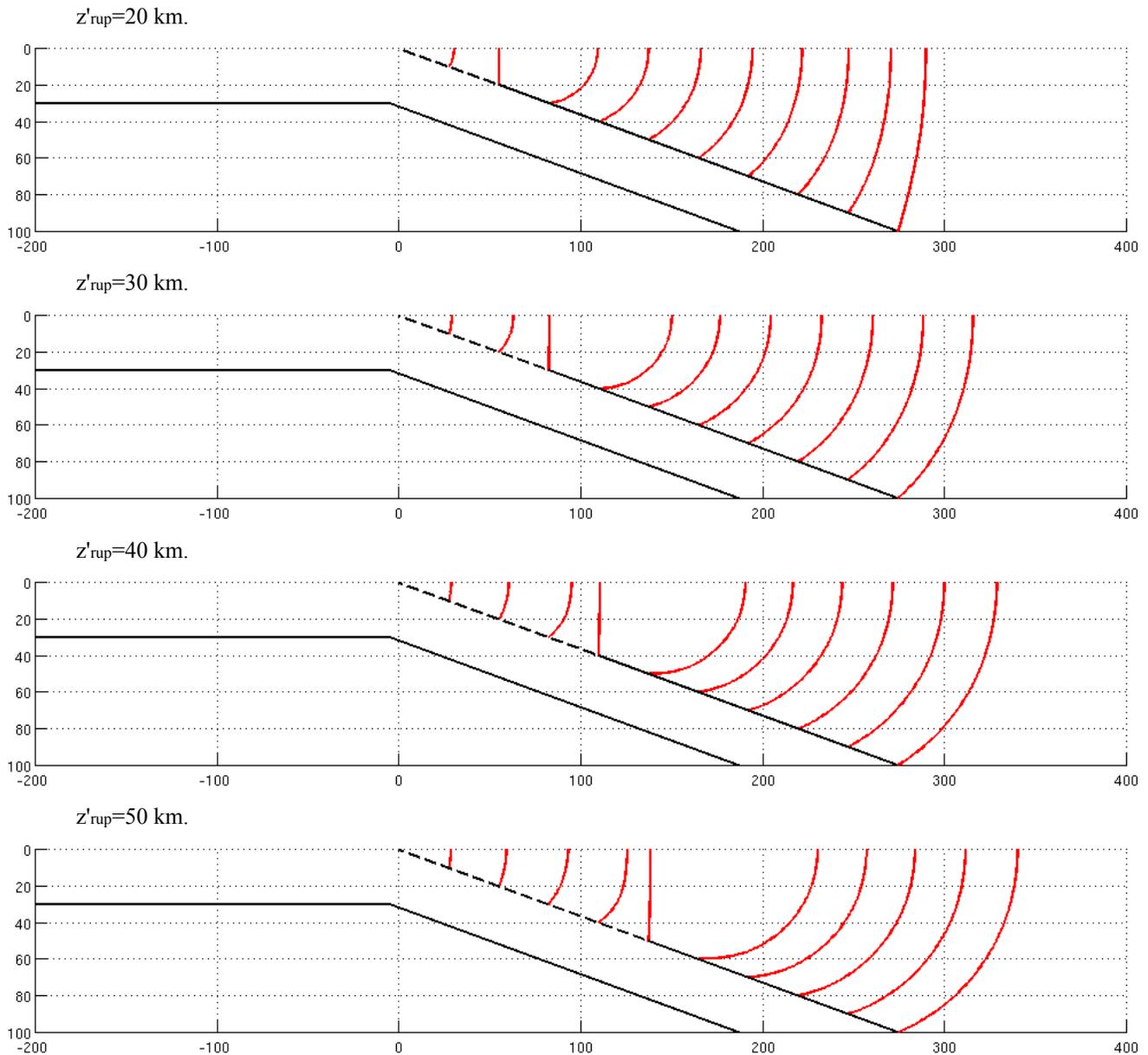


Figura 3.3.2: Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar la profundidad de la zona de ruptura en una zona de subducción modelada según ESPM ($H=30$ km.).

Perfiles calculados en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.). El eje horizontal corresponde al eje y' : Distancia a la fosa, en dirección perpendicular a la misma (km) y el eje vertical z' , es profundidad (km). Se presentan los resultados obtenidos para 4 valores diferentes de la profundidad de la zona de ruptura z'_{rup} , especificados en el extremo superior izquierdo de cada imagen. Las otras características de la zona de subducción permanecen constantes: $\lambda=288^\circ$, $\delta=20^\circ$ y $z'_{slab}=400$ km. La zona de subducción y las distintas ZFLO calculadas en cada caso, aparecen graficadas en color negro y rojo, respectivamente.

Se observa que, a medida que aumenta la profundidad de la zona de ruptura, las ZFLO se ubican más alejadas de la fosa, esto sin contar la ZFLO que se inicia en la profundidad de la zona de ruptura, la que es siempre vertical.

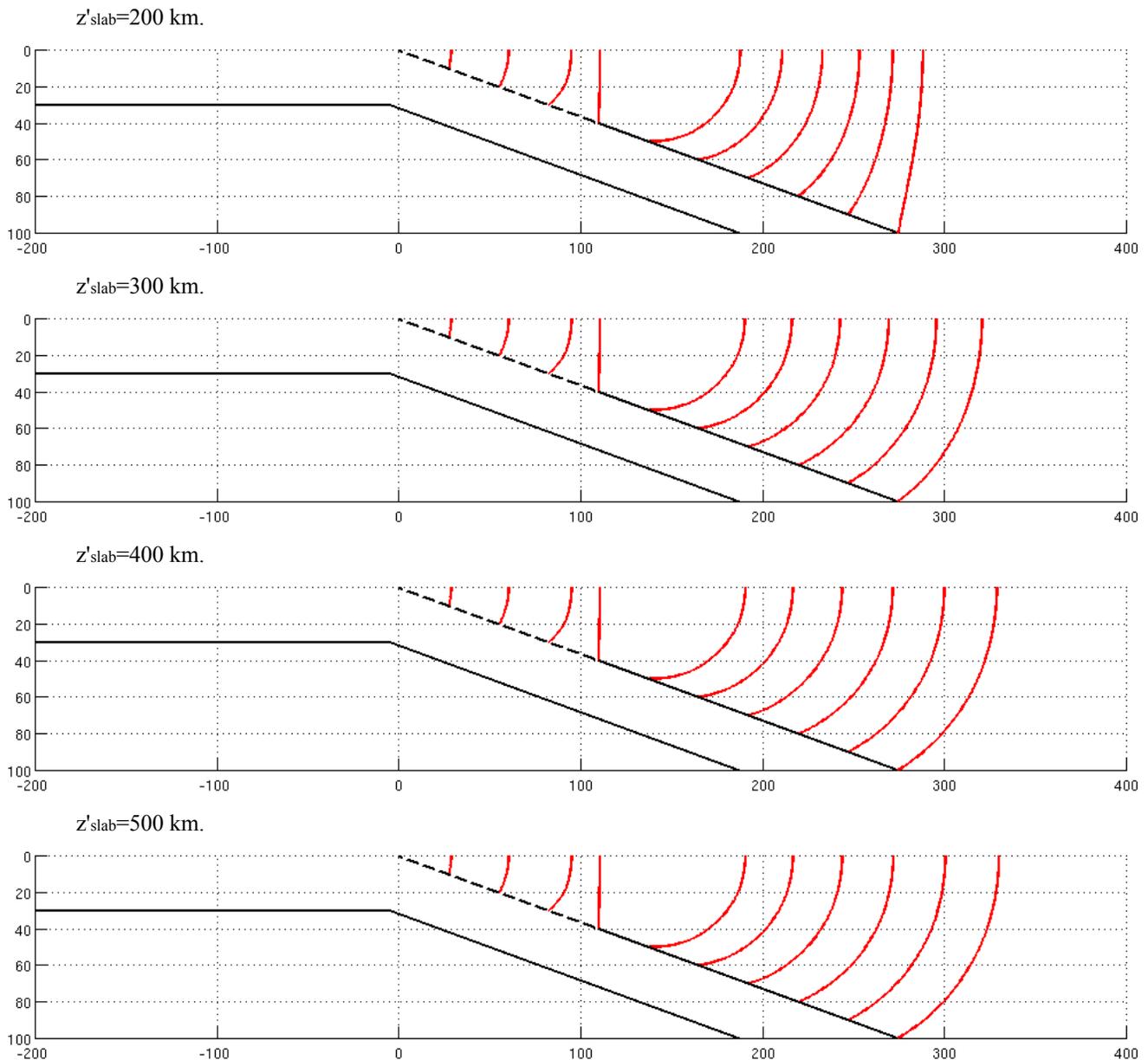


Figura 3.4.1: Análisis del efecto que tiene sobre la geometría de la ZFLO variar la profundidad que alcanza el slab en una zona de subducción modelada según ESPM ($H=30$ km.).

Perfiles calculados en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.). El eje horizontal corresponde al eje y' : Distancia a la fosa, en dirección perpendicular a la misma (km) y el eje vertical z' , es profundidad (km). Se presentan los resultados obtenidos para 4 valores diferentes de la profundidad alcanzada por el slab z'_{slab} , especificados en el extremo superior izquierdo de cada imagen. Se grafican solo los primeros 100 km. de profundidad, para visualizar de mejor manera las ZFLO obtenidas. Las otras características de la zona de subducción permanecen constantes: $\lambda=288^\circ$, $\delta=20^\circ$ y $z'_{\text{rup}}=40$ km. La zona de subducción y las distintas ZFLO calculadas en cada caso, aparecen graficadas en color negro y rojo, respectivamente.

Se observa que, al variar la profundidad que alcanza el slab, la geometría de la ZFLO no se modifica si esta se ubica en la zona de ruptura (línea punteada), en tanto, cuando el inicio de la ZFLO se hace más profundo, la distancia entre la fosa y la ZFLO aumenta a medida que el slab alcanza mayores profundidades.

3.6. Geometría de la ZFLO

Las Figuras 3.6.1 y 3.6.2 muestran las diferentes ZFLO encontradas al considerar una zona de subducción con las características descritas más adelante, que representan la subducción de Nazca bajo Sudamérica, para el caso en que se utilizan los modelos de deformación BSM y ESPM, respectivamente. Se presentan además, los valores de S obtenidos para las distintas ZFLO, cuando la geometría de estas se ha calculado considerando nulo el esfuerzo normal (ecuación (6)). La idea es definir, en base a la ubicación del máximo valor de S , cuál sería la geometría de la ZFLO.

La zona de subducción utilizada posee las siguientes características:

Largo: 1000 km.

Ángulo de inclinación: 20°

Ángulo de deslizamiento: 288°

Profundidad que alcanza el slab: 400 km.

Profundidad de la zona de ruptura: 40 km.

Espesor de la placa subductada (ESPM) : 30 km.

Al observar las Figuras 3.6.1 y 3.6.2, vemos que el máximo valor de S se alcanza, independientemente del modelo de deformación utilizado, en la ZFLO que se inicia a igual profundidad que la profundidad de la zona de ruptura, en este caso 40 km. Luego, si consideramos que la ruptura debe ocurrir en la zona donde S , igual al valor absoluto del cizalle en dirección paralelo a la fosa, es máximo, tenemos que la geometría más probable para la ZFLO es de tipo vertical, iniciada a igual profundidad que la profundidad de la zona de ruptura, con una distancia a la fosa, en superficie, de ~ 110 km.

Si observamos la Figura 1.1, vemos que la distancia entre la fosa y la ZFLO fluctúa entre los 250 y 300 km., valores que superan los obtenidos para la distancia entre ambas cuando se considera que la geometría de la ZFLO está asociada a la ubicación del máximo valor de S .

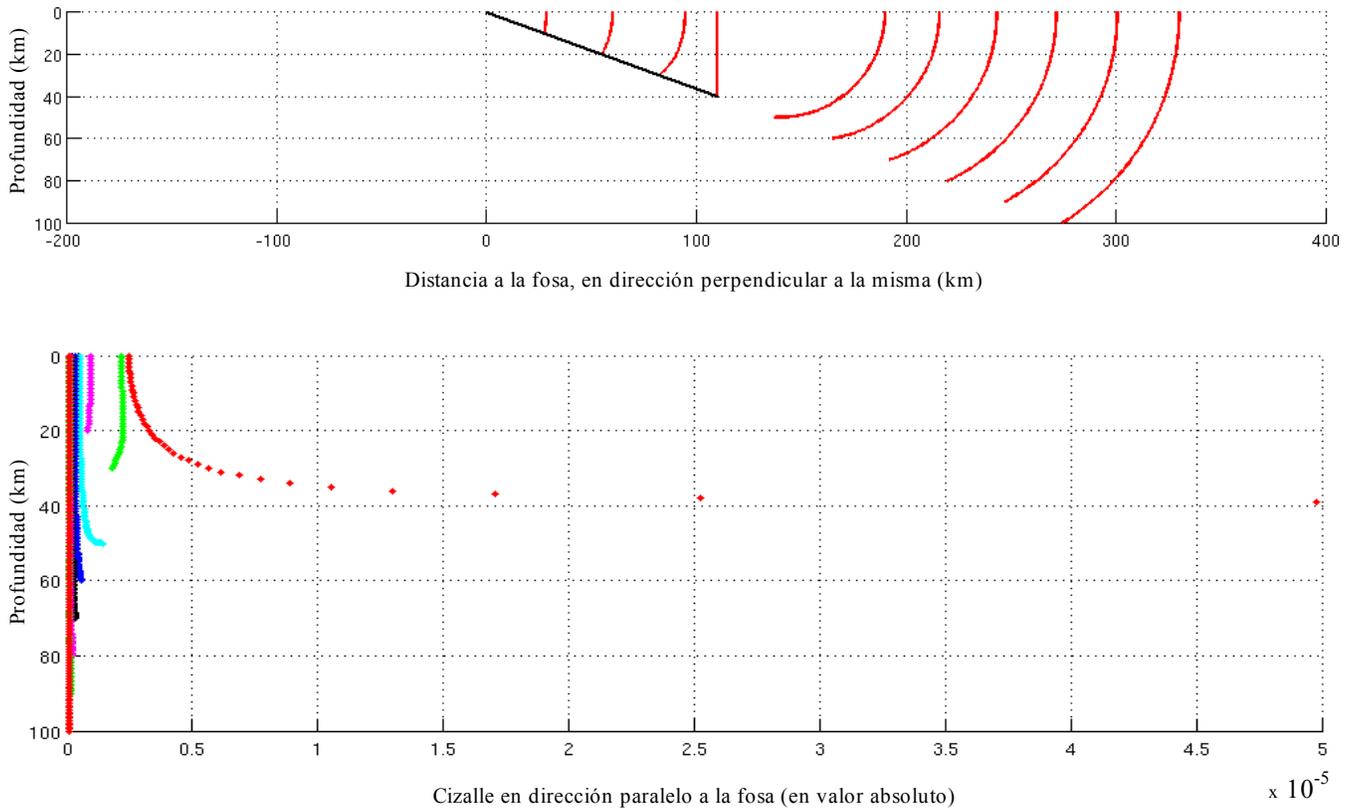


Figura 3.6.1. Arriba: Geometrías calculadas para la ZFLO utilizando la zona de subducción descrita en la sección 3.6, para el modelo de deformación BSM. El gráfico corresponde a un perfil calculado en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.). La zona de subducción y las distintas ZFLO calculadas en cada caso, aparecen graficadas en color negro y rojo, respectivamente. Abajo: Valores obtenidos para S en las distintas ZFLO calculadas. Se presenta la variación de S a lo largo de cada ZFLO, desde su respectiva profundidad de inicio hasta la superficie, esto para el caso en que se considera nulo el valor del esfuerzo normal ($S=|\tau|$).

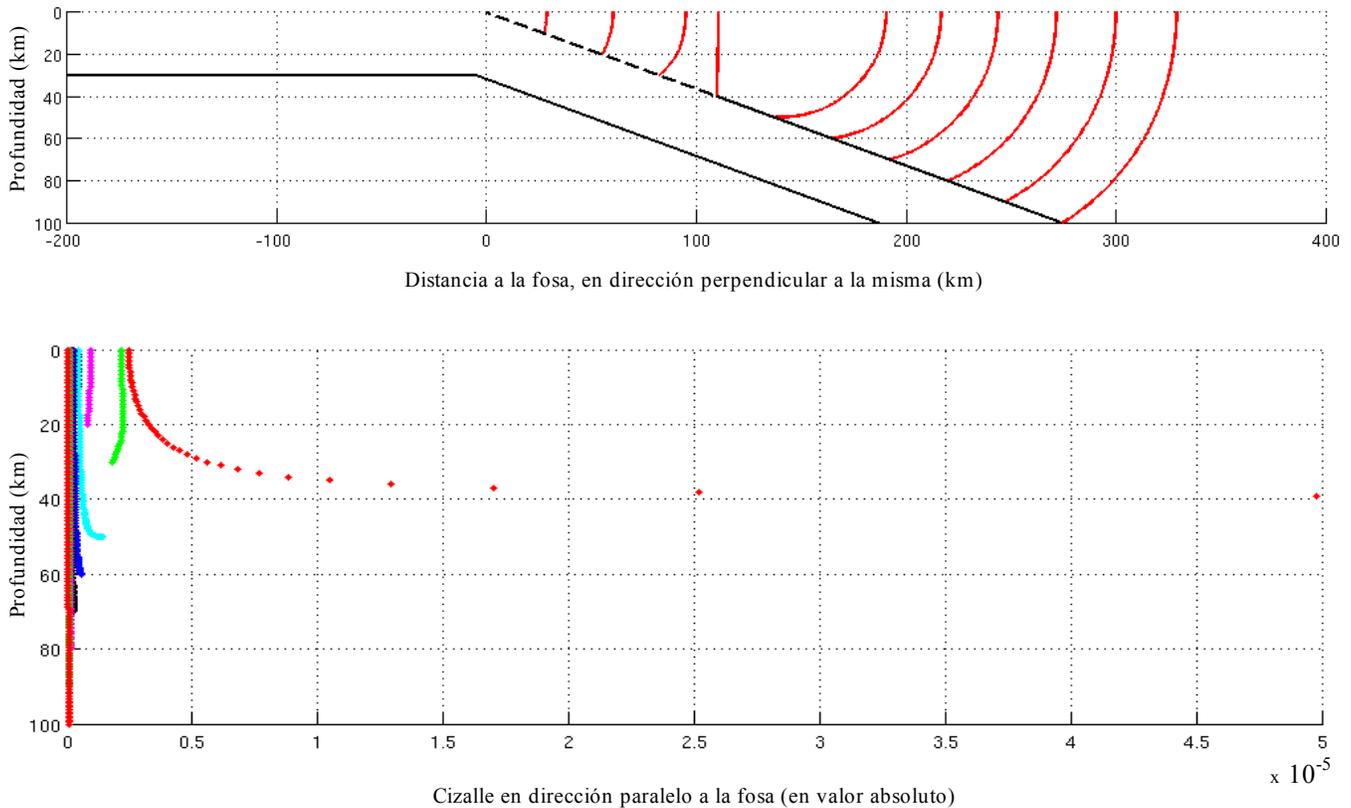


Figura 3.6.2. Arriba: Geometrías calculadas para la ZFLO utilizando la zona de subducción descrita en la sección 3.6, para el modelo de deformación ESPM ($H=30$ km.). El gráfico corresponde a un perfil calculado en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.). La zona de subducción y las distintas ZFLO calculadas en cada caso, aparecen graficadas en color negro y rojo, respectivamente. Abajo: Valores obtenidos para S en las distintas ZFLO calculadas. Se presenta la variación de S a lo largo de cada ZFLO, desde su respectiva profundidad de inicio hasta la superficie, esto para el caso en que se considera nulo el valor del esfuerzo normal ($S=|\tau|$).

Actualmente, una forma de representar la ZFLO, consistente con su ubicación en superficie es, posicionada bajo el arco volcánico, atribuirle una geometría vertical. Si se considera una distancia entre la fosa y la ZFLO de 275 km., por ejemplo, se obtiene que, para un ángulo de inclinación de 20° de la zona de subducción, la profundidad que alcanza la ZFLO según este argumento es de 100 km.

Luego, si consideramos esa misma distancia entre la fosa y la ZFLO (275 km.), pero calculamos la geometría de la ZFLO según el método descrito en este trabajo, es decir, trazando su trayectoria según la orientación en que el cizalle en dirección paralela a la fosa es máximo, obtenemos como resultado que, para una subducción con las características especificadas al inicio de esta sección, la geometría de la ZFLO no es vertical, si no que, si bien es vertical en superficie, se inclina a medida que aumenta la profundidad, encontrándose con la zona de contacto entre las placas Nazca y Sudamérica, con un ángulo cercano a 137° a ~ 80 km. de profundidad, esto, tanto para el caso en que se utiliza BSM, como ESPM. Recordemos que para un ángulo de 20° en la zona de estudio, la geometría de la ZFLO prácticamente no se ve alterada con el uso de distintos modelos de deformación (Figuras 3.5.1 y 3.5.2). Vale decir, que dichas comparaciones se han realizado en base a perfiles, perpendiculares a la fosa, ubicados en la mitad del largo total de la misma. Más adelante, se presentarán perfiles calculados en otras zonas de la fosa, con el fin de analizar la distribución de la ZFLO a lo largo de la fosa.

La Figura 3.6.3 muestra las diferencias que presenta la geometría de la ZFLO, calculada en base a su ubicación observada en superficie, con el hecho de considerarla una estructura completamente vertical.

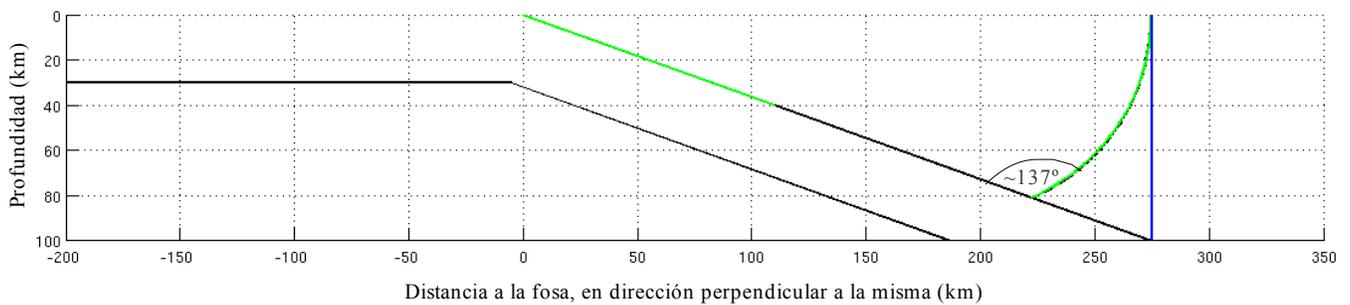


Figura 3.6.3. Distintas geometrías de la ZFLO, en base a su ubicación observada en superficie. En azul, se muestra el caso en que la geometría de la ZFLO se considera vertical, desde la superficie hasta la zona de contacto entre las placas Nazca y Sudamérica. En verde y negro, se observan las geometrías de la ZFLO calculadas según el método descrito en este trabajo, utilizando respectivamente, los modelos de deformación BSM y ESPM. Dicha geometría resulta ser vertical en superficie, pero se inclina a medida que aumenta la profundidad. Finalmente la profundidad en la que se topan estas ZFLO y la zona de contacto entre las placas Nazca y Sudamérica es de aproximadamente, 80 km., con un ángulo entre ambas de $\sim 137^\circ$.

La zona de subducción a partir de la cuál se han calculado estas geometrías, posee las siguientes características: $\delta=20^\circ$, $\lambda=288^\circ$, $z'_{rup}=40$ km., $H=30$ km. (ESPM), $z'_{slab}=400$ km. (ESPM). Perfil calculado en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.) .

Ahora bien, si consideramos que la ZFLO efectivamente se inicia a 80 km. de profundidad, y posee la geometría descrita en la Figura 3.6.3, podemos calcular cómo varía su geometría a lo largo de la fosa, y contrastar los resultados obtenidos con lo observado en la zona de estudio. Para ello, se modeló una zona de subducción de iguales características a las descritas anteriormente en esta sección, características que se consideraron constantes a lo largo de la fosa, a excepción de la profundidad de la zona de ruptura, la cual aumenta de sur a norte en la zona de estudio. Los valores utilizados para la profundidad de la zona de ruptura fueron, de sur a norte: 20, 30, 40 y 50 km.

Se modelaron por tanto, en realidad, 4 zonas de subducción, cada una con su correspondiente valor de profundidad de la zona de ruptura, luego, la suma de todas ellas genera una subducción cuya profundidad de la zona de ruptura varía a lo largo de la fosa. Se realizaron perfiles en dirección perpendicular a la fosa, los que se ubicaron en la parte media del largo de cada una de las zonas de subducción, obteniéndose así, distintos puntos por donde pasa la ZFLO cuando se considera que su inicio es a 80 km. de profundidad. Lo anterior, se realizó utilizando los modelos de deformación BSM y ESPM, para una fosa con azimut 7°E. El resultado obtenido se presenta en la Figura 3.6.4., aquí puede verse como, de norte a sur, la distancia entre la fosa y la ZFLO calculada disminuye, lo que coincide con el acercamiento que el arco volcánico y la fosa muestran hacia el sur en la zona de estudio.

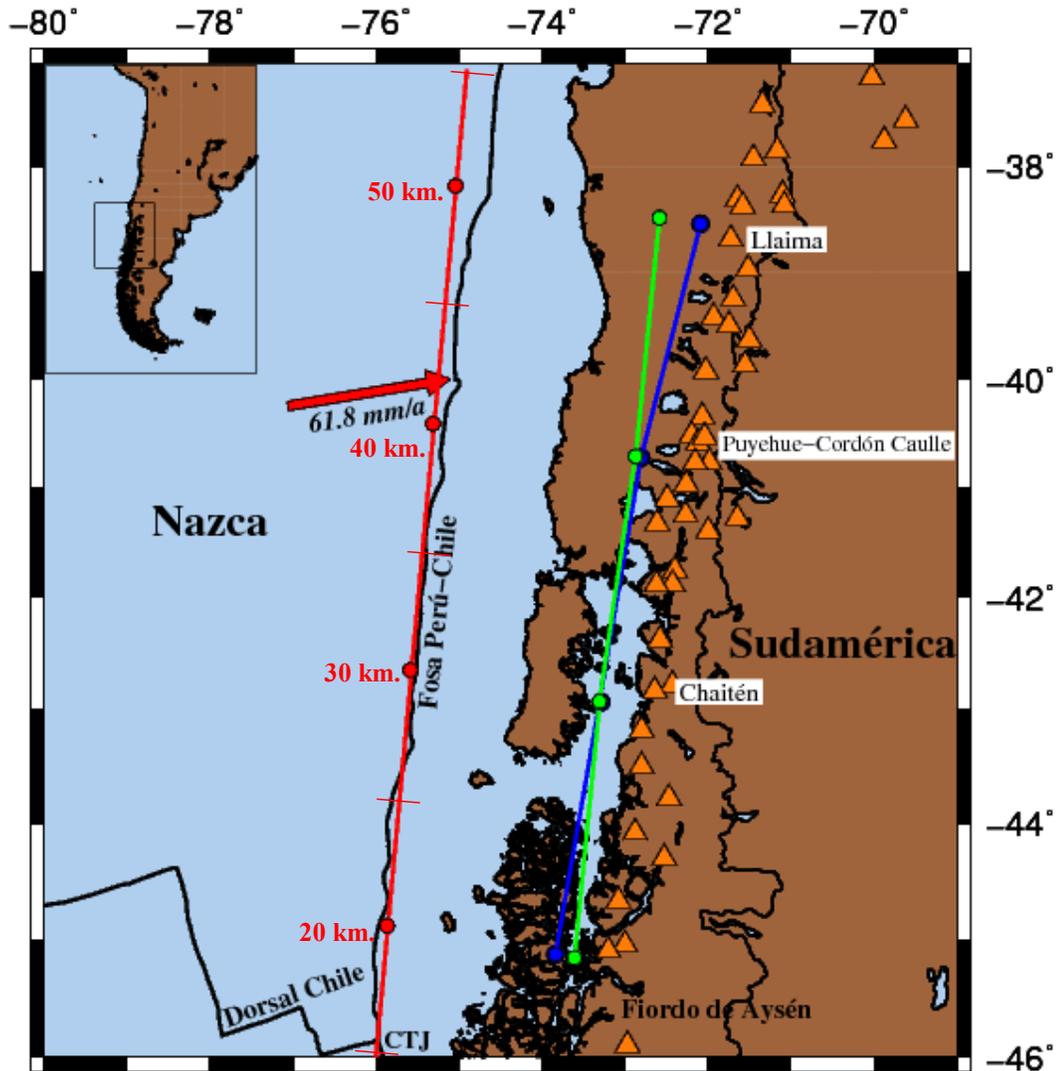


Figura 3.6.4 Ubicación en superficie de la ZFLO a lo largo de la Fosa Perú-Chile. En rojo, se muestra la fosa modelada, cuyo comienzo se asocia a la ubicación del punto triple CTJ (46°S , 76°W), tiene un largo de 1000 km. y azimut 7°E . Los círculos rojos sobre la fosa corresponden a la ubicación de los distintos perfiles, perpendiculares a la fosa, en donde se calcula la geometría de la ZFLO. Se muestra además la división que se consideró de la fosa, en cuatro tramos, en cada uno de los cuales se especifica la profundidad de la zona de ruptura utilizada.

Los círculos verdes y azules, indican la posición en superficie de la ZFLO, encontrada en cada perfil realizado para los casos en que se utiliza BSM y ESPM, respectivamente. Las características de la subducción son las descritas en la sección 3.6. y se considera que el inicio de la ZFLO ocurre a 80 km. de profundidad. Los círculos asociados se han unido mediante una línea del mismo color para poder visualizar en forma más clara la ubicación que presentaría la ZFLO bajo dichas condiciones.

3.7. Esfuerzo normal

La Figura 3.7.1 muestra las distintas ZFLO calculadas a partir de la zona de subducción descrita en la sección 3.6, utilizando BSM y ESPM, para el caso en que la geometría de la ZFLO se determinó considerando el esfuerzo normal distinto de cero, lo que significa que en cada punto se calculó S según la ecuación (9). Al comparar estos resultados con los presentados en las Figuras 3.5.1 y 3.5.2, se observa que las diferencias que genera el incluir o no en los cálculos el aporte del esfuerzo normal, es que en el primer caso, la geometría de las distintas ZFLO resulta más vertical, lo que hace que en superficie, estas aparezcan ubicadas más cerca de la fosa que cuando el esfuerzo normal no se considera, eso, a excepción de la ZFLO que se inicia a igual profundidad que la profundidad de la zona de ruptura, donde ocurre todo lo contrario.

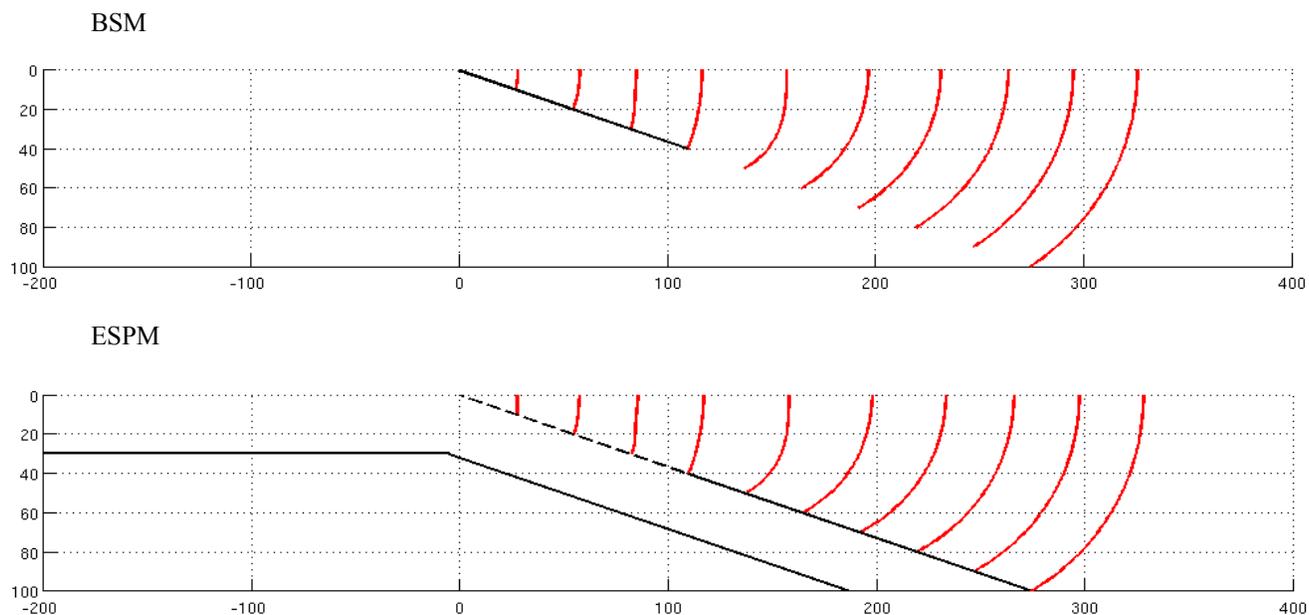


Figura 3.7.1. Geometrías calculadas para la ZFLO, considerando el esfuerzo normal distinto de 0 en los cálculos, para los modelos de deformación BSM y ESPM. Se utilizó la zona de subducción descrita en la sección 3.6. Ambos gráficos corresponden a un perfil calculado en la mitad del largo total de la fosa ($x'=500$ km.). La zona de subducción y las distintas ZFLO calculadas en cada caso, aparecen graficadas en color negro y rojo, respectivamente.

4. DISCUSIÓN

Cuando varían ciertas características de la subducción de Nazca bajo Sudamérica, la geometría de la ZFLO se modifica. Es el caso del ángulo de inclinación y la profundidad de la zona de ruptura. Cambios en el ángulo de deslizamiento no afectan la geometría de la ZFLO.

El uso de los distintos modelos de deformación BSM [Savage (1983)] y ESPM [Kanda y Simons (2010)], muestra que el espesor de la placa subductada es un parámetro que afecta la geometría de la ZFLO, así como también lo es, la profundidad alcanzada por el slab (ESPM), pero, en estos últimos dos casos, las ZFLO afectadas son solo aquellas ubicadas fuera de la zona de ruptura.

En relación a cuál debiese ser la geometría de la ZFLO tenemos que, si se considera que corresponde a aquella que presenta el máximo valor de S , la ZFLO tendría una geometría vertical, ubicándose a ~ 110 km. de la fosa en superficie, valor que resulta menor a lo observado en la Figura 1.1. A partir de esto, puede entenderse que con el solo análisis del comportamiento mecánico de la zona de estudio, no es posible explicar la geometría que posee la ZFLO, lo que implica que esta última es controlada por factores como el régimen termal en la región.

Una geometría de la ZFLO consistente con la distancia observada en superficie entre la fosa Perú-Chile y la ZFLO, corresponde según nuestros cálculos, a la ZFLO cuyo inicio ocurre a ~ 80 km. de profundidad, en la zona de contacto entre las placas Nazca y Sudamérica. Esta geometría es de tipo vertical en superficie, y a medida que aumenta la profundidad, se muestra más inclinada, como se observa en la Figura 3.6.3.

El trabajo de [K. Groß et. al. (2007)], presenta un estudio basado en sismica de reflexión, para la zona de subducción de Nazca bajo Sudamérica, en los 38.2°S . La Figura 5.1 corresponde a la interpretación realizada por los autores para los resultados obtenidos, donde hacen alusión a que el reflector ubicado en el extremo este del perfil no tiene un origen claro, y que al extrapolar su posición en superficie coincide con la ubicación de la ZFLO.

Tras realizar algunos cálculos de tipo trigonométricos con la información que la Figura 5.1 proporciona, se tiene que el inicio de este reflector ocurre a unos 200 km. de distancia de la fosa, a una profundidad entre 65-70 km., para un ángulo de inclinación de la zona de subducción $\sim 18^{\circ}$.

Si comparamos esta información con la geometría de la ZFLO calculada anteriormente (Figura 3.6.3), pero en vez de considerar un ángulo de inclinación de 20° , utilizamos uno de 18° , se obtiene que, para una distancia entre la fosa y el arco volcánico de 275 km., la ZFLO correspondiente tiene una geometría como la vista en la Figura 3.6.3, pero, la profundidad que alcanza no es 80 km. sino que 74 km., valor que resulta más cercano a lo observado en la Figura 5.1. Ahora bien, si tomamos en cuenta los cambios que provocan en la geometría de la ZFLO, ciertas diferencias en otros parámetros de la subducción y el hecho de que el ángulo de inclinación de la zona de subducción puede sufrir cambios en profundidad, lo cual modificaría la profundidad a la cual la ZFLO se encuentra con la zona de contacto entre las placas Nazca y Sudamérica, podemos explicar las diferencias existentes entre las observaciones presentadas en la Figura 5.1 y la ZFLO modelada en este estudio, de esta forma, el reflector observado en la Figura 5.1 puede ser asociado a la presencia de la ZFLO.

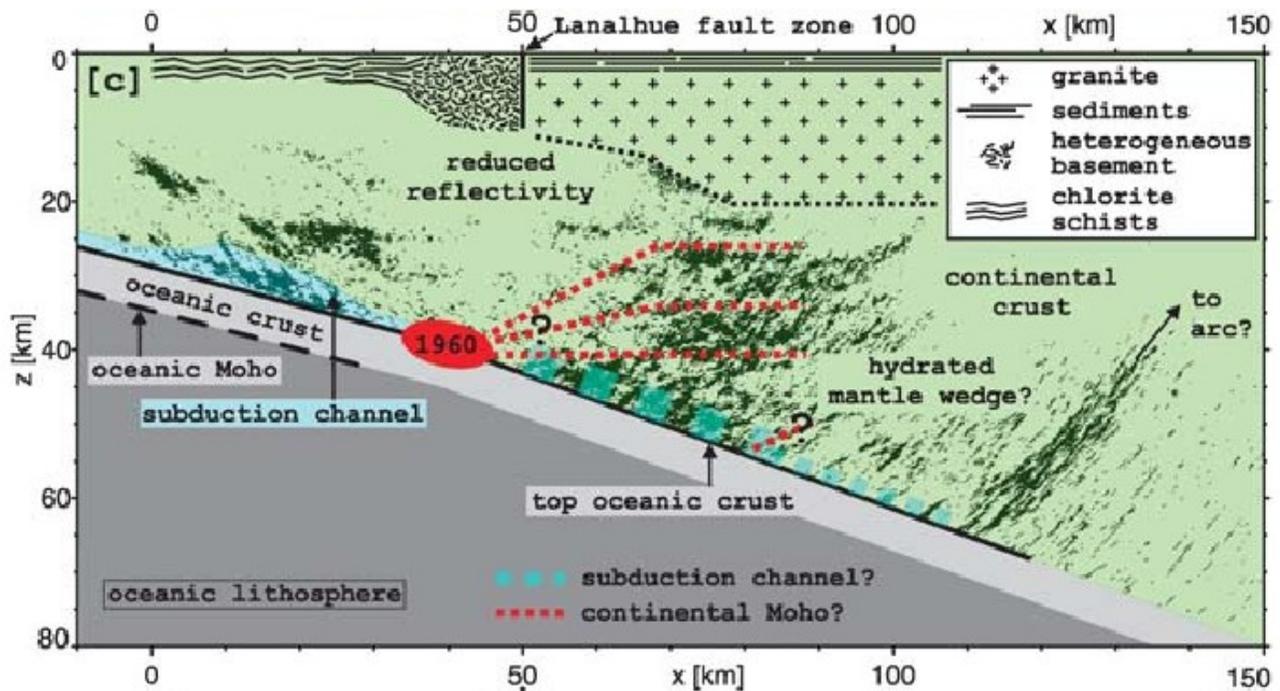


Figura 5.1: Perfil TIPTEC a 38.2°S . Se plantea que el reflector ubicado al extremo este del perfil puede estar asociado al arco volcánico. Su extrapolación en superficie, se corresponde con la ubicación de la ZFLO. El valor 0 km. en el eje horizontal corresponde a la ubicación de la costa [K. Groß et. al. (2007) , Fig 4c].

El análisis de la ubicación de la ZFLO a lo largo de la fosa, mostró que de sur a norte, conforme aumenta la profundidad de la zona de ruptura, aumenta también la distancia entre la fosa y la ZFLO, esto, coincide con lo observado en la zona de estudio para la geometría de la ZFLO y ubicación del arco volcánico. Destacar que, al considerar que el inicio de la ZFLO ocurre a una profundidad mayor que la profundidad de la zona de ruptura, como se ha hecho en este caso, su geometría está afecta a todos los parámetros relativos a la geometría de la zona de subducción nombrados anteriormente, entre ellos el uso de los distintos modelos de deformación BSM y ESPM, luego, cómo se observa en la Figura 3.6.4, el efecto de considerar uno u otro modelo de deformación es distinto para diferentes valores de la zona de ruptura, esto puede verse en los puntos que, asociados al ESPM aparecen más cercanos a la fosa que los asociados al BSM en el sur, y ocurre todo lo contrario en el norte, por lo tanto, no puede establecerse un patrón único para todos los casos, lo mismo ocurrió cuando se comparó el uso de los distintos modelos de deformación, considerando diferentes ángulos de inclinación (Figuras 3.2.1 y 3.2.2).

Por otro lado, la geometría de la ZFLO también puede variar en función de si se incluye o desprecia el aporte del esfuerzo normal en los cálculos anteriores.

5. CONCLUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos, podemos decir que la geometría de la subducción de Nazca bajo Sudamérica no determina la geometría de la ZFLO. Aún cuando cambios en ciertas características de la zona de subducción generan cambios en la geometría de la ZFLO, el análisis del comportamiento mecánico de la zona de estudio, descrito en este trabajo, posiciona a la ZFLO a una distancia aproximada de 110 km. de la fosa Perú-Chile, lo cual no coincide con lo observado en la zona de estudio, esto sugiere que son otros los factores que determinan finalmente la geometría de la ZFLO, tales como, el régimen termal en la región.

Las distancias observadas entre la ZFLO y la fosa Perú-Chile, varían entre 250 y 300 km. aproximadamente. Luego, una forma de representar la ZFLO es considerarla una estructura de geometría vertical que se ubica bajo el arco volcánico. Los cálculos realizados en este estudio, sugieren que, considerando estas distancias entre la fosa y la ZFLO, la geometría de la ZFLO es la siguiente: Vertical en superficie, inclinándose en profundidad, hasta encontrarse con la zona de contacto entre las placas Nazca y Sudamérica con un ángulo de $\sim 137^\circ$, a una profundidad de 80 km.

Observaciones de reflexión sísmica en la zona, desarrolladas por el proyecto TIPTEC, muestran un llamado reflector, cuya proyección en superficie coincide con la ubicación de la ZFLO, pero, se desconoce si tiene o no relación con el arco volcánico. En base a lo desarrollado en este estudio, podemos decir que las observaciones realizadas por [K. Groß et. al. (2007)] si tienen relación con la ZFLO, encontrándose que la geometría encontrada anteriormente para la ZFLO, tiene estrecha relación con la geometría que presenta dicho reflector.

Finalmente, dada la importancia de la ZFLO en el análisis y comprensión de los procesos que tienen lugar en el sur del país, destaca el hecho de que este estudio sea capaz de plantear cual sería su geometría en profundidad, además de su relación con las características de la subducción en la zona.

6. REFERENCIAS

Cembrano, J., Hervé, F., Lavenu, A. 1996. The Liquine-Ofqui fault zone: A long-lived intra-arc fault system in southern Chile. *Tectonophysics*, Vol. 259, p. 55-66.

Cembrano, J., Lavenu, A., Reynolds, P., Arancibia, G., Lopez, G., Sanhueza, A., 2002. Late Cenozoic transpressional ductile deformation north of the Nazca - South America - Antarctica triple junction. *Tectonophysics*, Vol. 354, p. 289-314.

K. Groß, U. Micksch and TIPTEQ Research Group, Seismics Team.,2007. The reflection seismic survey of project TIPTEQ—the inventory of the Chilean subduction zone at 38.2°S. *Geophysical Journal International*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03680.x.

Kanda, R., Simons, M., 2010. An elastic plate model for interseismic deformation in subduction zones. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, B03405, doi:10.1029/2009JB006611.

Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Barriga, R., Lauría, E., Souto, L., 2003. The Nazca-South America Euler vector and its rate of change. *Journal of South American Earth Sciences* 16(2): p. 125-131.

Okada, Y., 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 82, No. 2, p. 1018-1040.

Savage, J.C.,1983. A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 88, p. 4984-4996.