



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Geofísica

“ORIGEN DEL DESPLAZAMIENTO CO-SÍSMICO Y POST-SÍSMICO
PARA EL TERREMOTO DE TOHOKU OKI 2011”

Marcelo Alonso Bernardin Sepúlveda

Trabajo para optar al título de Geofísico de la Universidad de Concepción

Profesor guía:

Dr. Klaus Bataille Bollweg

Comisión:

Dr. Matthew Robert Miller

Dr. Arturo Belmonte-Pool Villanueva

Departamento de Geofísica

Universidad de Concepción

Concepción

14 de marzo de 2019

*Dedicado a mi abuelo,
que en paz descanse,
quien siempre me transmitió tranquilidad diciéndome
"No temas a avanzar lento, sino a no avanzar"*

Agradecimientos

Doy mi sinceros agradecimientos a:

Mi familia por contar con su apoyo incondicional en todo momento y por haberme dado las herramientas, oportunidades y libertad para desarrollarme en lo que quisiera.

A mi profesor guía Klaus Bataille, por su paciencia y buena disposición, y que pesar de los periodos en que no nos veíamos con frecuencia, sentí que al momento de necesitar su apoyo o consejo siempre estuvo presente.

A mi amigo César Núñez con quien compartí cursos y horas de discusión de todas las materias imaginables. Fue un gran aporte y apoyo en mi formación como persona y estudiante en la universidad.

Resumen

El 11 de marzo del 2011 ocurrió en Japón un terremoto de magnitud 9.0 Mw. La deformación de la corteza continental y oceánica fue registrada por la red geodésica japonesa GEONET. Durante el período co-sísmico las estaciones GPS sobre el continente y el fondo marino registraron desplazamientos hacia la fosa, en cambio durante el periodo post-sísmico la dirección de desplazamiento en el fondo marino se invirtió abruptamente hacia el continente. La dirección de desplazamiento hacia la fosa se mantuvo en las estaciones que estaban sobre continente. El fenómeno anterior no había sido registrado anteriormente debido a la falta de estaciones GPS en el fondo del mar. El trabajo desarrollado en esta tesis explora distintas combinaciones de fallas/deslizamientos en el periodo co-sísmico y post-sísmico usando el método de elementos finitos FEM con el fin de reproducir los datos de desplazamiento superficial de un conjunto de estaciones GPS. El escenario de simulación se lleva a cabo frente a las costas de Honshu, se toma una transecta que pasa a través de la fosa y llega hasta el continente incorporando información de desplazamiento tanto en el fondo marino como en el continente. Para simular la deformación superficial generada a partir de fallas activadas en profundidad se construye una geometría de subducción equivalente a la zona de estudio y se toman en cuenta los distintos valores de rigidez para cada material. Para cada periodo sísmico se explora sistemáticamente la variación del desplazamiento superficial imponiendo fallas inversas y normales (periodo co-sísmico y post-sísmico respectivamente) con distintos desplazamientos (slip) en la parte superior e inferior del slab con longitudes que van de metros a kilómetros con el fin de conocer la respuesta en superficie. Finalmente se extraen y se comparan los resultados obtenidos entre lo modelado con el FEM y lo observado por las estaciones GPS con el fin de demostrar que ambos periodos sísmicos pueden ser reproducidos sin la necesidad de introducir un termino viscoso.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
1. Antecedentes, zona de estudio y objetivos	1
1.1. Terremoto Tohoku-Oki 2011, Japón	1
1.1.1. Repercusiones locales y globales asociados al terremoto	3
1.1.2. Descripción de estaciones GPS de Japón en el continente y fondo marino	4
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Principal	6
1.2.2. Específicos	6
1.3. Zonas de estudio	7
2. Marco Teórico	1
2.1. Teoría de placas	1
2.2. Ciclo sísmico	3
2.2.1. Periodo inter-sísmico	3
2.2.2. Periodo co-sísmico	4
2.2.3. Periodo post-sísmico	4
2.3. Modelos de subducción	5
2.3.1. BSM (Back Slip Model)	5
2.3.2. ESPM (Elastic subducting Plate Model)	5
3. Metodología	6
3.1. Elaboración de modelo de subducción y discretización del espacio mediante Triangle	6
3.2. Estimación del desplazamiento elementos finitos (FEM)	9
3.3. Manipulación de datos de estaciones GPS y elaboración de transecta comparativa	13
3.4. Visualización de datos en Paraview	15
4. Resultados	19
4.1. Test de validación	19
4.1.1. Test de validación de equivalencia usando distintas distancias desde la falla hasta la periferia del rectángulo que la inscribe.	19
4.1.2. Test de equivalencia de desplazamiento en sumatoria de fallas	23
4.2. Resultado de simulación mediante el método FEM	26

4.2.1. Período co-sísmico	27
4.2.2. Resultado datos FEM para datos GPS para el periodo post-sísmico	34
4.3. Método de elementos finitos (FEM) - Fallas 1 a 20	41
5. Análisis y Discusión	52
6. Conclusiones	55
A. Códigos para MatLab y Script en Bash	57
A.1. Código MatLab: readdisplacement.m	57
A.2. Código MatLab: compara.m	57
A.3. Código MatLab: equifalla6.m	59

Índice de figuras

1.1.	(a) Evento principal ocurrido el 11 de marzo junto a su respectivo mecanismo focal a partir del catalogo “Global CMT”	2
1.2.	(a) Dirección de movimiento de las placas en la zona de subducción y (b) Ilustración de las 4 placas tectónicas que interactúan con Japón	2
1.3.	Zona de licuefacción.	3
1.4.	Run up en metros.	3
1.5.	(a) Modelo de propagación del tsunami (NOAA) y (b) Maremoto generado por terremoto Tohoku-Oki.	4
1.6.	(a) Distribución espacial de las estaciones de GEONET y (b) Estación geodésica Japón.	5
1.7.	(a) Diagrama de funcionamiento GPS submarino y (b) estación submarina MYGI.	5
1.8.	(a) Perfil 600 Km y (b) Zona de estudio.	7
2.1.	En la imagen se distinguen las distintas placas, estas interactúan de distinta forma siendo las zonas de subducción (márgenes destructivos) las que nos interesa en este estudio de la deformación co-sísmica y post-sísmica. Imagen del USGS)	2
2.2.	Durante el periodo intersísmico, debido al bloqueo en profundidad de las placas, la corteza continental comienza con un proceso de compresión y deformación con aumento de la elevación esto último se observa mediante el uso de GPS y es un proceso que puede tomar de años a décadas. Para los mega terremotos, este proceso puede tomar siglos de acumulación de deformación antes de liberar energía.	3
2.3.	La liberación de energía se produce en una ventana muy acotada de tiempo respecto al periodo de acumulación, en solo minutos se puede liberar la energía acumulada en años. Al momento de la ruptura, en la zona costera, se observa un fenómeno de subsidencia	4
2.4.	Modelo con espesor de slab $H=0$	5
2.5.	Modelo con espesor de slab H	5
3.1.	Malla formada por triángulos adyacentes, imagen generada en el software Triangle	6
3.2.	Red de nodos que conforman la geometría de la malla triangular, imagen generada en el software Triangle.. . . .	7
3.3.	(a) Malla de rectángulo que inscribe a la falla y muestra los distintos materiales con distintos colores (b) Simulación FEM y el campo de desplazamiento generado.	8

3.4. *Malla elaborada con un mayor numero de nodos. Los triángulos que se forman en la malla, especialmente dentro de la zona rectangular son tan pequeños que no es posible distinguirlos sin hacer un zoom.* 8

3.5. *Esquema del dominio triangular, base para la generación de la malla usando un sistema de referencia (x,y). Se muestran los nodos 1,2 y 3 (Nodo1=(x1,y1), Nodo2=(x2,y2), Nodo3=(x3,y3)) y sus respectivos desplazamientos; (u1,v1) , (u2,v2) , (u3,v3).* 9

3.6. *En la imagen se muestra la geometría de subducción de Japón, se distingue el slab de subducción, una corteza superficial de espesor “h” y una zona de ruptura en la parte inferior representada por un rectángulo que inscribe la falla. Las condiciones de borde del problema quedan establecidas para los limites laterales y el límite inferior, la superficie mantiene los dos grados de libertad al igual que el interior.* 11

3.7. *(a) Se muestra el sistema matricial que representa la matriz de rigidez global para el conjunto de 4 dominios definido por 6 nodos.* 12

3.8. *Publicación Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake: (a) Periodo co-sísmico (b) Periodo post-sísmico.* 13

3.9. *Vista superior de la recta que pasa a través de las 6 estaciones referenciales usadas para realizar la comparación de los desplazamientos superficiales observados y los calculados por mediante el método FEM.* 14

3.10. *Imagen ilustrativa de la distribución de las estaciones GPS sobre el continente y el fondo marino. Se distinguen los distintos valores de rigidez para cada estrato (corteza, manto superior y manto inferior)* 14

3.11. *(a) Campo de desplazamiento de la componente horizontal y (b) Campo de desplazamiento de la componente vertical* 15

3.12. *Ejemplo de dislocación generada usando el software Malla-Elast para una zona de subducción* 16

3.13. *Diagrama de flujo del proceso* 17

3.14. *La imagen superior muestra los distintos materiales de la zona de subducción que tienen valores de rigidez independiente y mas abajo en la imagen inferior el el campo de deformación con una escala de colores* 18

4.1. *Falla inmersa en un semi-espacio homogéneo e isotrópico. Los 2 bloques rectangulares (rectángulo superior rojo y blanco inferior) que contienen a la falla pueden ser diseñados de tal forma que tengan una distancia arbitraria desde el contorno del bloque hasta la falla.* 20

4.2. *Bloques rectangulares que engloban a la falla* 20

4.3. *Resultados de desplazamiento superficial en la componente u(x) usando distancias falla-periferia; d=2 y d=5* 21

4.4. *Resultados de desplazamiento superficial en la componente u(y) usando distancias falla-periferia; d=2 y d=5* 21

4.5. *Resultados de desplazamiento superficial en la componente u(x) usando distancias falla-periferia; d=2 y d=5* 22

4.6.	<i>Resultados de desplazamiento superficial para el segmento de falla 1. A la izquierda de la imagen se observan dos gráficos Desplazamiento(m) v/s Distancia (km) correspondientes a las componentes horizontales $u(x)$ e $y(x)$. A la derecha se muestra el campo de desplazamiento representado con un código de color siendo el rojo el mayor desplazamiento y azul el menor.</i>	23
4.7.	<i>Resultados de desplazamiento superficial para el segmento de falla 2. A la izquierda de la imagen se observan dos gráficos Desplazamiento(m) v/s Distancia (km) correspondientes a las componentes horizontales $u(x)$ e $y(x)$. A la derecha se muestra el campo de desplazamiento representado con un código de color siendo el rojo el mayor desplazamiento y azul el menor.</i>	24
4.8.	<i>Resultados de desplazamiento superficial para el segmento de falla 3. A la izquierda de la imagen se observan dos gráficos Desplazamiento(m) v/s Distancia (km) correspondientes a las componentes horizontales $u(x)$ e $u(y)$. A la derecha se muestra el campo de desplazamiento representado con un código de color siendo el rojo el mayor desplazamiento y azul el menor.</i>	24
4.9.	<i>Resultados de desplazamiento superficial para la componente horizontal $u(x)$ haciendo la suma de falla1 y falla2 (en azul) y falla3(en rojo). Se observa que ambas curvas se superponen generando el efecto de que se trata de una sola linea</i>	25
4.10.	<i>Resultados de desplazamiento superficial para la componente horizontal $u(y)$ haciendo la suma de falla1 y falla2 (en azul) y falla3(en rojo). Se observa que ambas curvas se superponen generando el efecto de que se trata de una sola linea</i>	25
4.11.	<i>Perfil de subduccion con distintos materiales en función de su rigidez. Se observa un bloque conteniendo en la zona de color mostaza en su interior, dentro de este bloque esta contenida la falla, esta es solo una de las 20 fallas que se usan en el proceso de obtención del desplazamiento superficial total.</i>	26
4.12.	<i>Imagen ilustrativa de la distribución de las estaciones GPS sobre el continente y el fondo marino. Se distinguen los distintos valores de rigidez para cada estrato (corteza, manto superior y manto inferior)</i>	27
4.13.	<i>Sumatoria desplazamiento durante el periodo co-sísmico de las fallas F17,F18,F19 y F20 con distintos valores de desplazamiento sobre la fallas.</i>	28
4.14.	<i>Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F17.</i>	29
4.15.	<i>Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F18.</i>	30
4.16.	<i>Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F19.</i>	31
4.17.	<i>Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F20.</i>	32
4.18.	<i>Periodo co-sísmico - sumatoria dislocaciones independientes 17,18,19,20.</i>	33
4.19.	<i>Sumatoria periodo post-sísmico, todos los casos.</i>	35
4.20.	<i>Sumatoria periodo post-sísmico con deslizamientos de 0.5, 1 y 5m.</i>	35
4.21.	<i>Periodo post-sísmico - Dislocación independiente falla F17.</i>	36
4.22.	<i>Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F18</i>	37
4.23.	<i>Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F19</i>	38
4.24.	<i>Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F20</i>	39
4.25.	<i>Periodo post-sísmico - Sumatoria desplazamientos superficiales</i>	40
4.26.	<i>Falla 1 - Simulación FEM</i>	41
4.27.	<i>Falla 1 - Geometría Triangle</i>	41
4.28.	<i>Falla 2 - Simulación FEM</i>	42
4.29.	<i>Falla 2 - Geometría Triangle</i>	42

4.30. <i>Falla 3 - Simulación FEM</i>	42
4.31. <i>Falla 3 - Geometría Triangle</i>	42
4.32. <i>Falla 4 - Simulación FEM</i>	43
4.33. <i>Falla 4 - Geometría Triangle</i>	43
4.34. <i>Falla 5 - Simulación FEM</i>	43
4.35. <i>Falla 5 - Geometría Triangle</i>	43
4.36. <i>Falla 06 - Simulación FEM</i>	44
4.37. <i>Falla 06 - Geometría Triangle</i>	44
4.38. <i>Falla 07 - Simulación FEM</i>	44
4.39. <i>Falla 07 - Geometría Triangle</i>	44
4.40. <i>Falla 08 - Simulación FEM</i>	45
4.41. <i>Falla 08 - Geometría Triangle</i>	45
4.42. <i>Falla 09 - Simulación FEM</i>	45
4.43. <i>Falla 09 - Geometría Triangle</i>	45
4.44. <i>Falla 10 - Simulación FEM</i>	46
4.45. <i>Falla 10 - Geometría Triangle</i>	46
4.46. <i>Falla 11 - Simulación FEM</i>	46
4.47. <i>Falla 11 - Geometría Triangle</i>	46
4.48. <i>Falla 12 - Simulación FEM</i>	47
4.49. <i>Falla 12 - Geometría Triangle</i>	47
4.50. <i>Falla 13 - Simulación FEM</i>	47
4.51. <i>Falla 13 - Geometría Triangle</i>	47
4.52. <i>Falla 14 - Simulación FEM</i>	48
4.53. <i>Falla 14 - Geometría Triangle</i>	48
4.54. <i>Falla 15 - Simulación FEM</i>	48
4.55. <i>Falla 15 - Geometría Triangle</i>	48
4.56. <i>Falla 16 - Simulación FEM</i>	49
4.57. <i>Falla 16 - Geometría Triangle</i>	49
4.58. <i>Falla 17 - Simulación FEM</i>	49
4.59. <i>Falla 17 - Geometría Triangle</i>	49
4.60. <i>Falla 18 - Simulación FEM</i>	50
4.61. <i>Falla 18 - Geometría Triangle</i>	50
4.62. <i>Falla 19 - Simulación FEM</i>	50
4.63. <i>Falla 19 - Geometría Triangle</i>	50
4.64. <i>Falla 20 - Simulación FEM</i>	51
4.65. <i>Falla 20 - Geometría Triangle</i>	51

Índice de tablas

4.1. <i>Sumatoria periodo cosísmico</i>	28
4.2. <i>Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F17</i>	29
4.3. <i>Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F18</i>	30
4.4. <i>Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F19</i>	31
4.5. <i>Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F20</i>	32
4.6. <i>Periodo co-sísmico - sumatoria dislocaciones independientes 17,18,19,20</i>	33
4.7. <i>Sumatoria periodo post-sísmico</i>	34
4.8. <i>Periodo post-sísmico - Dislocación independiente falla F17</i>	36
4.9. <i>Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F18</i>	37
4.10. <i>Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F19</i>	38
4.11. <i>Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F20</i>	39
4.12. <i>Periodo post-sísmico parcial, sumatoria F17 F18 F19 Y F20</i>	40

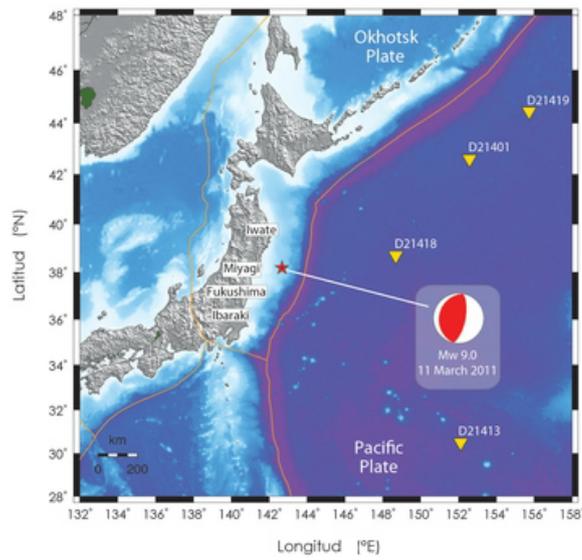
Capítulo 1

Antecedentes, zona de estudio y objetivos

1.1. Terremoto Tohoku-Oki 2011, Japón

El terremoto de Tohoku-Oki, oficialmente conocido como “Gran terremoto de Japón oriental del 11 de Marzo” ocurrió en la costa este de Japón, en la localidad de Honshu. Este evento tuvo una magnitud de 9.0 Mw y generó un maremoto que afectó a varios países que colindan con el océano pacífico, entre estos Chile. El epicentro se situó a 130 km de Sendai en la prefectura de Miyagi. En tanto el hipocentro se localizó a 32 km de profundidad según el catálogo de sismicidad “Global CMT”. El gran terremoto de Japón es hasta ahora el más grande registrado en dicho país y el 5to mayor en términos de liberación de energía hasta la fecha.

Previo al evento principal se registraron sismos de distintas magnitudes y dentro de estos el de mayor magnitud fue de 7.2 Mw. La agencia meteorológica de Japón (JMA) registró más de 500 réplicas mayores a 5 Mw en una región de 480 km (norte sur) por 200 km (este-este). Sobre el continente se registraron desplazamientos horizontales máximos en la dirección sureste de hasta 5.3 m y zonas de subsidencia máxima de 1.2 m [8]. En la Figura 1.1 se representa el evento principal ocurrido el 11 de marzo junto a su respectivo mecanismo focal a partir del catálogo “Global CMT”.

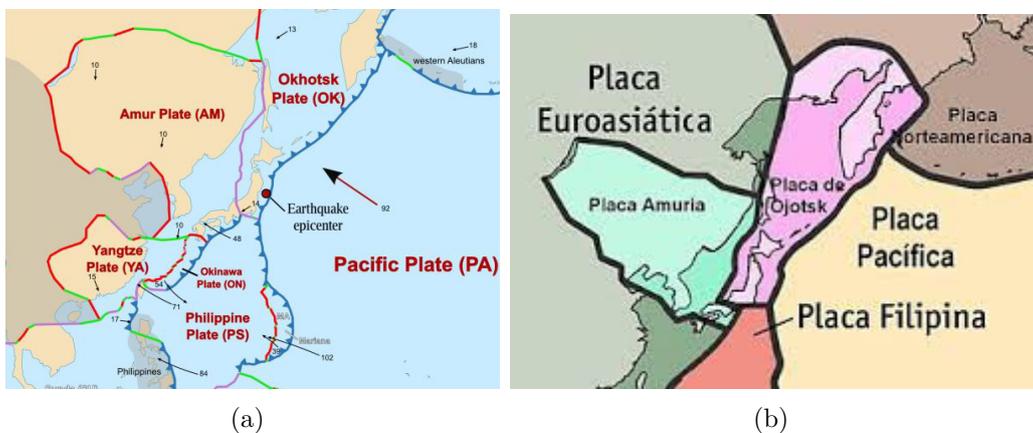


(a)

Figura 1.1: (a) Evento principal ocurrido el 11 de marzo junto a su respectivo mecanismo focal a partir del catalogo "Global CMT"

Japón interactúa al norte con la placa de Okhostk, al Este con la placa del pacifico, al sur con las placas Yangtze y Filipina, y al oeste con la placa de Amur. La mayor parte del territorio esta asentado sobre la placa de Okhostk. Estas placas son las responsables de la sismicidad y vulcanismo en Japón.

La placa del pacífico subducta a la placa a placa de Okhostk a una tasa de 9 cm por año (Figura 1.2). Lo anterior genera alzamientos y desplazamientos hacia el continente durante el periodo inter-sísmico. Durante el periodo co-sísmico se genera subsidencia y un cambio de dirección de desplazamiento hacia la fosa. Finalmente, durante el periodo post-sísmico los desplazamientos sobre el continente apuntan hacia la fosa, en tanto los desplazamientos de la corteza marina apuntan hacia el continente.



(a)

(b)

Figura 1.2: (a) Dirección de movimiento de las placas en la zona de subducción y (b) Ilustración de las 4 placas tectónicas que interactúan con Japón .

1.1.1. Repercusiones locales y globales asociados al terremoto

El terremoto de Japón generó un tsunami con olas de hasta 40 m de run up (altura vertical máxima sobre el nivel medio del mar) por lo que la mayoría de las localidades asentadas en el borde costero sufrieron daños [10]. Las estructuras anti-tsunami instaladas a lo largo de la costa fueron sobrepasadas por la altura de las olas. El tsunami generado por el terremoto dejó 3 plantas nucleares destruidas, la más afectada fue la planta Fukushima. Otro efecto asociado al terremoto fue el efecto de licuefacción de suelos. Este fenómeno se da en presencia de fuerzas externas que generan una transición del estado sólido al líquido. Por otro lado el centro geoespacial de Japón registro zonas de subsidencia en 8 vértices geodésicos con un rango que varía entre los 0.29 y 1.2 m respecto a mediciones hechas previas al terremoto [11].



Figura 1.3: Zona de licuefacción.

El tsunami generado por el terremoto de Tohoku-Oki inundó vastas áreas urbanas e industriales. En la figura 1.4 se muestran los distintos “run-up” y se comparan con otros tsunamis generados lejos de la costa de Japón como es el caso del terremoto de Valdivia en 1960. La región con mayor superficie inundada fue la región de Miyagi con 327 km cuadrados. A lo largo de la costa este de Honshu, desde Chiba hasta Aomori, el efecto del terremoto y el tsunami dejó aproximadamente 16.000 víctimas y otras 4.700 personas desaparecidas y su efecto combinado generó pérdidas estimadas de 309 billones de dolares [1].

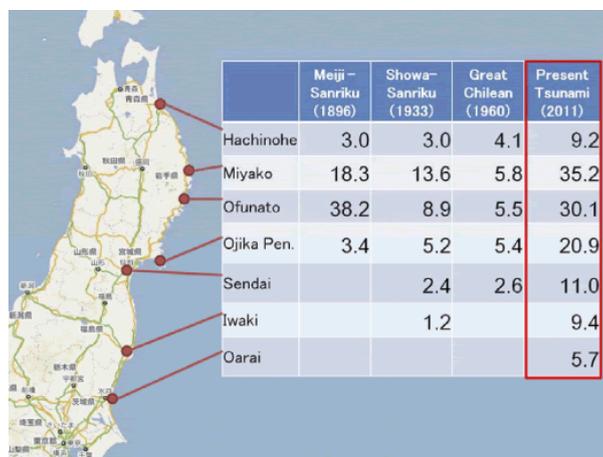


Figura 1.4: Run up en metros.

En la figura 1.5 se presenta un modelo de las distintas alturas de los frentes de ondas que se desplazan a través del océano pacífico. Chile se ve especialmente afectado por la propagación de ondas a diferencia de otros países de Sudamérica y Estados Unidos donde el efecto es menor.

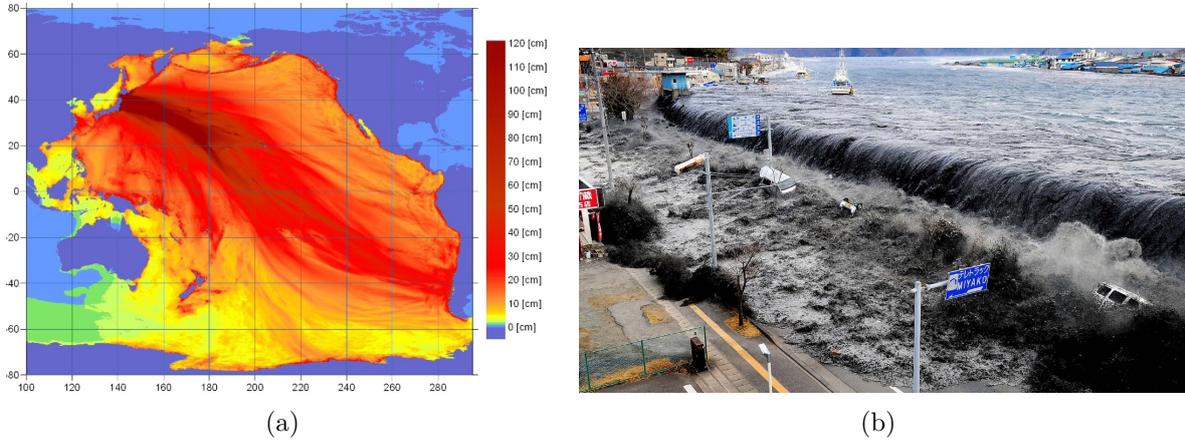


Figura 1.5: (a) Modelo de propagación del tsunami (NOAA) y (b) Maremoto generado por terremoto Tohoku-Oki.

Las repercusiones globales a raíz del terremoto de Tohoku-Oki incluyen cambios en el momento de inercia de la Tierra y la generación de un frente de olas que se propagó a través del océano pacífico afectando a países como Estados Unidos y a toda la costa de Sudamérica. El tsunami fue generado debido al efecto de émbolo ascendente que se produjo durante la liberación de energía durante el terremoto. Dado que el promedio de la profundidad del océano es aproximadamente 4.000 m y la velocidad de propagación depende básicamente de dos parámetros, la constante gravitacional “g” y la profundidad de la columna de agua, las velocidades de desplazamiento en mar adentro son de aproximadamente 700 km/h. A medida que el frente de ondas se aproxima a la costa, la forma de las ondas cambia producto de la batimetría y la disminución de la profundidad, lo anterior se compensa con una disminución de la velocidad y un aumento de la amplitud de la onda.

1.1.2. Descripción de estaciones GPS de Japón en el continente y fondo marino

Japón cuenta con una densa red de GPS llamada GEONET a cargo de la “Geographical Survey Institute” (GSI). La red geodésica cuenta con cerca de 1300 estaciones GPS las cuales se encuentran espaciadas cada 20 km de distancia y estas detectan desplazamientos de la corteza y envían información en tiempo real sobre la actividad sísmica o volcánica. La red cuenta con tres tipos de reportes dependiendo de la finalidad de los datos; Informe tipo Quik (3 horas de mediciones), informe Rapid (6 horas mediciones) e informe Final (una vez cada cada dos semanas). Los datos de las estaciones de la red GEONET son almacenados mediante el formato RINEX (Receiver Independent Exchange), este formato almacena de forma estandarizada la información proveniente de sistemas de posicionamiento global, en este caso GPS.

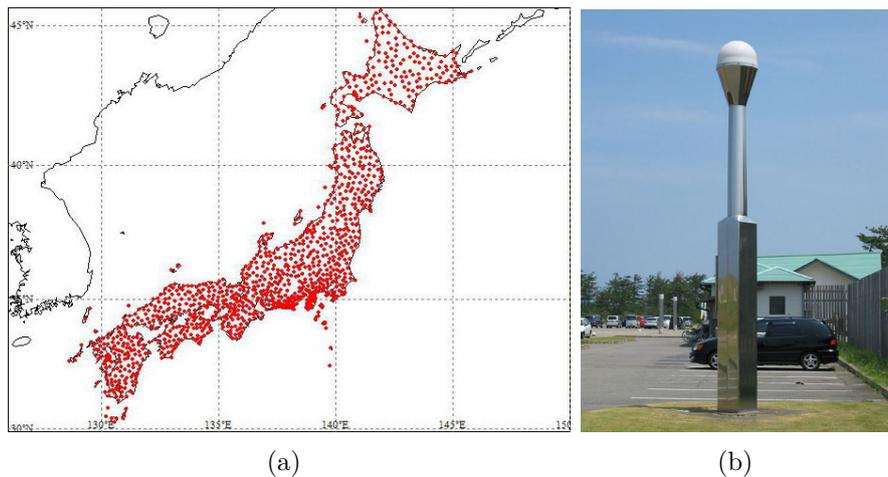


Figura 1.6: (a) Distribución espacial de las estaciones de GEONET y (b) Estación geodésica Japón.

Japón cuenta también con estaciones GPS submarinas, estas dependen de la “Japan Coast Guard ”(JCG) y la Universidad de Tohoku. Durante el terremoto de Tohoku-Oki se registraron desplazamientos de más de 50 m en la corteza oceánica, en tanto en el continente se registraron desplazamientos hasta 5 m [8].

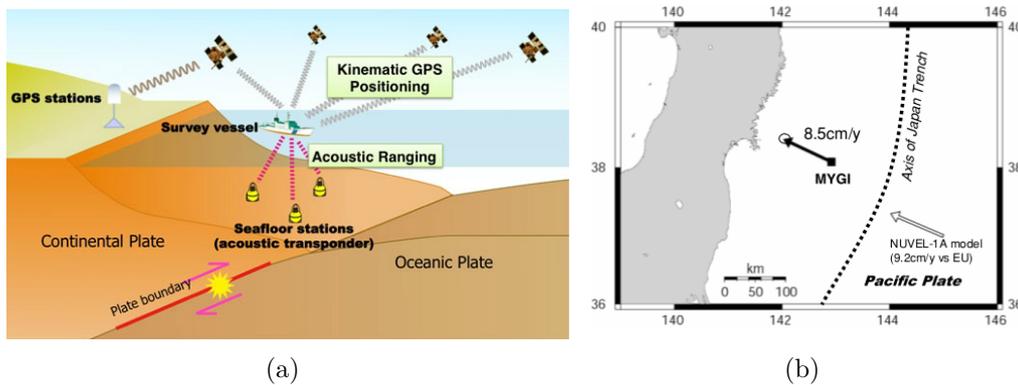


Figura 1.7: (a) Diagrama de funcionamiento GPS submarino y (b) estación submarina MYGI.

Los GPS submarinos miden el desplazamiento del fondo marino y las campañas de medición se realizan en un buque equipado con un GPS y un sensor de movimiento que resta el movimiento relativo del buque al momento de emitir y captar las señales provenientes de las estaciones GPS submarinas.

1.2. Objetivos

Este trabajo plantea probar la hipótesis de que es posible reproducir los desplazamientos observados en la superficie continental y el fondo marino a partir de dislocaciones en profundidad, considerando únicamente la componente elástica del problema (omitiendo la componente viscosa). Se pretende probar además que las fallas inversas generan un campo de desplazamiento que se manifiesta en la superficie como un movimiento en dirección hacia el océano durante el periodo co-sísmico y en el periodo post-sísmico en una falla normal en la parte inferior del slab, se generará un deslizamiento superficial en dirección hacia el continente.

1.2.1. Principal

- Llevar a cabo una simulación del proceso co-sísmico y post-sísmico mediante el método de elementos finitos (FEM) en la zona de subducción para el terremoto de Japón del 2011.

1.2.2. Específicos

- Generar una malla que represente la zona de subducción del terremoto de Tohoku-Oki e incorpore los distintos materiales con sus respectivos valores de rigidez y elasticidad.
- Evaluar la validez del método FEM usando una discretización de una falla en n-segmentos como una forma equivalente a usar de una sola unidad.
- Explorar usando el método FEM los distintos desplazamientos obtenidos en superficie a partir del uso de distintas discretizaciones y largos de falla.
- Encontrar la discretización que mejor se ajuste a los datos de las estaciones GPS del continente y el fondo marino.
- Explorar para el periodo co-sísmico y post-sísmico los mejores candidatos de deslizamiento tanto para las fallas inversas (en la parte superior del slab) y normales (en la parte inferior del slab) que se ajusten a los datos observados.

1.3. Zonas de estudio

La zona de estudio esta acotada por las coordenadas $[33^{\circ}, 41^{\circ}]$ y $[137^{\circ}, 145^{\circ}]$ de latitud y longitud respectivamente, se trata de una transecta que pasa a través de la prefectura de Miyagui. El perfil teórico de la imagen 1.8 se designó con 615 km en tanto en el modelo se hizo de 400 km para dar énfasis al modelamiento en el área de la corteza oceánica mas que en el continente.

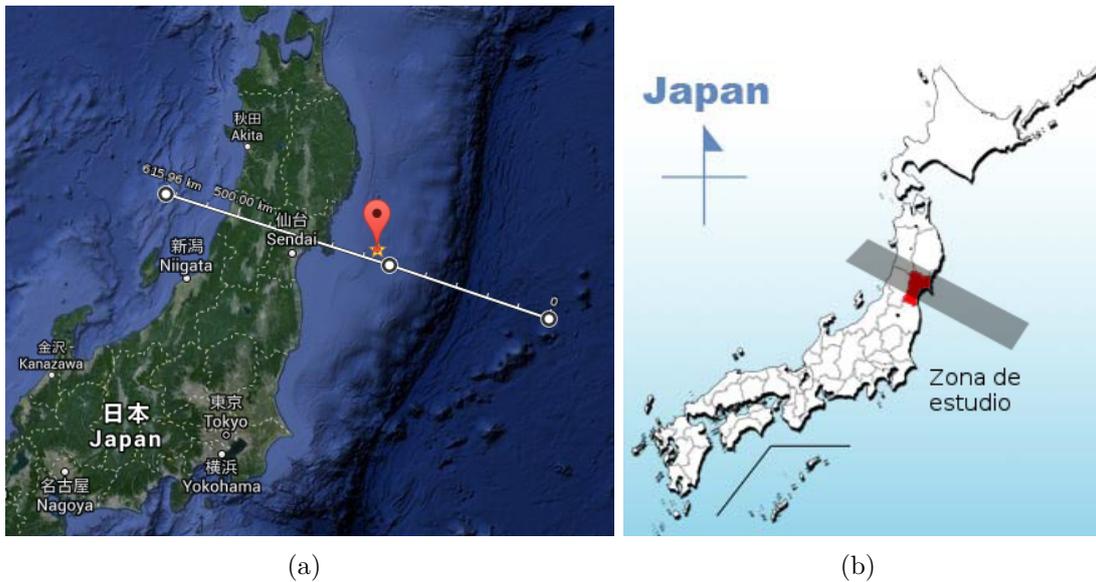


Figura 1.8: (a) Perfil 600 Km y (b) Zona de estudio.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Teoría de placas

La teoría de placas explica y unifica los distintos mecanismos y características geológicas observadas en el planeta: la formación de los distintos tipos de rocas, la distribución de terremotos y volcanes, el origen de los continentes y cuencas oceánicas, la distribución de fósiles animales y plantas, la génesis de montañas y finalmente la deriva continental.

La teoría de placas tiene su origen en la “Teoría la deriva continental” propuesta por Alfred Wegner en 1912, esta planteaba que todos los continentes en algún momento estuvieron juntos (en un super continente llamado Pangea) y que desde entonces han ido a la deriva. A pensar de que la teoría de Wegner fue desaprobada en aquel entonces, esta fue la primera vez que se introducía la idea del movimiento de placas en la comunidad científica. Wegner contaba con evidencia de registros fósiles de plantas y animales, distintos tipos rocas y observaciones de estructuras geológicas para dar robustez a su teoría, pero no fue sino hasta los años 50-60 cuando la teoría comenzó a ser aceptada. Lo anterior se debió principalmente a los resultados arrojados por los estudios paleomagnéticos y sísmicos de la época. Las observaciones evidenciaban zonas bien delimitadas en donde se concentraba la sismicidad y actividad volcánica, además la intermitencia de la dirección del campo magnético, registrada en rocas del fondo marino, resulto ser un antecedente que reforzó de la idea del movimiento de las placas.

La teoría de placas plantea que la superficie sólida de la Tierra (litosfera) está dividida en un número dado de piezas independientes llamadas “placas” y que estas flotan sobre un medio dúctil de menor rigidez llamado astenósfera, luego el movimiento de las placas sobre este medio dúctil es la responsable de las formaciones y procesos geológicos que se pueden observar en superficie. En las zonas delimitadas se logra distinguir tres tipos de márgenes; divergentes, transformantes y convergentes, de las cuales solo el último será de interés en el contexto de la tesis planteada.

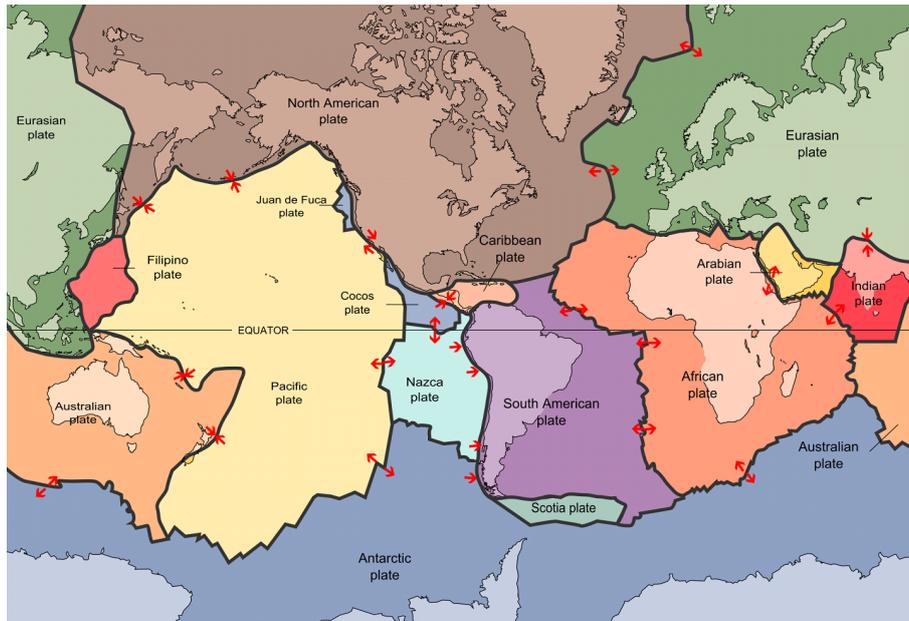


Figura 2.1: En la imagen se distinguen las distintas placas, estas interactúan de distinta forma siendo las zonas de subducción (márgenes destructivos) las que nos interesa en este estudio de la deformación co-sísmica y post-sísmica. Imagen del USGS)

2.2. Ciclo sísmico

El desarrollo del concepto de ciclo sísmico se remonta al terremoto de San Francisco de 1906 (7.9 Mw). A pedido especial del Carnegie Institute, Harry Fielding Reid desarrolló un marco teórico en base a observaciones de campo para poder explicar dicho evento. Reid examinó una base de datos de campo desde 1880 y a partir de ello, junto las observaciones del terremoto de 1906, logró revelar por primera vez la deformación superficial causada por un terremoto, que para este caso generó un desplazamiento superficial promedio de 4 a 5 m a lo largo de una falla de 450 km de longitud. A partir de la comparación de datos de campo de 1860 y 1880 y lo observado en 1906 propuso la teoría de rebote elástico (Teoría elástica de Reid). El ciclo sísmico se divide en tres etapas basadas en el régimen de deformación observada varia:

2.2.1. Periodo inter-sísmico

En este periodo, la deformación en la zona de contacto, se acumula sostenidamente a lo largo del tiempo entre un terremoto y otro. Puesto en un ambiente de subducción, esto se refiere al tiempo en que la placa oceánica se mantiene acoplada con la placa continental sin poder deslizarse libremente. Los tiempos de acumulación de energía en este periodo varían y no son periódicos, pero sí reiterativos. El campo de desplazamiento durante este periodo se dirige desde la fosa hacia el continente y las velocidades de convergencia en promedio se mantienen constantes, pero varían según el lugar en donde se lleve a cabo la observación. La velocidad de desplazamiento de una estación en la costa es mayor que una estación ubicada en la cordillera donde la deformación es menor.

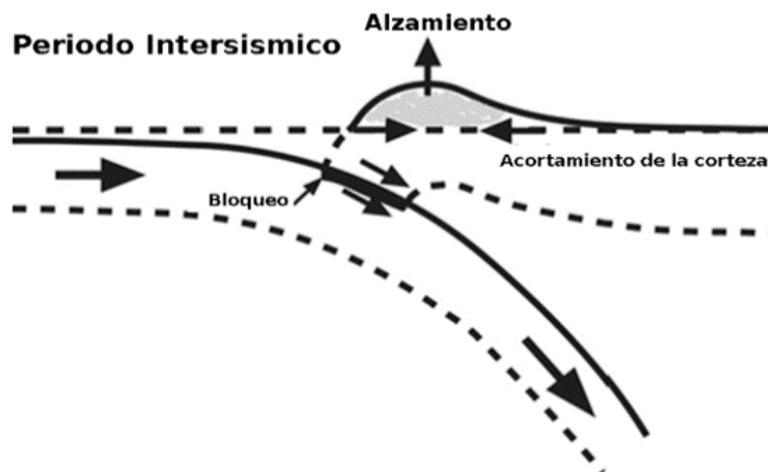


Figura 2.2: Durante el periodo intersísmico, debido al bloqueo en profundidad de las placas, la corteza continental comienza con un proceso de compresión y deformación con aumento de la elevación esto último se observa mediante el uso de GPS y es un proceso que puede tomar de años a décadas. Para los mega terremotos, este proceso puede tomar siglos de acumulación de deformación antes de liberar energía.

2.2.2. Periodo co-sísmico

En este periodo, específicamente en la zona de contacto, se produce una dislocación en donde se libera una gran cantidad de energía en un breve lapso de tiempo (segundos a minutos). Debido a la dislocación ocurrida en profundidad el campo de desplazamiento superficial invierte su dirección de desplazamiento que tenía durante el periodo intersísmico y el movimiento de la superficie continental y el fondo marino se dirigen en dirección a la fosa. Durante este periodo se observa también los fenómenos de subsidencia y alzamiento. La subsidencia, al igual que el alzamiento (up-lift), son el resultado de la liberación abrupta de energía y se manifiestan como un hundimiento y alzamiento de la superficie a lo largo del largo de la falla. Una vez que concluye la liberación de energía del terremoto y el el stress es liberado, la corteza superficial comienza a acumular energía elástica que en un siguiente evento sísmico se liberará.

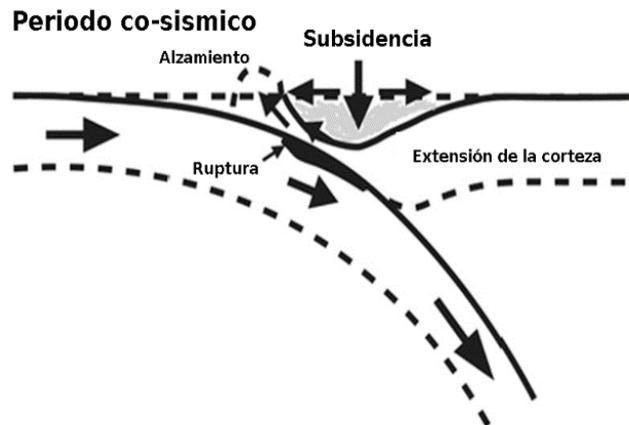


Figura 2.3: La liberación de energía se produce en una ventana muy acotada de tiempo respecto al periodo de acumulación, en solo minutos se puede liberar la energía acumulada en años. Al momento de la ruptura, en la zona costera, se observa un fenómeno de subsidencia

2.2.3. Periodo post-sísmico

Este periodo comprende la evolución de la corteza continental y oceánica justo después de haber culminado el periodo co-sísmico y se extiende hasta el inicio del periodo intersísmico. En este periodo se genera un deslizamiento en la zona de contacto que se prolonga por días, meses y años luego de ocurrido el evento principal. Las fallas que experimentan una ruptura significativa, usualmente siguen acomodándose hasta volver al régimen de acumulación de deformación del periodo intersísmico. Cabe destacar que solo después del terremoto de Tohoku-Oki el 2011 se sabe que la evolución de la velocidad y dirección de los vectores de desplazamiento superficial (sobre el continente y el fondo marino) difieren. Lo anterior se explica por dos fenómenos de after slip y relajación viscoelástica del manto.

2.3. Modelos de subducción

Los modelos de subducción son una aproximación idealizada de los procesos físicos que están inmersos en la interacción y movimiento de las placas tectónicas. Un modelo de subducción permite estimar la cantidad de deslizamiento en la falla a partir de un campo de desplazamiento observado mediante o bien calcular el campo de desplazamiento superficial (usando métodos numéricos como FEM) a partir de la imposición de una geometría de subducción específica, valores de rigidez y la cantidad de deslizamiento impuesta en la falla. Existen al menos 2 modelos que se usan para explicar deformación elástica observada.

2.3.1. BSM (Back Slip Model)

El modelo mas usado para explicar la deformación intersísmica es el BSM (Back Slip Model, Savage 1983). Este explica la deformación elástica de la zona de contacto como la interacción de dos bloques donde uno de ellos se desliza sobre el otro con un mecanismo de falla normal y asume que la deformación inducida será equiparada en algún momento mediante un movimiento de falla inversa durante el periodo co-sísmico.

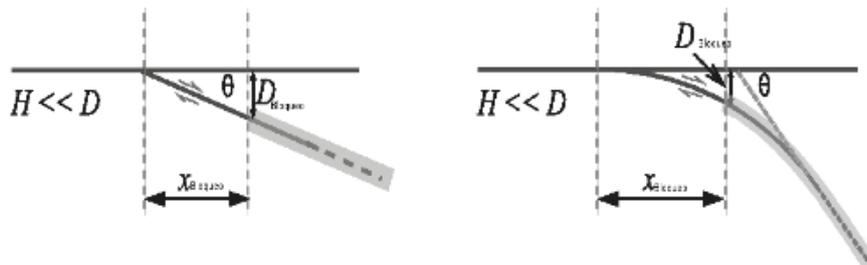


Figura 2.4: Modelo con espesor de slab $H=0$

2.3.2. ESPM (Elastic subducting Plate Model)

El modelo “Elastic subducting Plate Model” (ESPM, Kanda-Simons 2010) es una generalización para las distintas familias de soluciones que puede tener una geometría de subducción si se hace variar el espesor de la placa subductante (h). Para el caso en el que el espesor de la placa que subducta es cero ($h=0$) se tiene como modelo el caso particular el BSM.

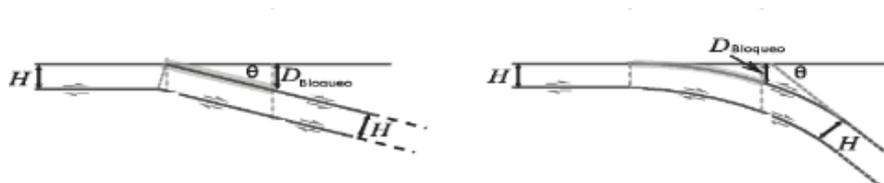


Figura 2.5: Modelo con espesor de slab H

Capítulo 3

Metodología

3.1. Elaboración de modelo de subducción y discretización del espacio mediante Triangle

Triangle es un software escrito en el lenguaje C que genera mallas bidimensionales mediante triangulaciones de Delaunay. La calidad de las triangulaciones se mejora mediante el uso de un algoritmo de refinamiento (algoritmo de Ruppert). Este algoritmo evita que existan ángulos muy pequeños en las triangulaciones lo cual mejora la calidad de la malla. El refinamiento de Delaunay es una técnica que permite generar una malla de triángulos en interpolaciones, métodos de elementos y volúmenes finitos. Triangle genera mallas con distintas densidades y dimensiones en función de las características de la zona de estudio. El programa permite crear mallas a partir de archivos de extensión poly, estos están compuestos por coordenadas (x,y), número de vértices, segmentos y las especificaciones sobre la densidad de mallado.

Lo primero consiste en diseñar una geometría a partir de la definición de un conjunto de nodos que poseen una conexión específica entre ellos. La precisión del cálculo depende del número de nodos que se elija para formar la malla, un mayor número de elementos en la malla se traduce en mas ecuaciones a resolver y esto a su vez conlleva mas cálculos y tiempo de resolución. Debido a lo anterior se determina un número de elementos óptimo de tal forma que se pueda obtener una precisión adecuada para el problema dentro de un tiempo y capacidad de cálculo computacional razonable.

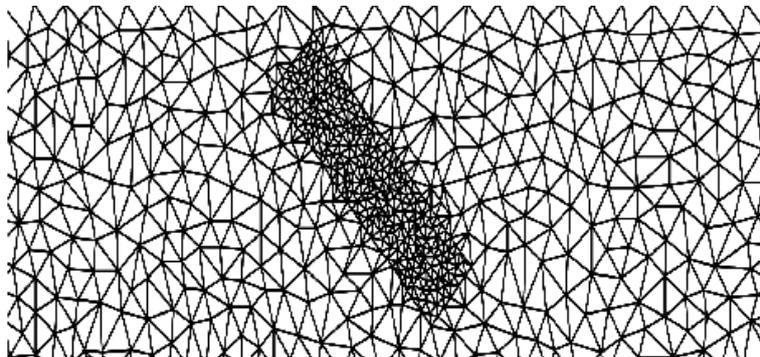


Figura 3.1: Malla formada por triángulos adyacentes, imagen generada en el software Triangle

3.1. ELABORACIÓN DE MODELO DE SUBDUCCIÓN Y DISCRETIZACIÓN DEL ESPACIO MEDIANO

Una vez establecidas las coordenadas de los nodos y definidas las conexiones entre cada punto se lleva a cabo el proceso de formación de la malla. El programa al momento de hacer el cálculo, arroja el número de nodos, segmentos y dominios creados. En la figura 3.2 se muestra una estructura con dos densidades de puntos, se distingue una falla que esta inscrita en un rectángulo. La falla se representa como un segmento que esta al interior del rectángulo y esto es un requisito del programa para poder referenciar cual es el bloque superior e inferior al momento de realizar la simulación de dislocación de una falla.

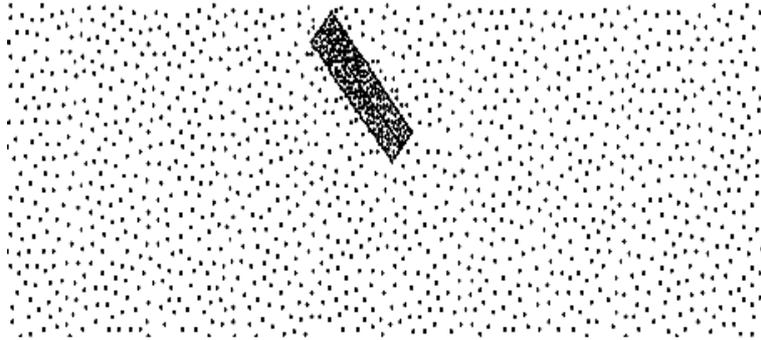


Figura 3.2: Red de nodos que conforman la geometría de la malla triangular, imagen generada en el software Triangle..

La densidad de la malla esta en función de la cantidad de nodos usados, podemos ver la comparación entre dos mallas en donde el número de nodos y dominios son distintos. A continuación se muestra como el programa Triangle puede ir de una baja densidad a una alta densidad redefiniendo la cantidad de nodos y relaciones entre estos.

a) Caso de baja densidad de triangulaciones:

- Numero de nodos de Malla : 28.778
- Numero triángulos de la malla : 54.220
- Memoria usada para modelacion con FEM : 57.83 Mb

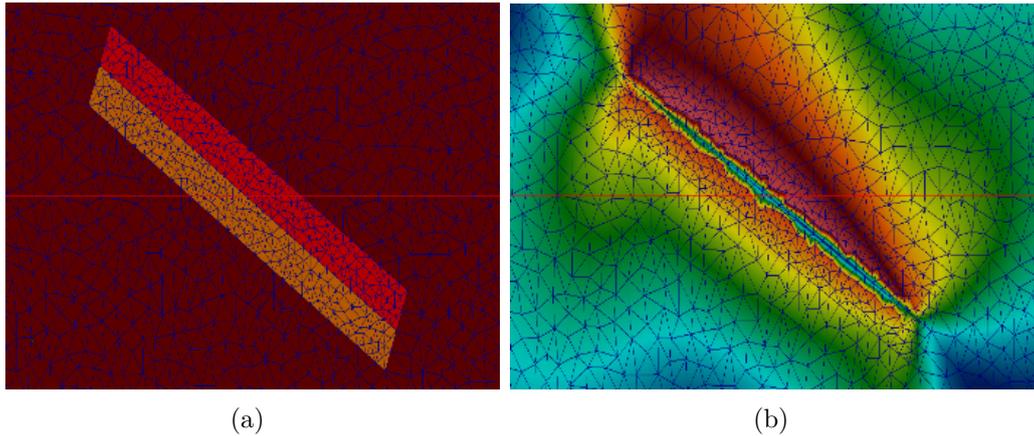


Figura 3.3: (a) Malla de rectángulo que inscribe a la falla y muestra los distintos materiales con distintos colores (b) Simulación FEM y el campo de desplazamiento generado.

b) Caso de alta densidad de triangulaciones:

- Numero de nodos de Malla : 32.043
- Numero triángulos de la malla : 60.735
- Memoria usada para modelación con FEM : 65.15 Mb

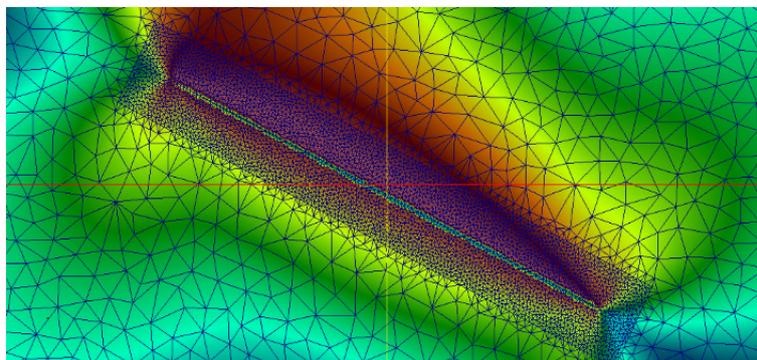


Figura 3.4: Malla elaborada con un mayor numero de nodos. Los triángulos que se forman en la malla, especialmente dentro de la zona rectangular son tan pequeños que no es posible distinguirlos sin hacer un zoom.

3.2. Estimación del desplazamiento elementos finitos (FEM)

El método de elementos finitos es un método numérico que permite obtener una solución aproximada a un problema físico llevando el problema de un medio continuo a uno discreto. En este caso de estudio se aplica el método FEM para calcular el campo de desplazamiento superficial sobre el continente y el fondo oceánico de la zona de subducción de Japón a partir de la imposición de un número determinado de fallas normales en la parte inferior del slab. El método se caracteriza por dividir el dominio en un gran número de dominios independientes, esto se conoce como discretización del espacio. Cada dominio independiente dentro de la malla está compuesta por la unión de 3 puntos que dan origen a un área de forma triangular, estos puntos se denominan nodos. Los nodos determinan la posición espacial de cada dominio y el desplazamiento es una función de la variación de ellos. El número de dominios de la malla puede variar según la cantidad de nodos que se use; mientras mayor sea el número de nodos, mayor es el número de dominios en la malla y lo mismo ocurre para el caso opuesto.

El tratamiento matemático del FEM busca un sistema de ecuaciones que describa el sistema en su totalidad. Se empieza con una relación básica que expresa el desplazamiento de los nodos como una función de las coordenadas (x,y) de estos.

$$D_i(x, y) = A + B * x + C * y \quad (3.1)$$

La expresión de la ecuación 3.1 representa el desplazamiento de cualquier nodo independiente i dentro de la malla. La malla usada en la aplicación del FEM usa dominios triangulares formados por 3 nodos cada uno. El desplazamiento de un dominio triangular individual se obtiene a partir del desplazamiento de sus tres nodos.

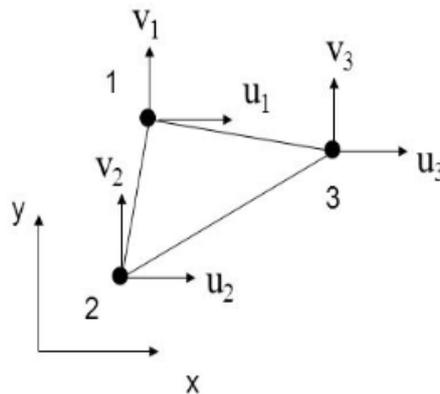


Figura 3.5: Esquema del dominio triangular, base para la generación de la malla usando un sistema de referencia (x,y) . Se muestran los nodos 1,2 y 3 (Nodo1= (x_1,y_1) , Nodo2= (x_2,y_2) , Nodo3= (x_3,y_3)) y sus respectivos desplazamientos; (u_1,v_1) , (u_2,v_2) , (u_3,v_3) .

El sistema de ecuaciones que describe el desplazamiento de un dominio triangular individual esta dado por la siguiente expresión:

$$F_1(x_1, y_1) = K_{11} + K_{12}u_1(x_1, y_1) + K_{13}v_1(x_1, y_1)$$

$$F_2(x_2, y_2) = K_{21} + K_{22}u_2(x_2, y_2) + K_{23}v_2(x_2, y_2)$$

$$F_3(x_3, y_3) = K_{31} + K_{32}u_3(x_3, y_3) + K_{33}v_3(x_3, y_3)$$

En donde,

- F_i : Fuerzas externas aplicadas al sistema
- $K(i, j)$: Constante de rigidez en la coordenada (i,j)
- u : Desplazamiento en la dirección i
- v : Desplazamiento en la dirección j

De esta manera se describe el desplazamiento de cada nodo como una función de su posición en las coordenadas “x” e “y”. Cuando se quiere describir el campo de desplazamiento :

$$F_i = [K][X] \quad (3.2)$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_i \\ F_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & K_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Al operar la matriz para obtener el desplazamiento se multiplica matricialmente por un factor conveniente ,

$$\begin{aligned} [K]^{-1}[F] &= [K][X][K]^{-1} \\ [X] &= [F][K]^{-1} \end{aligned}$$

Una vez que se establecen todas las matrices de rigidez de la malla (una para cada dominio triangular de la malla) se construye la matriz global. La matriz global de rigidez del sistema representa la respuesta del sistema ante alguna perturbación externa, con esto es posible calcular los desplazamiento generados a partir de distintas fuerzas o dislocaciones aplicadas al sistema.

Todos los nodos en la malla tienen 2 grados de libertad en el dominio (x,y) a excepción de los contornos del problema en donde se impone una condición de movilidad. Lo anterior se conoce como condiciones de borde y deben ser incluidos en la descripción física/matemática del problema de tal forma que la solución del problema quede únicamente definida (de otra manera se obtiene una familia de soluciones). Finalmente para calcular los desplazamientos se deben especificar las propiedades elásticas del material y que tipo de perturbación se aplica al sistema, en este caso una dislocación en profundidad.

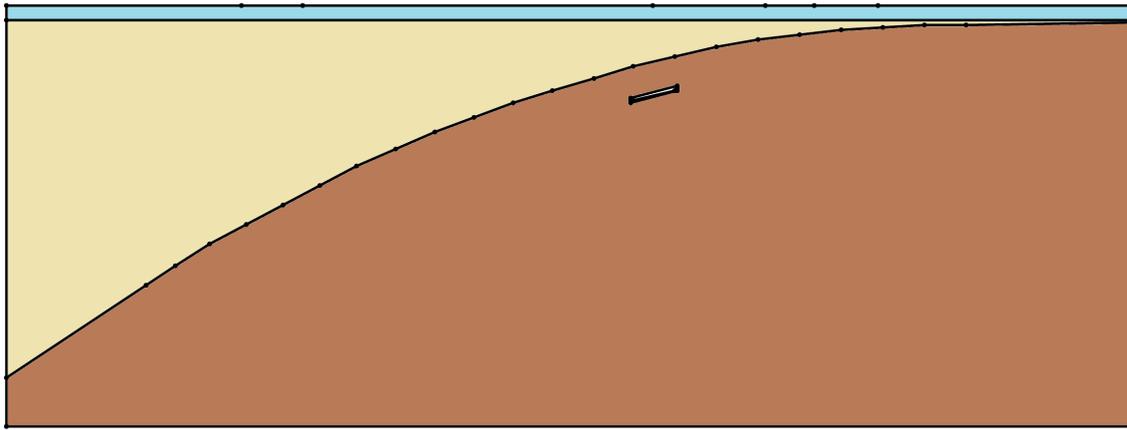


Figura 3.6: En la imagen se muestra la geometría de subducción de Japón, se distingue el slab de subducción, una corteza superficial de espesor “h” y una zona de ruptura en la parte inferior representada por un rectángulo que inscribe la falla. Las condiciones de borde del problema quedan establecidas para los límites laterales y el límite inferior, la superficie mantiene los dos grados de libertad al igual que el interior.

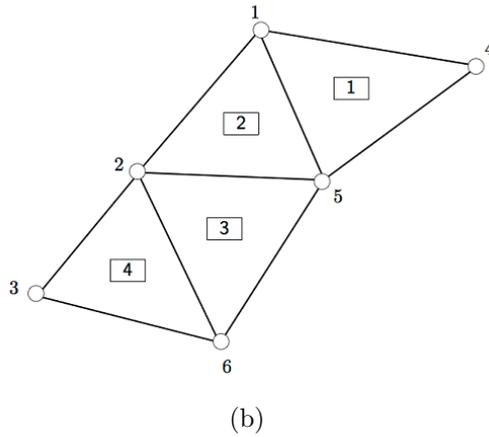
Las relaciones de adyacencia relacionan los dominios dentro de la malla, es decir, toman en cuenta la interacción de cada dominio con su vecindad y a partir de esto es posible definir la matriz de rigidez del sistema. La matriz de rigidez $[K]$ representa la respuesta unificada del sistema ante alguna cualquier forzante en la ecuación (3.4), luego la representación del sistema queda expresado de la siguiente forma:

$$F = [K]u \quad (3.4)$$

En donde:

- F es el forzante.
- K la matriz de rigidez.
- U el campo de desplazamiento.

A continuación, a modo de ejemplo, se expone un caso de una malla formada por 4 dominios que a su vez esta compuesta de 6 nodos. Las relaciones de adyacencia quedan descritas por la matriz $K(i,j)$

$$\begin{array}{c}
 \begin{matrix}
 k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\
 k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\
 k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\
 k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\
 k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\
 k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66}
 \end{matrix}
 \begin{matrix}
 \left[\begin{matrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{matrix} \right] = \left[\begin{matrix} f_{1x} \\ f_{1y} \\ f_{2x} \\ f_{2y} \\ f_{3x} \\ f_{3y} \end{matrix} \right]
 \end{matrix}
 \end{array}
 \quad (a)$$


(b)

Figura 3.7: (a) Se muestra el sistema matricial que representa la matriz de rigidez global para el conjunto de 4 dominios definido por 6 nodos.

De la figura (3.7) se forma una matriz de rigidez de 36 elementos, esta se obtiene mediante el calculo independiente de todas las matrices de rigidez asociadas a cada dominio para luego integrarla a una gran matriz que considere todas las relaciones de adyacencia, de esta forma se pueden hacer cálculos que consideren mallas que contengan miles de dominios independientes. El número de triángulos (dominios) y nodos en las mallas elaboradas en esta tesis están en el orden de 100.000 dominios independientes por lo que en términos de cálculos es significativo y limita la resolución de los resultados en función de la capacidad de procesamiento del pc usado para este fin.

3.3. Manipulación de datos de estaciones GPS y elaboración de transecta comparativa

Para comparar el desplazamiento superficial observado en el continente y el fondo marino respecto a los desplazamientos calculados por el método de elementos finitos (FEM) del periodo co-sísmico y post-sísmico, se consideran 6 estaciones GPS; 4 estaciones en el fondo marino (GJT3, KAMS, MYGI, MYGW) y 2 en el continente (Estación 037 y Estación 0174).

Para el periodo co-sísmico se extraen 4 datos de desplazamiento superficial de las estaciones del fondo marino a partir de los datos publicados en el estudio *Co-Seismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M 9.0) refined by means of seafloor geodetic data* [6]. El estudio no posee desplazamientos superficiales para las estaciones sobre continente durante el periodo post-sísmico por lo que se omite la comparación de los desplazamientos observados en las estaciones 037 y 174 y la simulación con FEM.

En tanto, para el periodo post-sísmico se extraen datos de desplazamiento superficial de 6 estaciones a partir de la publicación *Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake* [7].

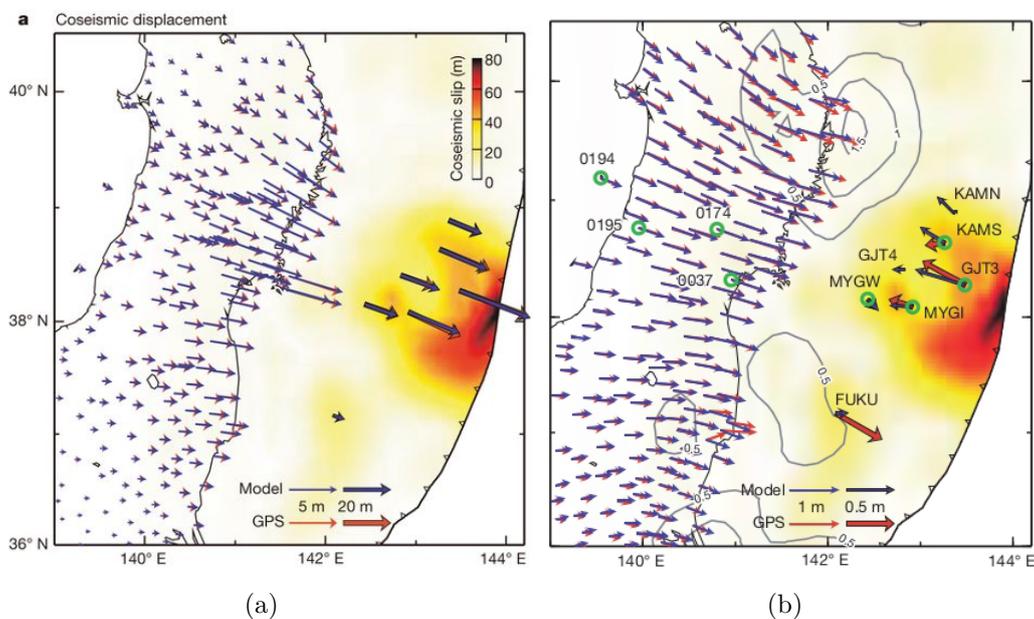


Figura 3.8: Publicación *Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake*: (a) Periodo co-sísmico (b) Periodo post-sísmico.

Para comparar los desplazamientos superficiales observados con los calculados por el FEM se usa un perfil de la zona de subducción. Se traza una línea que pasa a lo largo de las 6 estaciones que se consideran en este estudio, luego se procede a trasladar la posición de las estaciones sobre la línea obtenida de tal forma que la distancia de la estación a la línea sea la menor.



Figura 3.9: Vista superior de la recta que pasa a través de las 6 estaciones referenciales usadas para realizar la comparación de los desplazamientos superficiales observados y los calculados por mediante el método FEM.

La recta obtenida en la descripción anterior se usa como base referencial para posicionar las 6 estaciones consideradas en el estudio. La recta en donde se encuentran colapsadas las estaciones se proyecta en profundidad como un perfil de subduccion que abarca desde las cosas de Japón hasta la fosa.

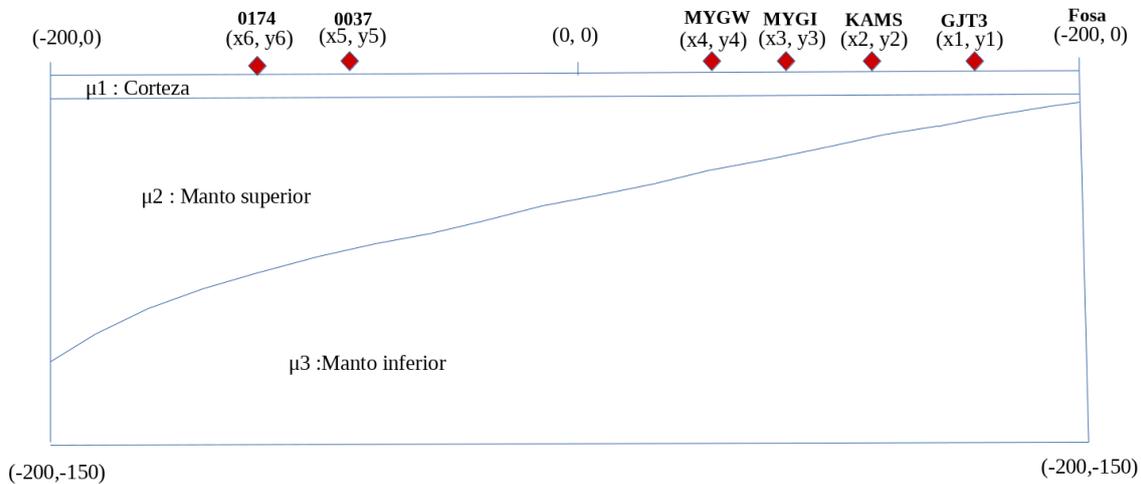


Figura 3.10: Imagen ilustrativa de la distribución de las estaciones GPS sobre el continente y el fondo marino. Se distinguen los distintos valores de rigidez para cada estrato (corteza, manto superior y manto inferior)

Una vez que las estaciones están ubicadas sobre una línea recta es posible diseñar una malla que represente un perfil de la zona de subducción considerando las distintas rigideces de cada zona y la posición de las estaciones de interés.

3.4. Visualización de datos en Paraview

Paraview es un programa de código libre que se usa para analizar y visualizar datos. Mediante esta aplicación se puede analizar los datos usando métodos cualitativos y cuantitativos. El programa también permite una interacción tridimensional sobre los datos. Una ventaja de este programa consiste en la habilidad de analizar bases de datos muy grande, este programa puede correr desde un computador personal hasta un cluster.

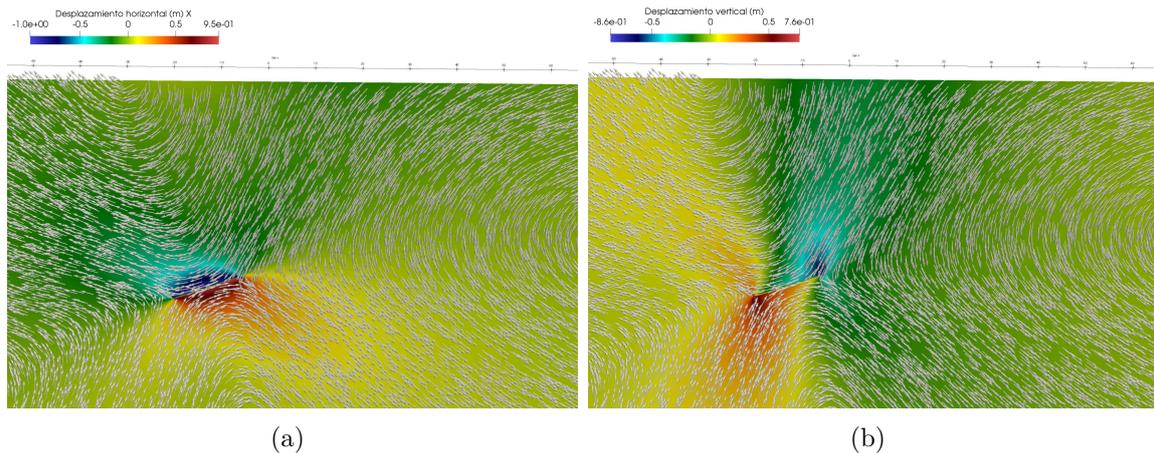


Figura 3.11: (a) Campo de desplazamiento de la componente horizontal y (b) Campo de desplazamiento de la componente vertical

En la figura 3.11 se muestra una falla normal y el campo de desplazamiento asociado a cada una de sus componentes (horizontal y vertical). En la figura (a) en la componente horizontal el bloque superior se desliza hacia la izquierda (en azul), en tanto el bloque inferior hacia la derecha (en rojo). En la figura (b) la componente vertical muestra como es mayor la contribución hacia abajo.

El campo de desplazamiento es mayor mientras mas intensa sea la coloración. Adicionalmente de la representación cuantitativa de la dislocación se ve un campo vectorial indicando la dirección predominante del movimiento para cada caso.

Con el fin de obtener datos modelados que puedan ser comparados con las observaciones GPS hechas en el continente y el fondo marino, se genera un conjunto de fallas independientes para poder estimar la deformación superficial debido a un segmento o un movimiento completo del slab en la región.

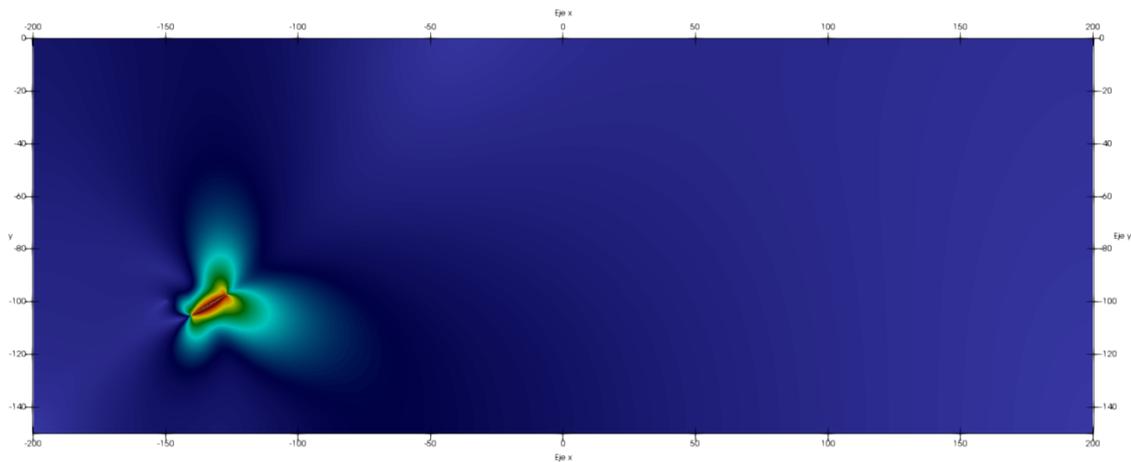


Figura 3.12: *Ejemplo de dislocación generada usando el software Malla-Elast para una zona de subducción*

En la figura 3.12 se muestra un ejemplo de dislocación generada usando el método FEM en base a una malla generada en el programa Triangle. La malla de la zona de subducción intencionalmente no se muestra y solo los desplazamientos calculados a partir de los distintos parámetros que se entregan para ejecutar la simulación (coeficientes de rigidez de los materiales, slip, dip y cantidad de deslizamiento impuesto en la falla). Como se esperaba, al generar el desplazamiento sobre la falla se genera un patrón de radiación de doble cupla (con una forma de pétalo de flor) y los desplazamientos migran hacia la superficie en donde luego se extraen para luego hacer las comparaciones con las estaciones GPS.

El procedimiento para obtener el campo de desplazamiento superficial empieza con la generación de la malla que representa la zona de subducción (usando los programas Malla y Triangle). Una vez que se tiene representada la zona de subducción se introducen al modelo todos los parámetros de rigidez de las distintas zonas que conforman la malla, esto queda establecido en un archivo independiente que luego es llamado por el programa principal (se usa el programa Elast y datos almacenados en el archivo input). El resultado del trabajo con el mallador y la solución que obtiene el método numérico para cada dislocación genera un archivo de extensión vtk que luego puede usarse para extraer los desplazamientos en los puntos o segmentos de interés.

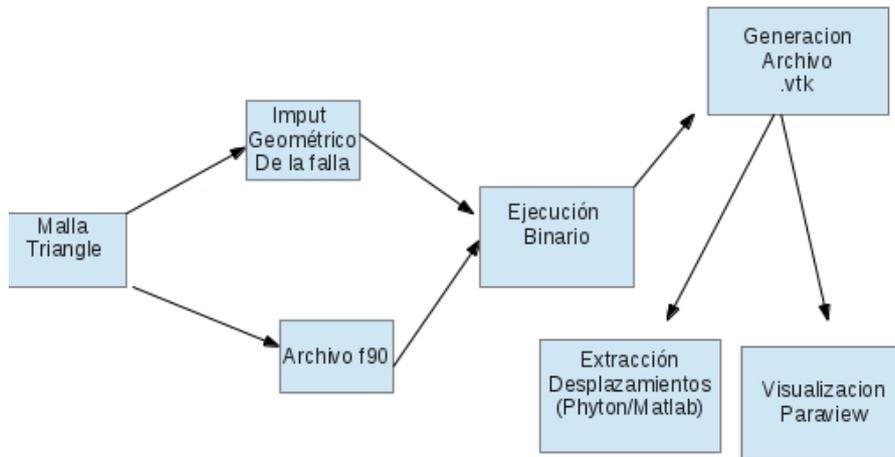


Figura 3.13: Diagrama de flujo del proceso

Para tener acceso a los datos de desplazamiento en la superficie como un archivo independiente se modificó el programa Elast con el fin de referenciar todos los puntos que estuvieran en la superficie. Luego, cada simulación generada crea un archivo que contiene el conjunto de todos los desplazamientos en los puntos del espacio que satisfacen la condición ($y=0$). Para poder comparar los resultados obtenidos entre la simulación y las observaciones se hace una búsqueda manual en el archivo antes mencionado de las coordenadas superficiales que coinciden con las coordenadas de las estaciones en donde se realizan las observaciones y se extrae el desplazamiento calculado.

Con el software Paraview se pueden distinguir los distintos materiales de la zona de subducción y además se puede visualizar el campo de desplazamiento que genera cada dislocación en torno a ella. Esta metodología de trabajo permite generar múltiples dislocaciones en fallas de manera sistemática, de forma tal que se logra hacer una exploración completa del comportamiento de las fallas con distintos valores de deslizamiento en distintas áreas de la zona de subducción.

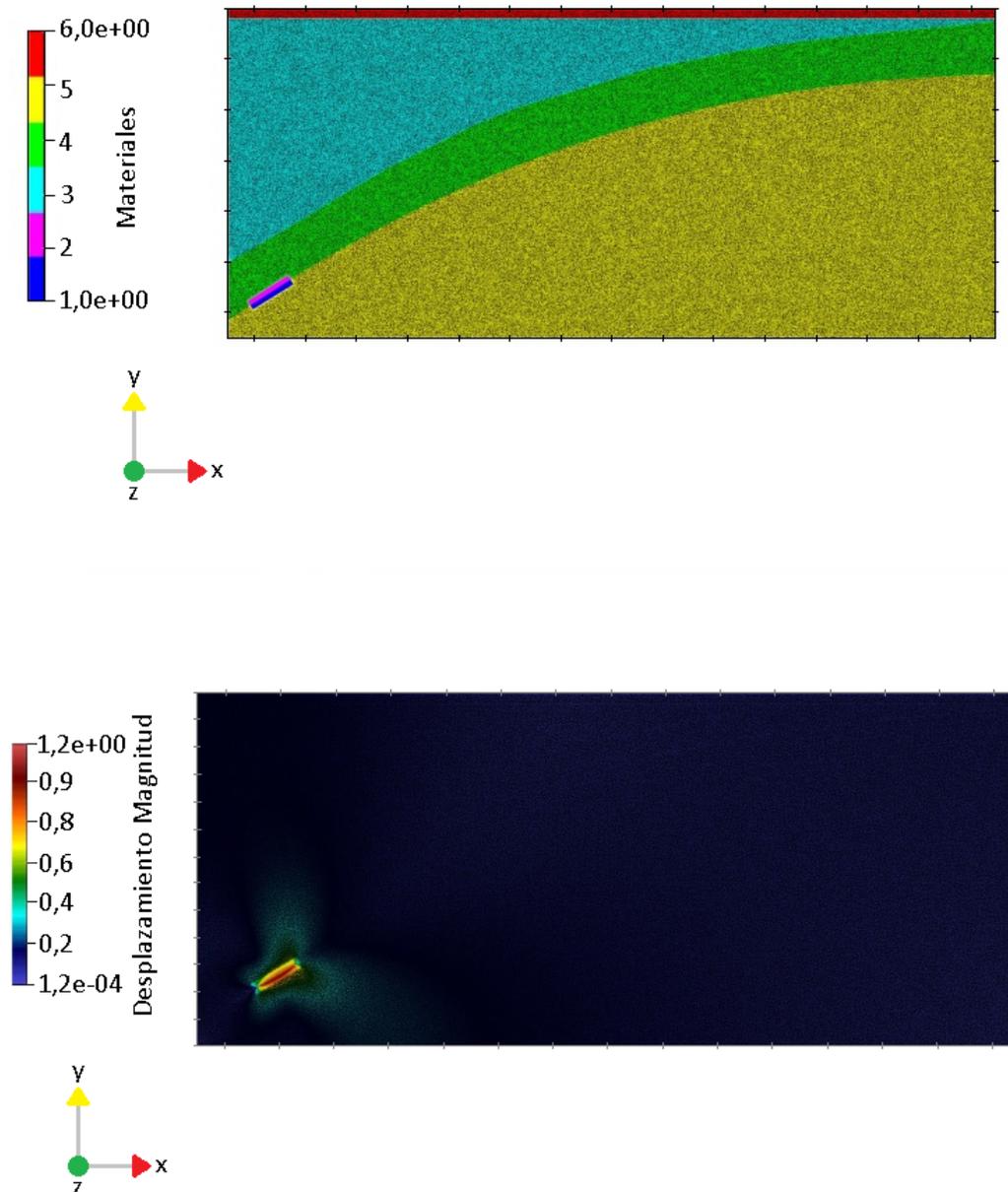


Figura 3.14: La imagen superior muestra los distintos materiales de la zona de subducción que tienen valores de rigidez independiente y más abajo en la imagen inferior el campo de deformación con una escala de colores

Capítulo 4

Resultados

4.1. Test de validación

4.1.1. Test de validación de equivalencia usando distintas distancias desde la falla hasta la periferia del rectángulo que la inscribe.

Las fallas se representan como segmentos que se ubican dentro de un área rectangular que la contienen. Las distancias entre la falla y la periferia de los rectángulos que las inscriben pueden variar según uno lo establezca. Para comprobar y validar que los resultados de desplazamiento de una simulación con elementos finito FEM no cambie al modificar la distancia entre la falla y su periferia se presentan dos casos que muestran resultados de desplazamiento superficial iguales usando distancias falla-periferia. El programa de simulación numérica Elast, usa el método de elementos finitos y usa como variables de entrada información de la falla expresada en coordenadas. Las coordenadas de la falla se expresan con dos puntos; un punto inicial y un punto final. Los puntos que rodean a la falla y que conforman la periferia de su entorno quedan definidos con 6 puntos. La distancia que se elige para inscribir a la falla se define en la elaboración de la malla, por ende, el área de los dos rectángulos que se generan al establecer la posición de los 6 puntos depende de la posición espacial de estos. A partir de la comparación de los resultados de desplazamiento superficial se concluye que el área de los rectángulos que rodean a la falla (que son los que se mueven uno respecto a otro en la simulación de una dislocación local), no afectan los resultados de la simulación, es decir, los desplazamientos superficiales son los mismos.

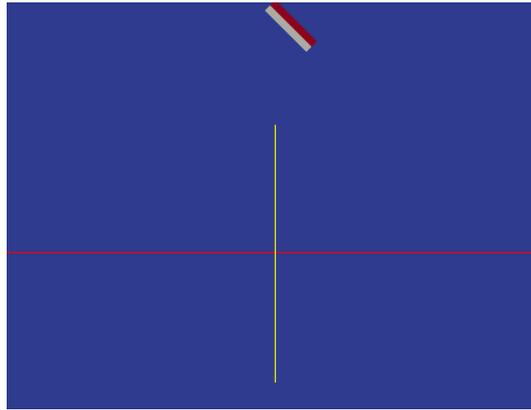


Figura 4.1: *Falla inmersa en un semi-espacio homogéneo e isotrópico. Los 2 bloques rectangulares (rectángulo superior rojo y blanco inferior) que contienen a la falla pueden ser diseñados de tal forma que tengan una distancia arbitraria desde el contorno del bloque hasta la falla.*

El diseño de la malla contempla la elección de densidad del medio en términos del número de triángulos por unidad de espacio y la ubicación espacial de los nodos que conforman la geometría de subducción. La imagen inferior muestra un bloque dividido en dos rectángulos simétricos en se encuentra inmersa la falla. Los puntos que representan la falla se encuentran sobre la interfaz que separa a los dos bloques, cabe destacar que la falla no tiene sus extremos en la periferia sino que estos están adentro a una distancia equivalente a la distancia entre la interfaz y la periferia de uno de los rectángulos.

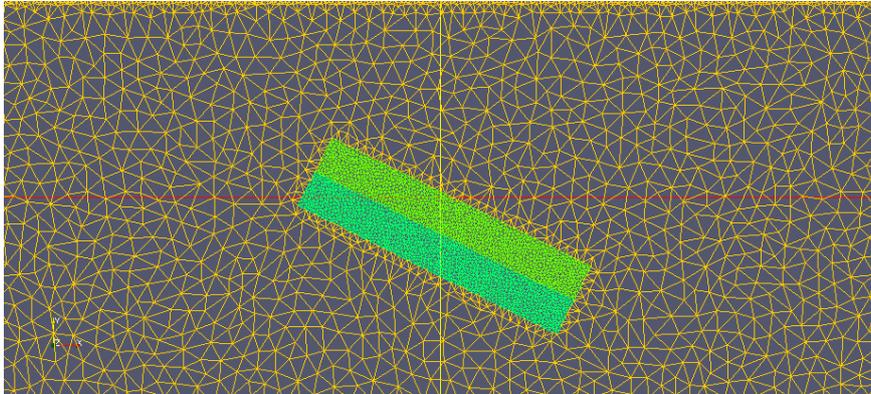


Figura 4.2: *Bloques rectangulares que engloban a la falla*

En las imágenes inferiores se presenta la comparación llevada a cabo usando distintos valores de distancia falla-periferia. Los resultados expresan en términos de desplazamiento de la superficie en las componentes; $u(x)$, $u(y)$ y $u(x,y)$ para valores $d=2$ y $d=5$. Los resultados se grafican de manera discreta y continua para ver en detalle del desplazamiento.

a) Desplazamiento superficial observado en la componente $u(x)$

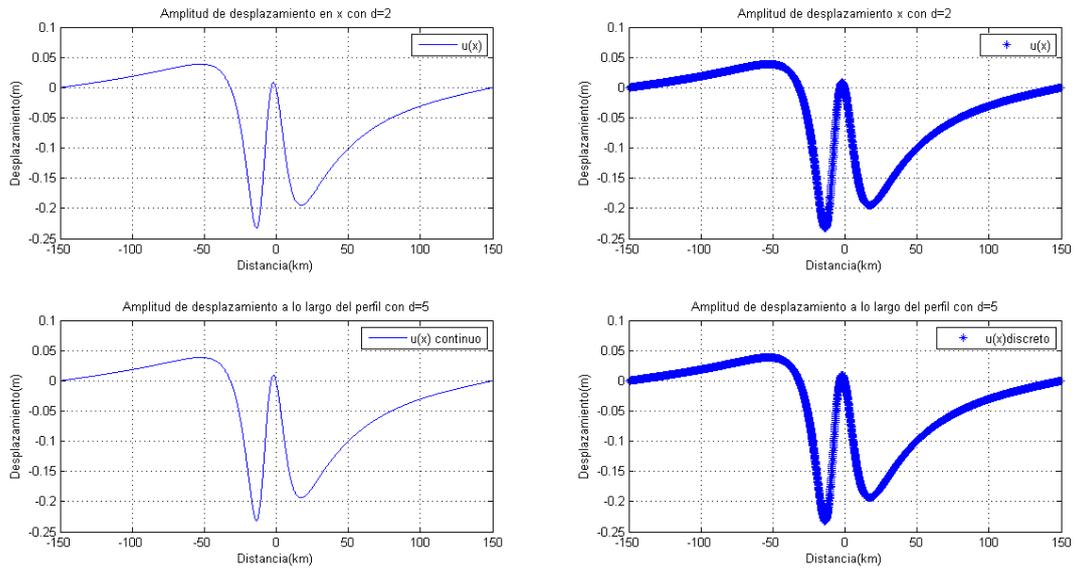


Figura 4.3: Resultados de desplazamiento superficial en la componente $u(x)$ usando distancias falla-periferia; $d=2$ y $d=5$

b) Desplazamiento superficial observado en la componente $u(y)$

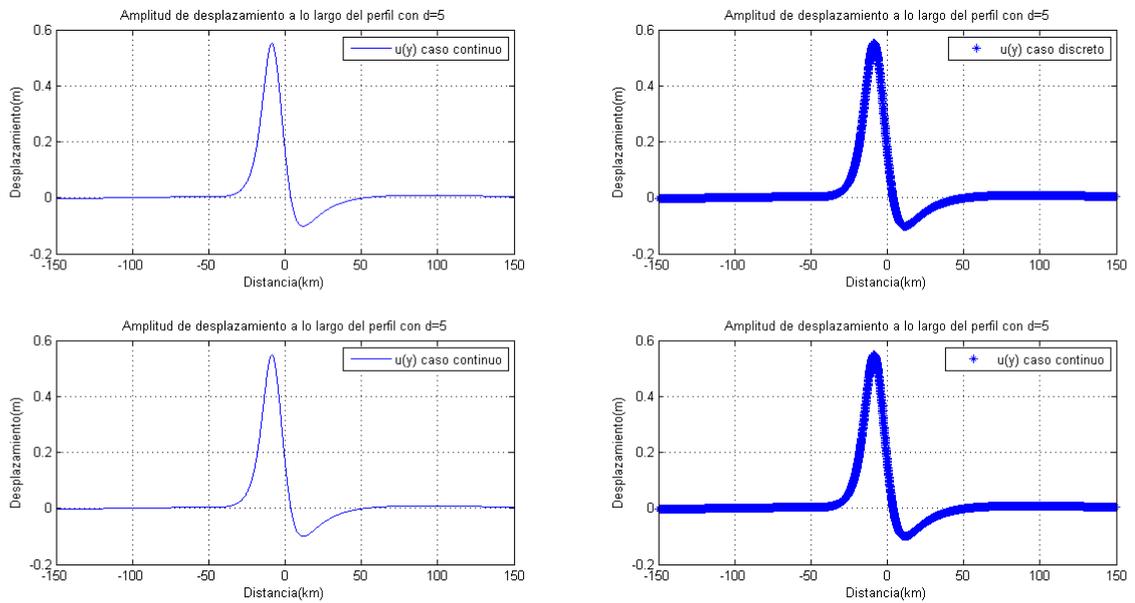


Figura 4.4: Resultados de desplazamiento superficial en la componente $u(y)$ usando distancias falla-periferia; $d=2$ y $d=5$

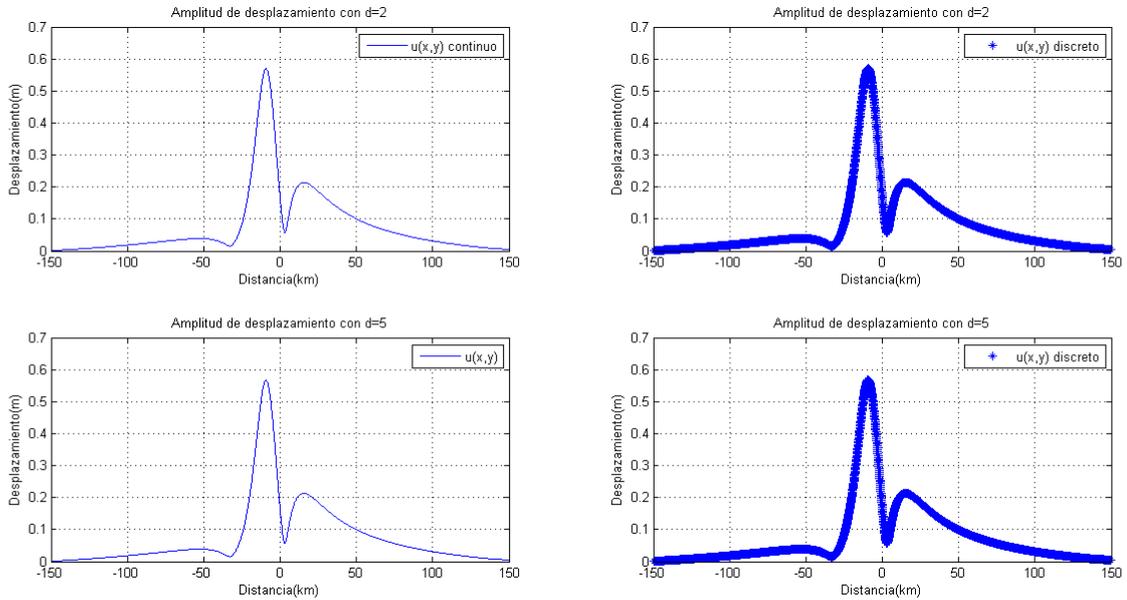
c) Desplazamiento superficial observado en la componente $u(x,y)$ 

Figura 4.5: Resultados de desplazamiento superficial en la componente $u(x)$ usando distancias falla-periferia; $d=2$ y $d=5$

Se observa que la simulación realizada para ambos casos, con una distancia de $d=2$ y $d=5$, genera el mismo desplazamiento superficial tanto para la componente horizontal como vertical y la suma de estas. Lo anterior sugiere que el programa Elast solo considera los rectángulos que rodean a la falla como un entorno de referencia en donde realizar la simulación, por lo tanto el área de los rectángulos en torno a la falla no tiene relación con los resultados del movimiento superficial.

4.1.2. Test de equivalencia de desplazamiento en sumatoria de fallas

El segundo test de validación consiste en probar la equivalencia entre los resultados de desplazamiento superficial generados por una falla independiente con los generados por la sumatoria de 2 o más fallas que geoméricamente igualan a la falla original. Una vez probado lo anterior se puede validar el método de discretización de una falla en n segmentos para obtener el desplazamiento total en superficie a partir de la sumatoria de los desplazamientos independientes de cada segmento de falla.

Se elabora una prueba de comparación considerando una falla de largo a que luego se divide en dos creando dos fallas de largo $a/2$ cada una. Se intenta probar que el campo de desplazamiento generado por una dislocación en la falla de largo a (con parámetros fijos de ángulo de subducción, deslizamiento sobre la falla y la rigidez de los materiales iguales) es equivalente a la suma de los desplazamientos de las dos dislocaciones de falla independiente de largo $a/2$. Se le llamará de aquí en adelante falla1 y falla2 a los dos segmentos de largo $a/2$, en tanto que la falla3 corresponderá a la falla de largo a .

A continuación se presentan los resultados en términos de desplazamiento superficial para las componentes $u(x)$ e $y(x)$ de los segmentos de falla 1, 2 y 3. Luego se comparan los desplazamientos de la falla1 + falla2 con el desplazamiento de la falla 3.

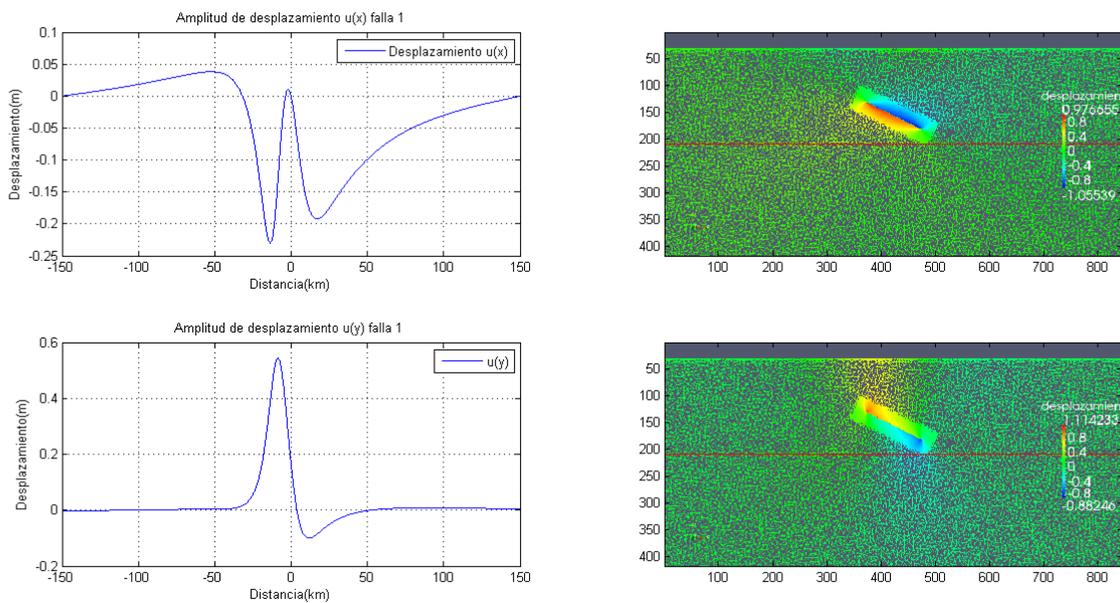


Figura 4.6: Resultados de desplazamiento superficial para el segmento de falla 1. A la izquierda de la imagen se observan dos gráficos Desplazamiento(m) v/s Distancia (km) correspondientes a las componentes horizontales $u(x)$ e $y(x)$. A la derecha se muestra el campo de desplazamiento representado con un código de color siendo el rojo el mayor desplazamiento y azul el menor.

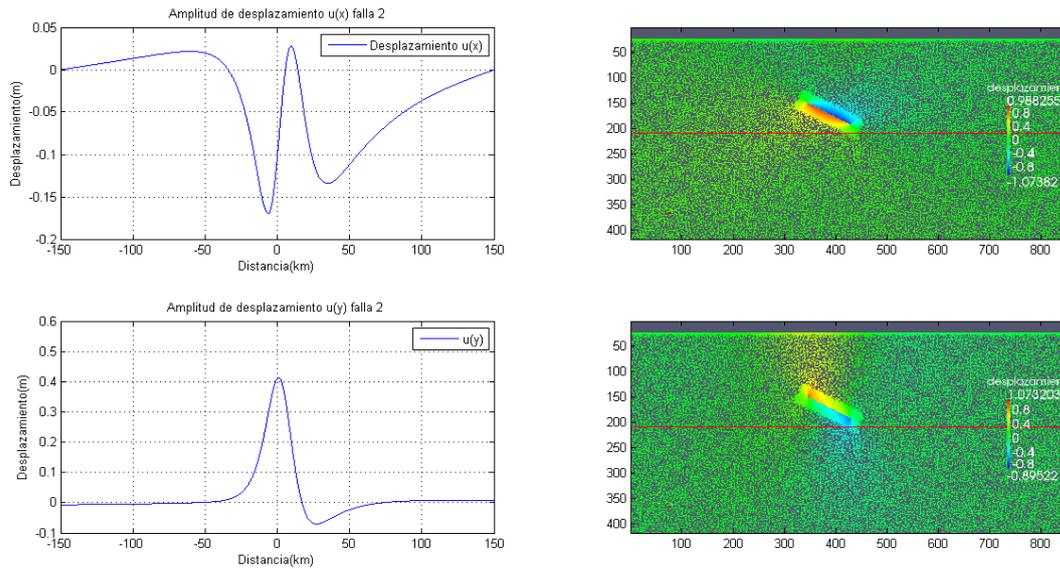


Figura 4.7: Resultados de desplazamiento superficial para el segmento de falla 2. A la izquierda de la imagen se observan dos gráficos Desplazamiento(m) v/s Distancia (km) correspondientes a las componentes horizontales $u(x)$ e $u(y)$. A la derecha se muestra el campo de desplazamiento representado con un código de color siendo el rojo el mayor desplazamiento y azul el menor.

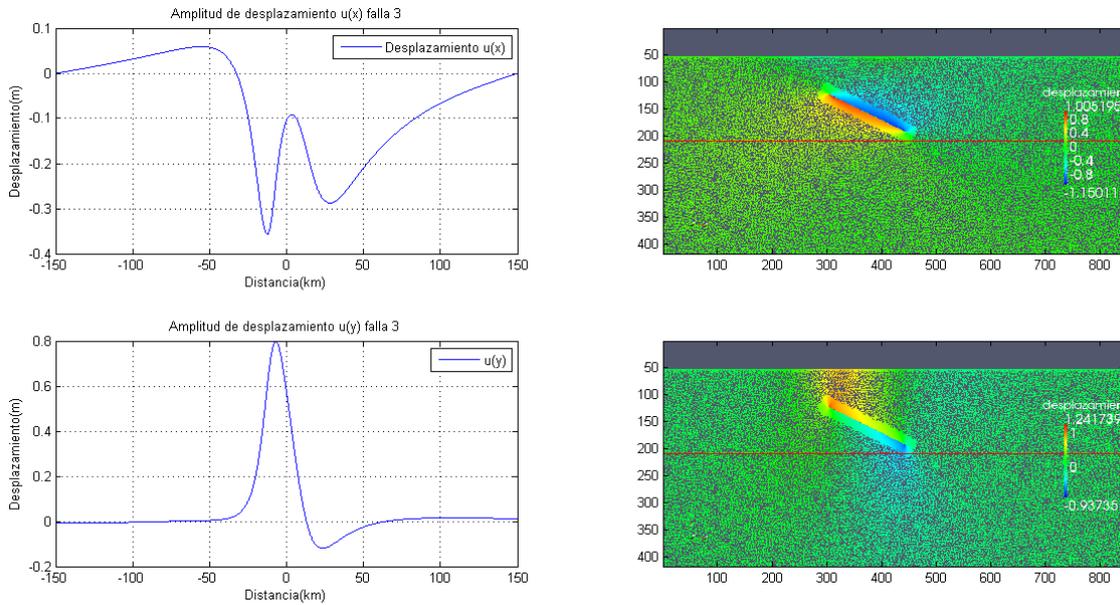


Figura 4.8: Resultados de desplazamiento superficial para el segmento de falla 3. A la izquierda de la imagen se observan dos gráficos Desplazamiento(m) v/s Distancia (km) correspondientes a las componentes horizontales $u(x)$ e $u(y)$. A la derecha se muestra el campo de desplazamiento representado con un código de color siendo el rojo el mayor desplazamiento y azul el menor.

Se analizan los datos y se suman las fallas 1 y 2 para ver si efectivamente generan un campo de desplazamiento equivalente al campo de desplazamiento generado por la falla3.

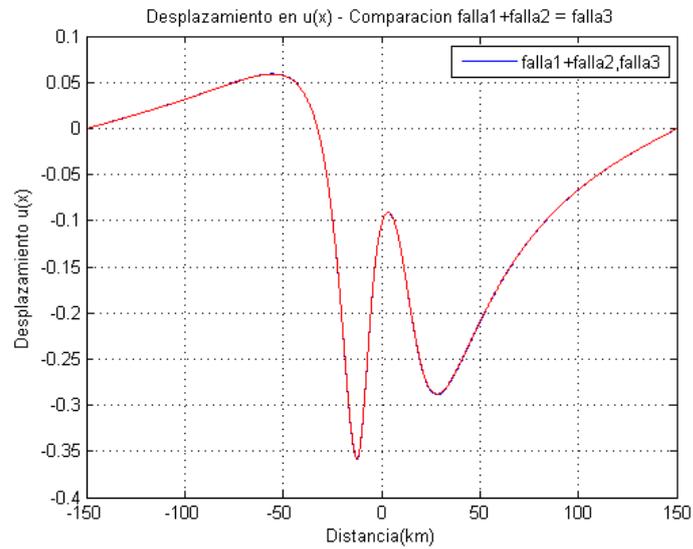


Figura 4.9: Resultados de desplazamiento superficial para la componente horizontal $u(x)$ haciendo la suma de falla1 y falla2 (en azul) y falla3(en rojo). Se observa que ambas curvas se superponen generando el efecto de que se trata de una sola línea

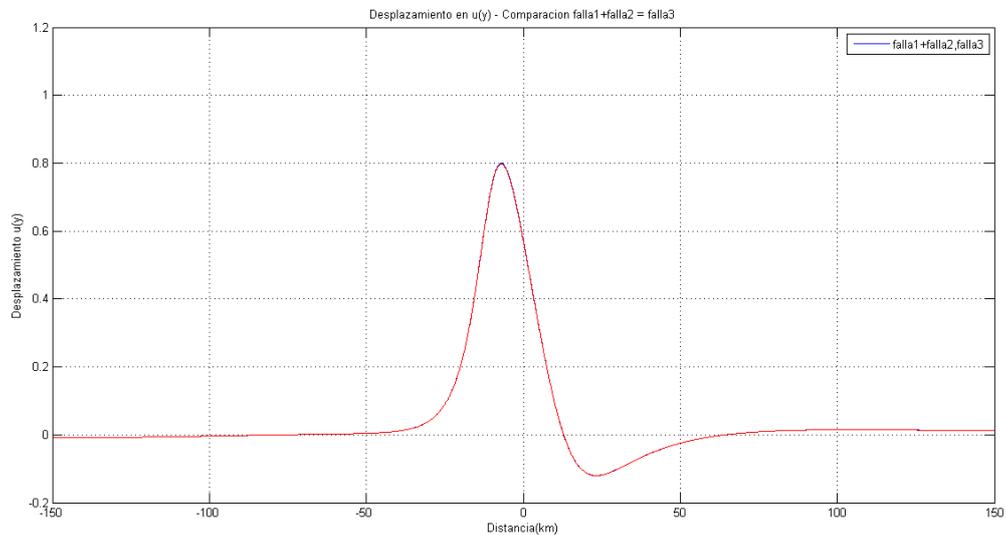


Figura 4.10: Resultados de desplazamiento superficial para la componente horizontal $u(y)$ haciendo la suma de falla1 y falla2 (en azul) y falla3(en rojo). Se observa que ambas curvas se superponen generando el efecto de que se trata de una sola línea

4.2. Resultado de simulación mediante el método FEM

Los resultados expuestos en esta sección corresponden a las simulaciones llevadas a cabo en el perfil de subducción. El perfil de subducción es una representación de la zona de estudio con un largo de 400 km y una profundidad de 150 km. La zona de subducción presenta distintas litologías con propiedades físicas propias de cada material (los coeficientes de elasticidad y rigidez son distintos para la corteza, el manto superior y el slab). Dentro del perfil, el slab se representa como una estructura de espesor h en donde el limite superior se encuentra cerca de la interfase en donde cambia la composición del manto superior y empieza la composición del slab. El limite inferior se encuentra a una distancia h del limite superior del slab. La explicación de esta disposición se basa en los intentos fallidos de generar dislocaciones sobre las interfases, esto genera datos incongruentes, luego la solución al problema consiste en no considerar la litología del manto inferior y se procede a reemplazarla como una extensión de la litología del slab hasta el limite máximo de profundidad del perfil. En este estudio solo se tiene en cuenta la interacción de la corteza con el manto superior y las fallas en las zonas superior e inferior.

Cada limite superior e inferior del slab se compone de un conjunto de 20 segmentos que coincide con el numero de fallas en donde se generan las dislocaciones con distintos valores de desplazamiento. Los resultados de la simulación permiten comparar los desplazamientos observados de 6 estaciones (2 en el continente y 4 en el fondo marino) a partir de la sumatoria total de los desplazamientos obtenidos con 20 segmentos y los desplazamientos obtenidos mediante la suma de solo algunos de los segmentos.

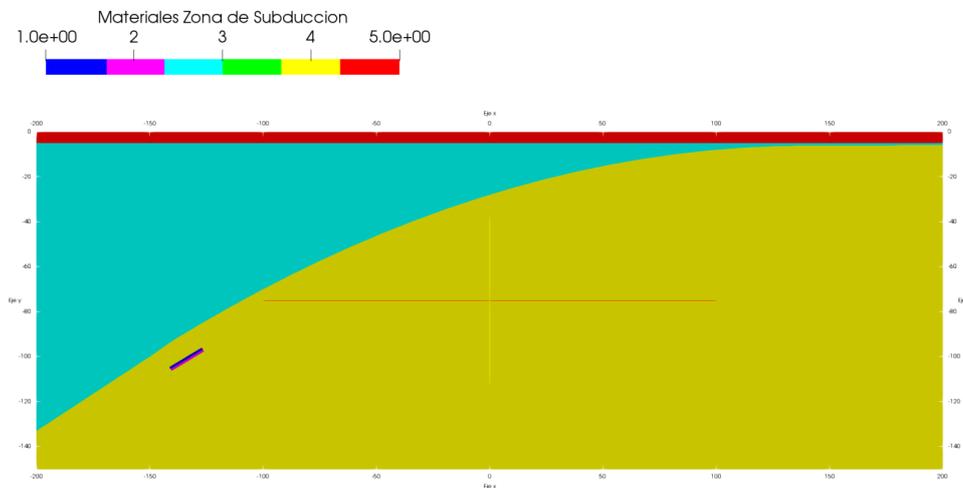


Figura 4.11: Perfil de subduccion con distintos materiales en función de su rigidez. Se observa un bloque conteniendo en la zona de color mostaza en su interior, dentro de este bloque esta contenida la falla, esta es solo una de las 20 fallas que se usan en el proceso de obtención del desplazamiento superficial total.

Los resultados de la simulación con el método FEM se dividen en dos grupos. El primer grupo corresponde a los resultados de las simulaciones llevadas a cabo en los periodos co-sísmico y post-sísmico de manera independiente y considera la exploración de 20 fallas que siguen la forma de un perfil de subducción que va desde la falla mas profunda a la mas superficial. Dentro de cada periodo sísmico se realizan simulaciones con el fin de explorar los distintos desplazamientos superficiales conforme cambian los valores de desplazamiento para cada falla

(se hace variar la cantidad de desplazamiento de 1 hasta 200 m manteniendo los ángulos de subducción y rigidez de la zona de subducción constante).

El segundo grupo de datos corresponde a los resultados obtenidos para el periodo co-sísmico y post-sísmico de un conjunto acotado de fallas en la zona superior e inferior del slab. Al igual que en la metodología aplicada en el primer conjunto de datos, se hacen variar los desplazamientos de las fallas manteniendo fijos los ángulos y valores de rigidez de la zona de subducción, este último proceso tiene como fin entender como varia el campo de desplazamiento superficial en función de la variación de desplazamiento en la falla de un conjunto acotado de fallas.

4.2.1. Periodo co-sísmico

Se presentan los resultados de desplazamiento superficial a partir de la sumatoria de las 20 fallas/segmentos que conforman la zona superior del slab en la zona de subducción. Se aplican distintos valores de deslizamiento (1, 5, 15, 30, 50, 100 y 200 m) para cada conjunto de 20 fallas con el fin de simular los desplazamientos superficiales que una estructura continua podría generar al desplazarla a lo largo de toda su extensión.

Para interpretar los datos expuestos mas abajo se debe tener presente el siguiente esquema que se presento en la sección de metodología. El origen del sistema se encuentra sobre la superficie a la mitad del perfil de subduccion $(0,0)$. A partir de esta información se puede comparar e interpretar los desplazamientos observados y calculados por el método FEM.

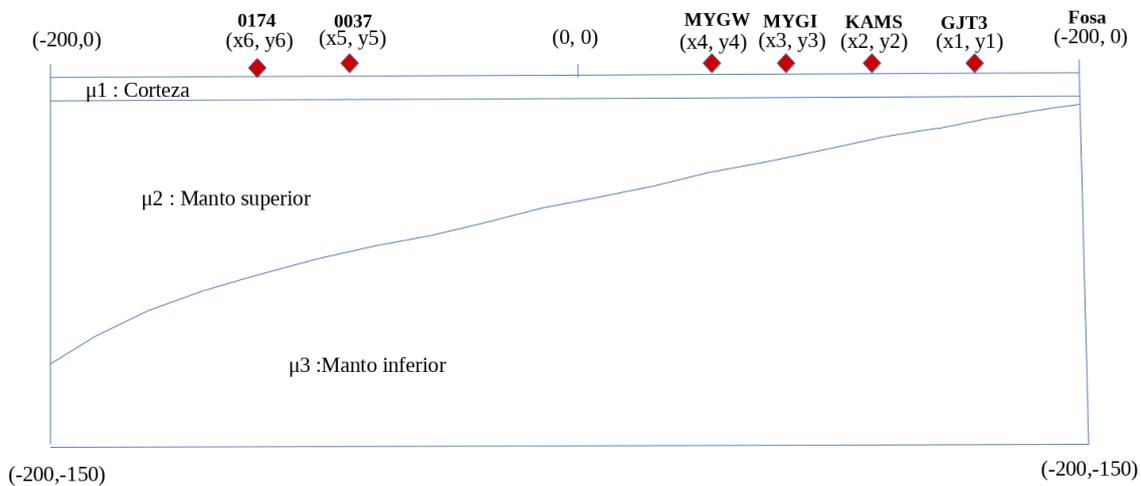


Figura 4.12: Imagen ilustrativa de la distribución de las estaciones GPS sobre el continente y el fondo marino. Se distinguen los distintos valores de rigidez para cada estrato (corteza, manto superior y manto inferior)

Sumatoria de los 20 segmentos de falla para distintos casos de deslizamiento

- En esta sección se presentan los resultados del desplazamiento de la superficie al sumar el efecto de las 20 fallas que conforman el slab superior. Cada caso representa el desplazamiento que se impuso para cada simulación. Los distintos desplazamientos impuestos sobre el conjunto de fallas tiene como objetivo acercarse a los valores observados por los GPS.

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento				
	Obs.(m)	FEM(1m)	FEM(5m)	FEM(15m)	FEM(30m)
GJT3 (110,0)	31.48	1.597	7.987	23.963	47.926
KAMS (87.7, 0)	22.9	1.645	8.225	24.675	49.351
MYGI (70,0)	24.42	1.626	8.13	24.391	48.782
MYGW (30,0)	15.18	1.51	7.553	22.659	45.319

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento				
	Obs.(m)	FEM(50m)	FEM(100m)	FEM(150m)	FEM(200m)
GJT3 (110,0)	31.48	79.876	159.753	239.63	319.507
KAMS (87.7, 0)	22.9	82.253	164.506	246.759	329.012
MYGI (70,0)	24.42	81.303	162.607	243.911	325.215
MYGW (30,0)	15.18	28.678	151.357	86.035	302.129

Tabla 4.1: Sumatoria periodo cosísmico

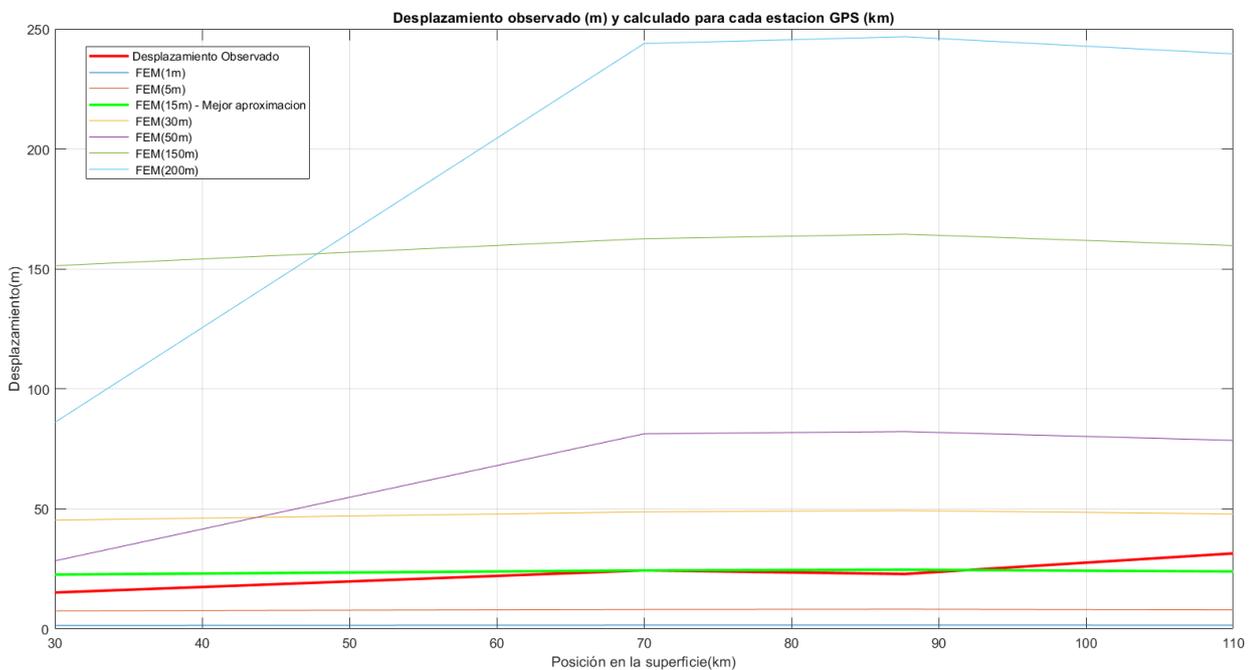


Figura 4.13: Sumatoria desplazamiento durante el periodo co-sísmico de las fallas F17,F18,F19 y F20 con distintos valores de desplazamiento sobre la fallas.

Resultados de fallas independientes (F17,F18,F19,F20)

- En esta sección se presentan los resultados de los desplazamientos superficiales a partir de fallas independientes que se presentan en la parte superior del slab. Las fallas 17 a 20 van de lo mas profundo a los mas superficial y se puede apreciar como aumenta el desplazamiento en la superficie conforme la falla está más cerca de la superficie.

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento				
	Obs.(m)	FEM(25m)	FEM(50m)	FEM(100m)	FEM(200m)
GJT3 (110,0)	31.48	7.458	14.917	29.834	59.669
KAMS (87.7, 0)	22.9	6.014	12.029	24.059	48.118
MYGI (70,0)	24.42	10.005	20.01	40.02	80.041
MYGW (30,0)	15.18	2.003	4.007	8.015	16.03

Tabla 4.2: Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F17

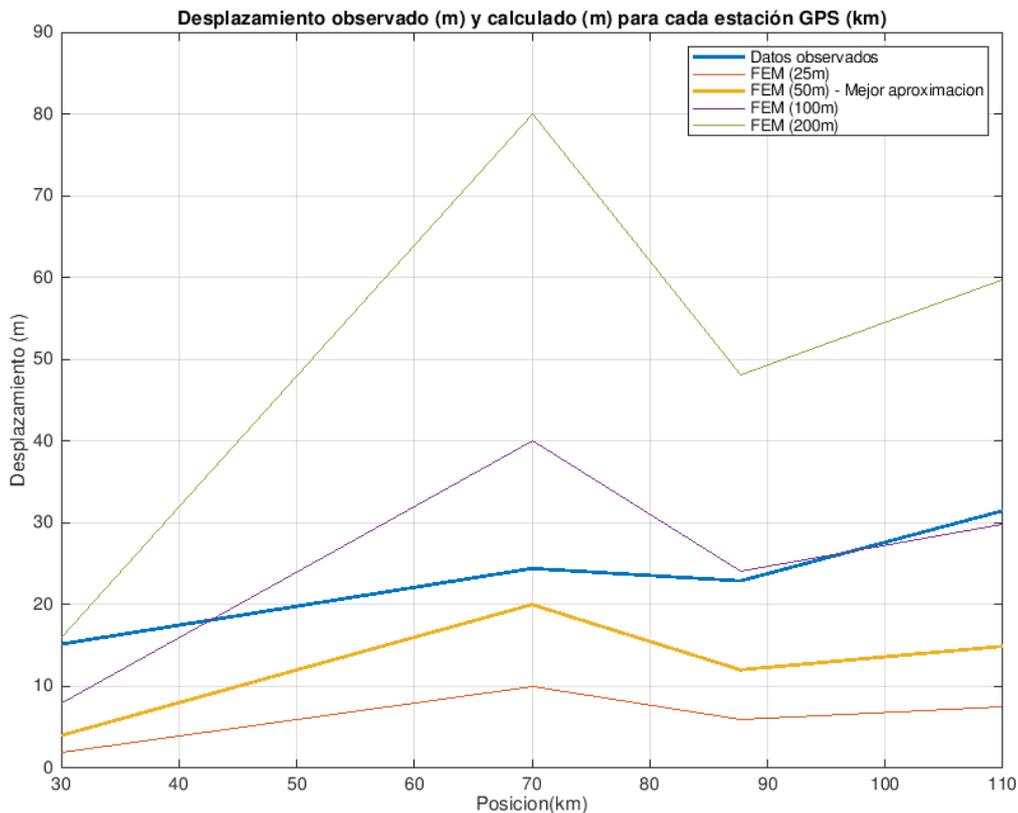
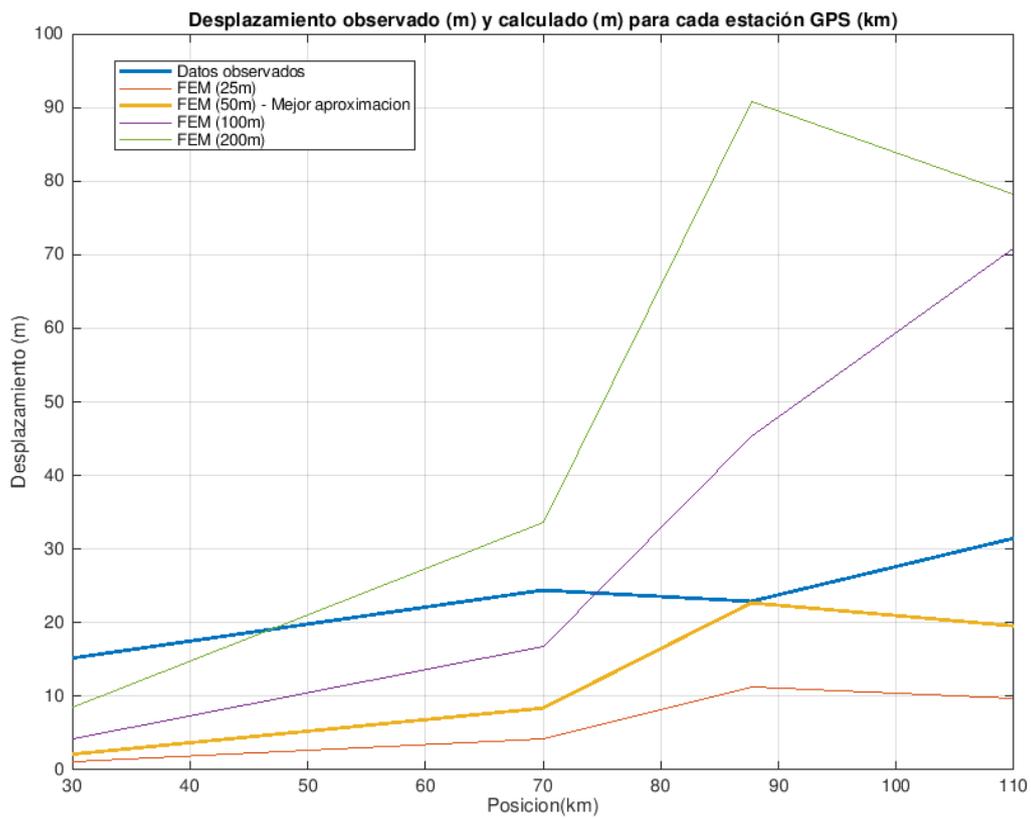


Figura 4.14: Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F17.

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento				
	Obs.(m)	FEM(25m)	FEM(50m)	FEM(100m)	FEM(200m)
GJT3 (110,0)	31.48	9.782	19.564	39.128	78.256
KAMS (87.7, 0)	22.9	11.347	22.694	45.398	90.779
MYGI (70,0)	24.42	4.198	8.396	16.793	33.586
MYGW (30,0)	15.18	1.062	2.125	4.25	8.501

Tabla 4.3: *Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F18*Figura 4.15: *Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F18.*

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento				
	Obs.(m)	FEM(25m)	FEM(50m)	FEM(100m)	FEM(200m)
GJT3 (110,0)	31.48	13.309	26.618	53.237	106.475
KAMS (87.7, 0)	22.9	4.07	8.146	16.293	32.586
MYGI (70,0)	24.42	1.715	3.343	6.86	13.721
MYGW (30,0)	15.18	0,56	1.123	2.247	4.495

Tabla 4.4: Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F19

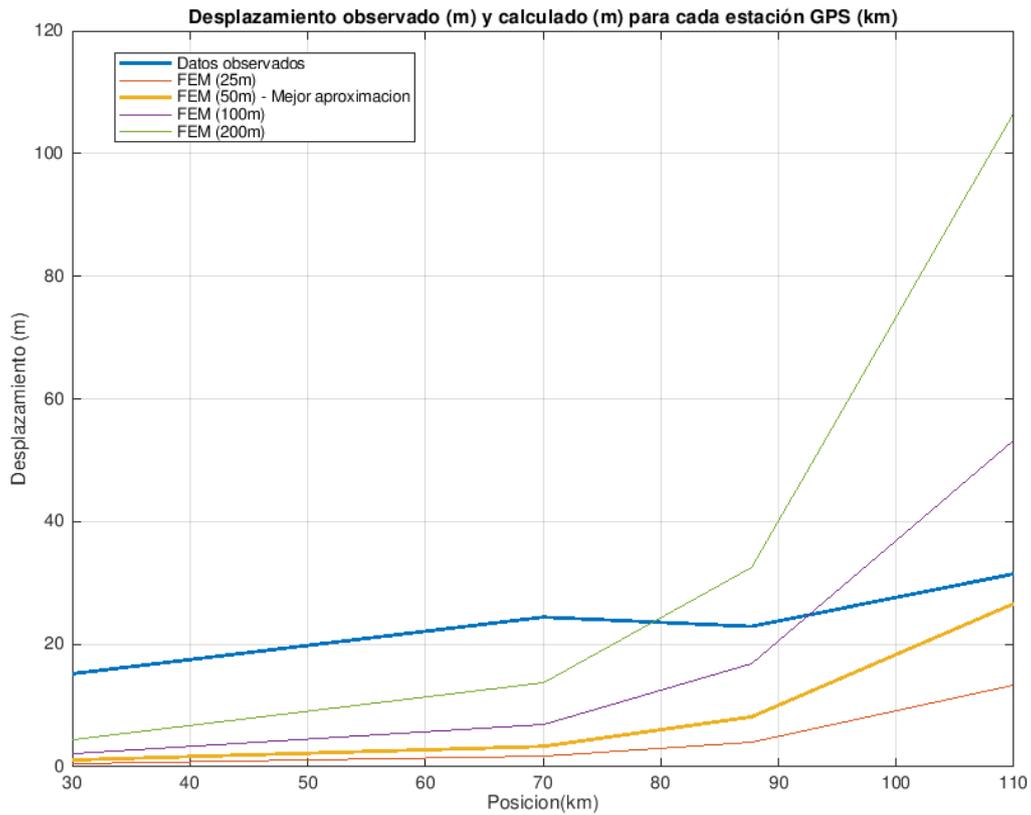
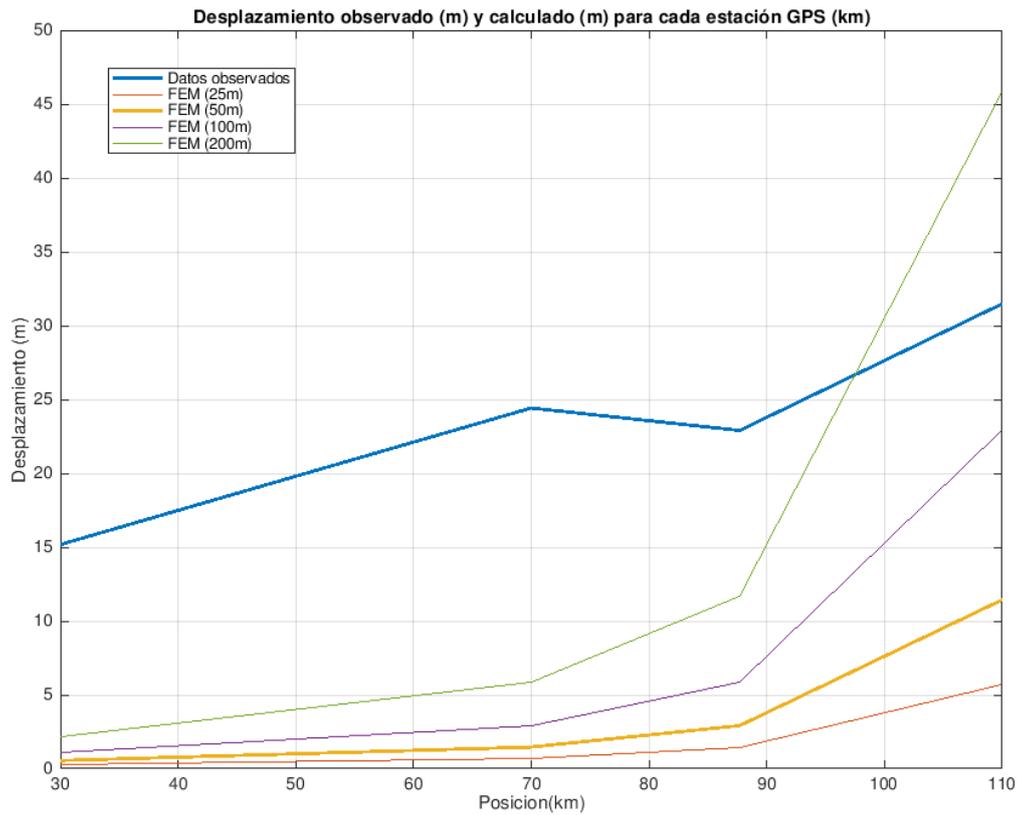


Figura 4.16: Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F19.

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento				
	Obs.(m)	FEM(25m)	FEM(50m)	FEM(100m)	FEM(200m)
GJT3 (110,0)	31.48	5.717	11.435	22.87	45.74
KAMS (87.7, 0)	22.9	1.459	2.919	5.838	11.677
MYGI (70,0)	24.42	0.733	1.466	2.932	5.864
MYGW (30,0)	15.18	0.266	0.553	1.066	2.132

Tabla 4.5: *Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F20*Figura 4.17: *Periodo co-sísmico - dislocación independiente falla F20.*

Resultados de la sumatoria de fallas independientes (F17,F18,F19,F20)

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento				
	Obs.(m)	FEM(25m)	FEM(50m)	FEM(100m)	FEM(200m)
GJT3 (110,0)	31.48	36.266	72.534	145.069	290.14
KAMS (87.7, 0)	22.9	22.893	45.788	91.588	183.16
MYGI (70,0)	24.42	16.651	33. 215	66.605	133.212
MYGW (30,0)	15.18	3.331	7.808	15.578	31.158

Tabla 4.6: *Periodo co-sísmico - sumatoria dislocaciones independientes 17,18,19,20*

Los resultados finales, en donde se aplica el mismo desplazamiento sobre las 4 fallas (17,18,19,20) se obtienen sumando los desplazamientos obtenidos a partir de los desplazamientos independientes de cada una de las fallas con sus distintos valores de slip.

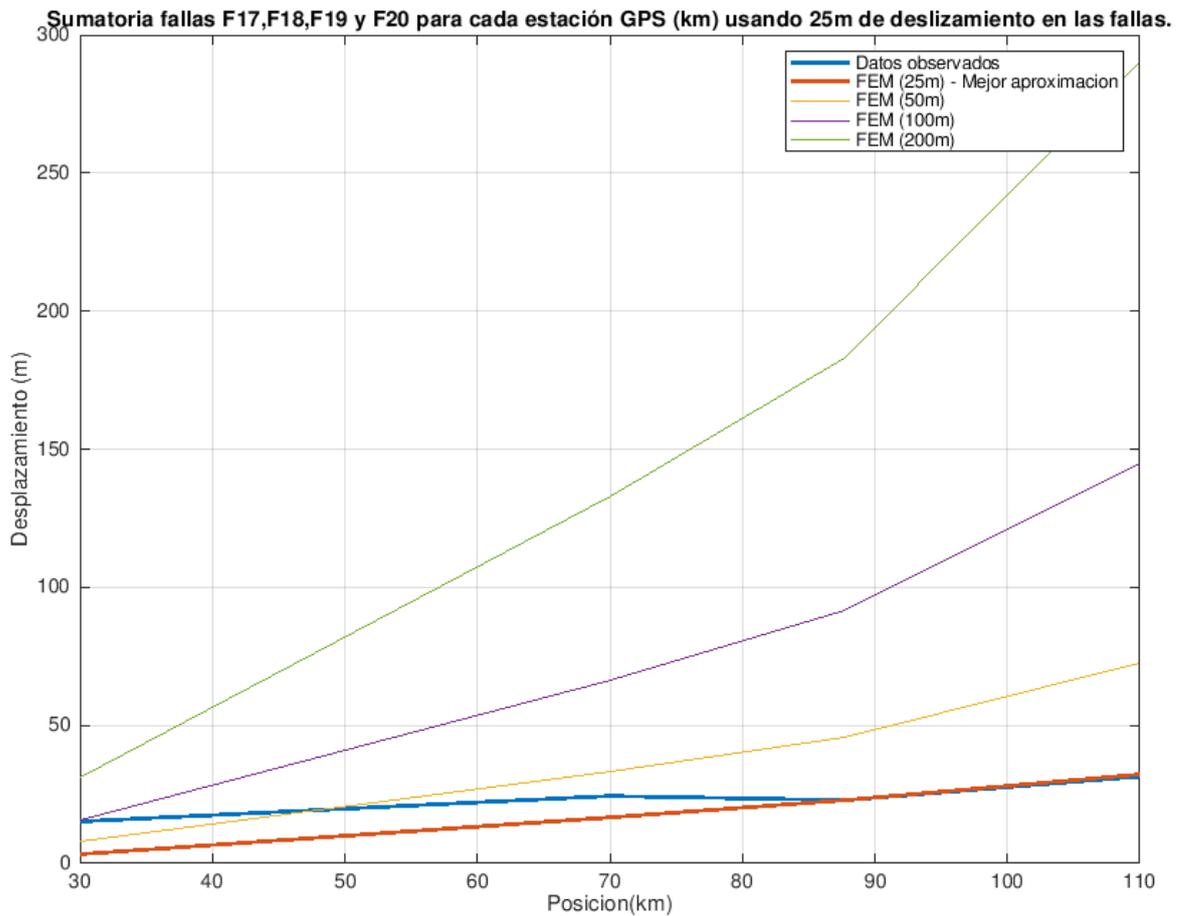


Figura 4.18: *Periodo co-sísmico - sumatoria dislocaciones independientes 17,18,19,20.*

4.2.2. Resultado datos FEM para datos GPS para el periodo post-sísmico

Al igual que en el caso del periodo co-sísmico, se presentan los resultados de la sumatoria de los 20 segmentos de falla independiente con distintos valores de deslizamiento en la falla (1, 5, 15, 30, 50, 100 y 200 m) y la sumatoria de 4 segmentos cercanos a la superficie.

Sumatoria de los 20 segmentos de falla para distintos casos de deslizamiento

- En esta sección se dan a conocer los resultados del desplazamiento de la superficie al sumar el efecto de las 20 fallas que conforman el slab inferior. Cada caso representa el desplazamiento que se impuso para cada simulación. Los distintos desplazamientos impuestos sobre el conjunto de fallas tiene como objetivo acercarse a los valores observados por los GPS.

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento					
	Obs.(m)	FEM(0.5m)	FEM(1m)	FEM(5m)	FEM(15m)	FEM(30m)
GJT3 (110,0)	-0.45	-0.587	-1.174	-5.604	-17.618	-35.235
KAMS (87.7, 0)	-0.34	-0.672	-1.345	-6.148	-20.176	-40.352
MYGI (70,0)	-0.4	-0.691	-1.383	-6.026	-20.745	-41.49
MYGW (30,0)	-0.15	-0.663	-1.326	-6.012	-19.904	-39.808
Estación 037 (-94.464,0)	1	-0.246	-0.49	-2.094	-7.402	-14.804
Estación 174 (-116.68,0)	1	-0.163	-0.32	-1.29	-4.911	-9.823

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento				
	Obs.(m)	FEM(50m)	FEM(100m)	FEM(150m)	FEM(200m)
GJT3 (110,0)	-0.45	-58.726	-117.453	-176.179	-234.906
KAMS (87.7, 0)	-0.34	-67.253	-134.506	-201.759	-269.013
MYGI (70,0)	-0.4	-69.151	-138.302	-207.453	-276.604
MYGW (30,0)	0.15	-66.347	-132.694	-199.041	-265.388
Estación 037 (-94.464,0)	1	-24.674	-49.349	-74.023	-98.698
Estación 174 (-116.68,0)	1	-16.372	-32.745	-49.117	-65.49

Tabla 4.7: Sumatoria periodo post-sísmico

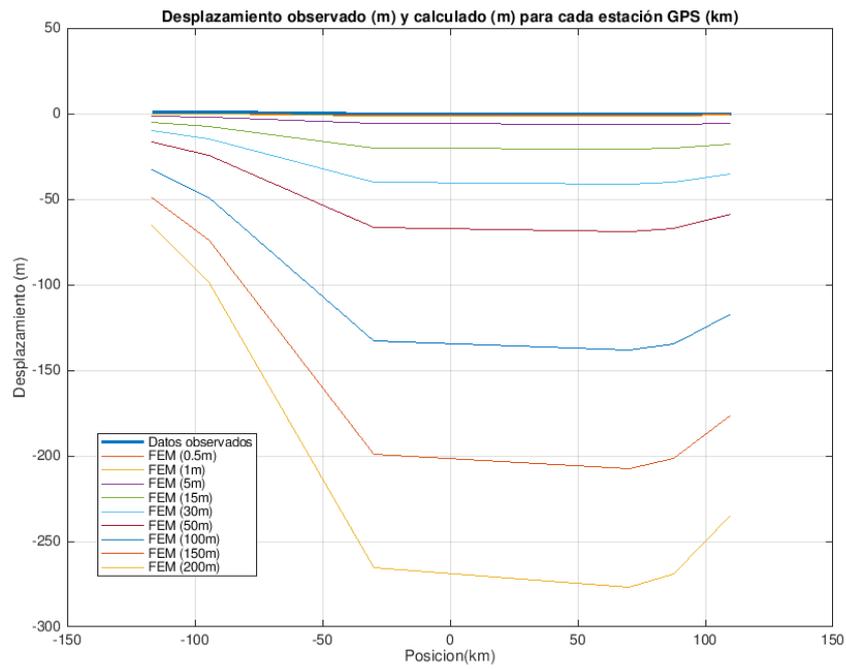


Figura 4.19: Sumatoria periodo post-sísmico, todos los casos.

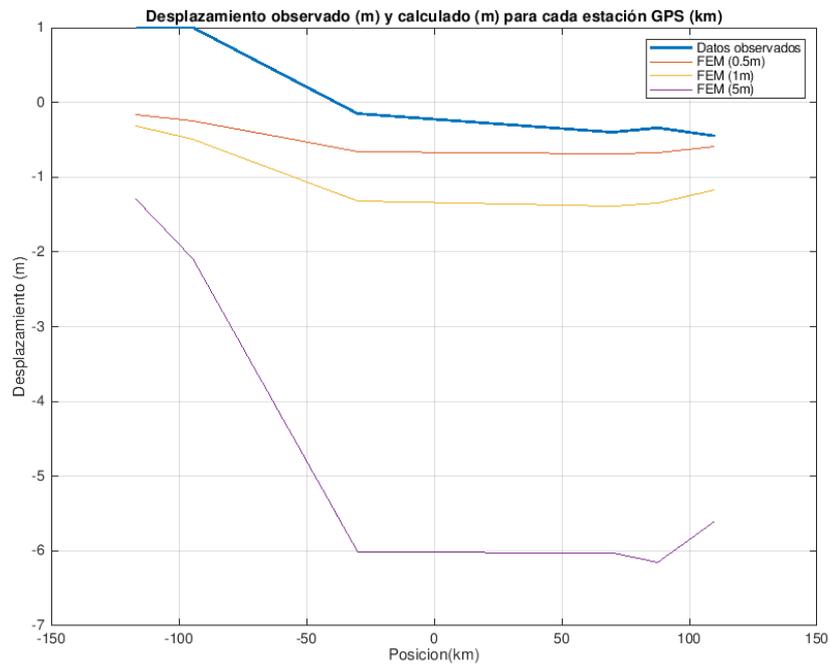


Figura 4.20: Sumatoria periodo post-sísmico con deslizamientos de 0.5, 1 y 5m.

Resultados de fallas independientes (F17,F18,F19,F20)

- En esta sección se presentan los resultados de los desplazamientos superficiales a partir de fallas independientes que están en la parte baja del slab. Las fallas 17 a 20 van de lo mas profundo a los mas superficial y se puede apreciar como aumenta el desplazamiento en la superficie conforme la falla está más cerca de la superficie.

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento			
	Obs.(m)	FEM(0.57m)	FEM(0.58m)	FEM(0.59m)
GJT3 (110,0)	-0.45	-0,131	-0,1521	-0,1547
KAMS (87.7, 0)	-0.34	-0,013	-0,0152	-0,0155
MYGI (70,0)	-0.4	-0,124	-0,144	-0,1468
MYGW (30,0)	0.15	-0,059	-0,069	-0,07
Estación 037 (-94.464,0)	1	-0,006	-0,0072	-0,0073
Estación 174 (-116.68,0)	1	-0,004	-0,0049	-0,00503

Tabla 4.8: Periodo post-sísmico - Dislocación independiente falla F17

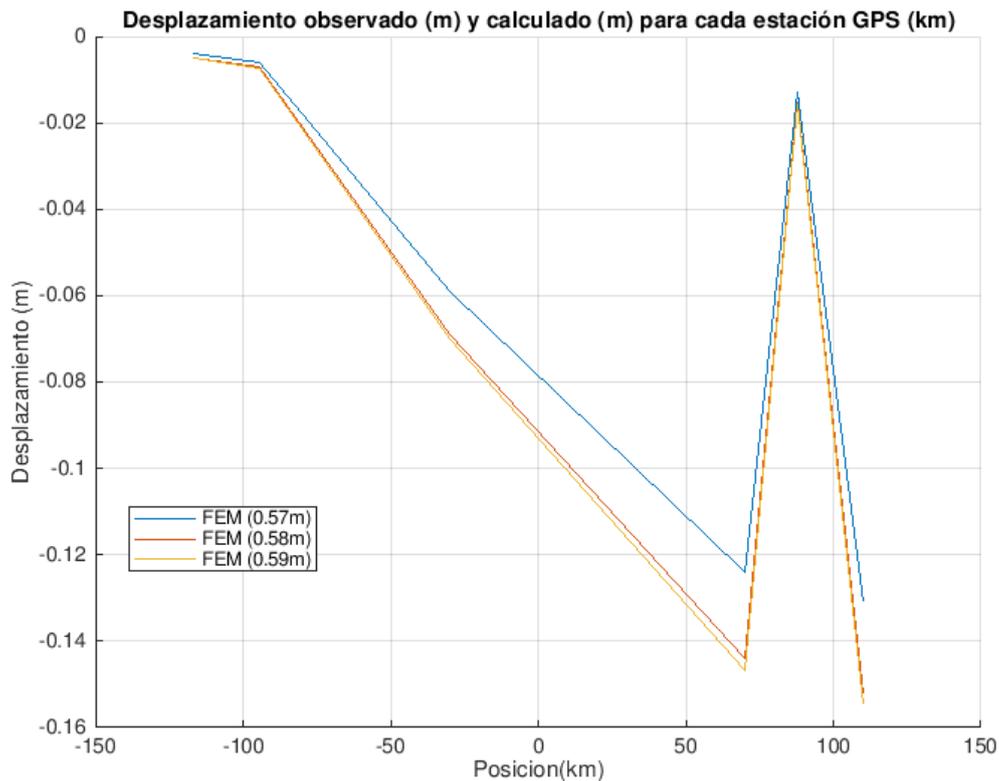


Figura 4.21: Periodo post-sísmico - Dislocación independiente falla F17.

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento			
	Obs.(m)	FEM(0.57m)	FEM(0.58m)	FEM(0.59m)
GJT3 (110,0)	-0.45	-0,0533	-0,0543	-0,0552
KAMS (87.7, 0)	-0.34	-0,1457	-0,1483	-0,1508
MYGI (70,0)	-0.4	-0,1266	-0,1289	-0,1311
MYGW (30,0)	0.15	-0,042	-0,0435	-0,0443
Estación 037 (-94.464,0)	1	-0,0046	-0,0047	-0,0048
Estación 174 (-116.68,0)	1	-0,0031	-0,0032	-0,0032

Tabla 4.9: Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F18

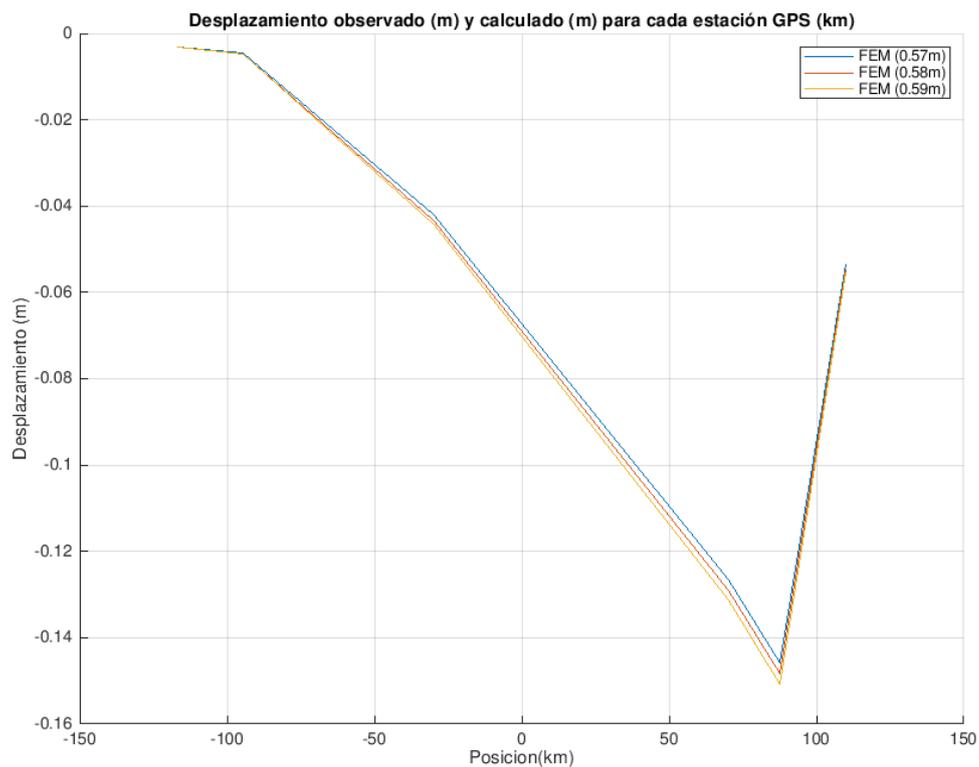
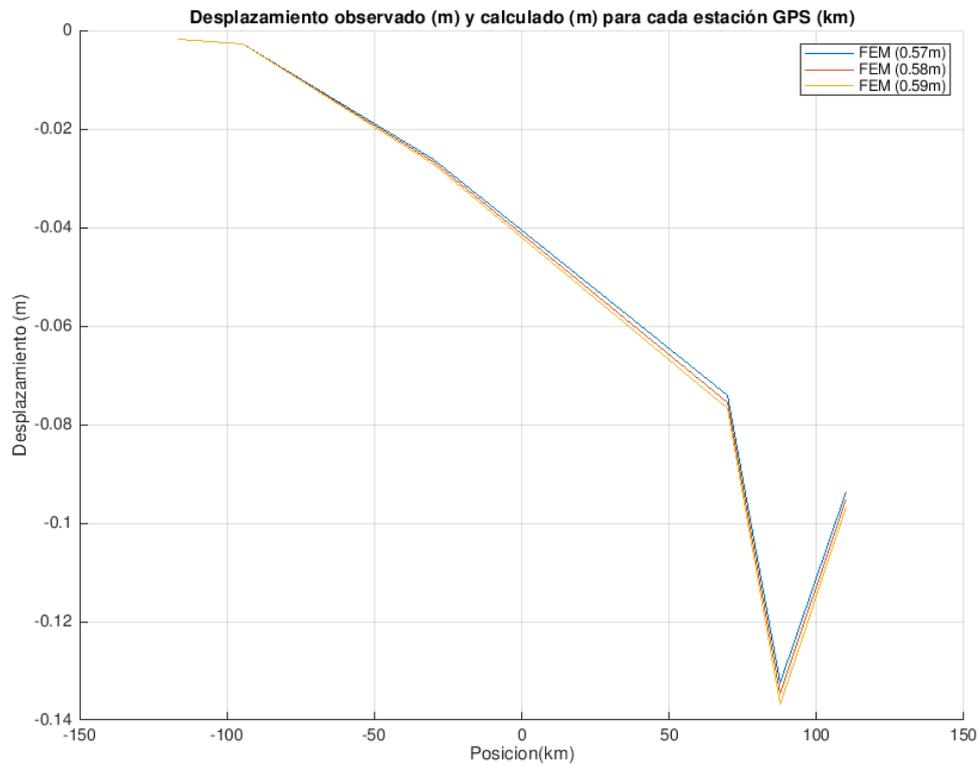


Figura 4.22: Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F18

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento			
	Obs.(m)	FEM(0.57m)	FEM(0.58m)	FEM(0.59m)
GJT3 (110,0)	-0.45	-0,0935	-0,0951	-0,0968
KAMS (87.7, 0)	-0.34	-0,1325	-0,1345	-0,1368
MYGI (70,0)	-0.4	-0,0742	-0,0755	-0,0768
MYGW (30,0)	0.15	-0,0262	-0,0267	-0,0272
Estación 037 (-94.464,0)	1	-0,0027	-0,00283	-0,00288
Estación 174 (-116.68,0)	1	-0,0018	-0,0019	-0,0019

Tabla 4.10: *Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F19*Figura 4.23: *Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F19*

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento			
	Obs.(m)	FEM(0.57m)	FEM(0.58m)	FEM(0.59m)
GJT3 (110,0)	-0.45	0,135	-0,1566	-0,1593
KAMS (87.7, 0)	-0.34	-0,063	-0,0738	-0,075
MYGI (70,0)	-0.4	-0,035	-0,0415	-0,0422
MYGW (30,0)	0.15	-0,013	-0,0156	-0,015
Estación 037 (-94.464,0)	1	-0,001	-0,00129	-0,00131
Estación 174 (-116.68,0)	1	-0,0006	-0,0007	-0,0007

Tabla 4.11: Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F20

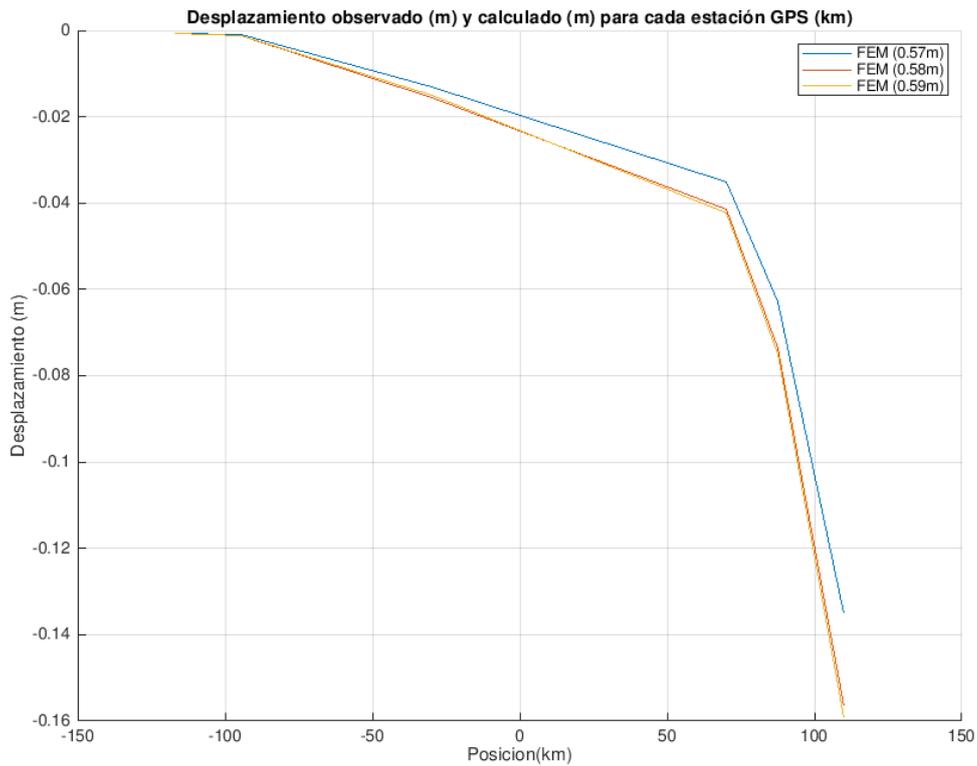


Figura 4.24: Periodo post-sísmico - dislocación independiente falla F20

Resultados de la sumatoria de fallas independientes (F17,F18,F19,F20)

Estación Posición (x,y)	Desplazamiento			
	Obs.(m)	FEM(0.57m)	FEM(0.58m)	FEM(0.59m)
GJT3 (110,0)	-0.45	-0,4128	-0,4581	-0,466
KAMS (87.7, 0)	-0.34	-0,3542	-0,3718	-0,3781
MYGI (70,0)	-0.4	-0,3598	-0,3899	-0,3969
MYGW (30,0)	-0.15	-0,1402	-0,1548	-0,1565
Estación 037 (-94.464,0)	1	-0,0143	-0,01602	-0,01629
Estación 174(-116.68,0)	1	-0,0095	-0,0107	-0,01083

Tabla 4.12: Periodo post-sísmico parcial, sumatoria F17 F18 F19 Y F20

Los resultados finales, en donde se aplica el mismo desplazamiento sobre las 4 fallas (17,18,19,20) se obtienen sumando los desplazamientos obtenidos a partir de los desplazamientos independientes de cada una de las fallas con sus distintos valores de slip al igual como se hizo en el caso del periodo co-sísmico. Los valores de dislocación más cercanos a los resultados de las observaciones GPS son del orden de 0.5, por ende se presentan los 3 casos que acotan el mejor valor (entre 0.57 y 0.59 m de dislocación). La modelacion con FEM no logra reproducir las observaciones de desplazamiento en el continente, se puede ver que los datos se ajustan moderadamente bien cuando se esta mas cerca de la fosa y conforme aumenta la distancia hacia la fosa los resultados empeoran.

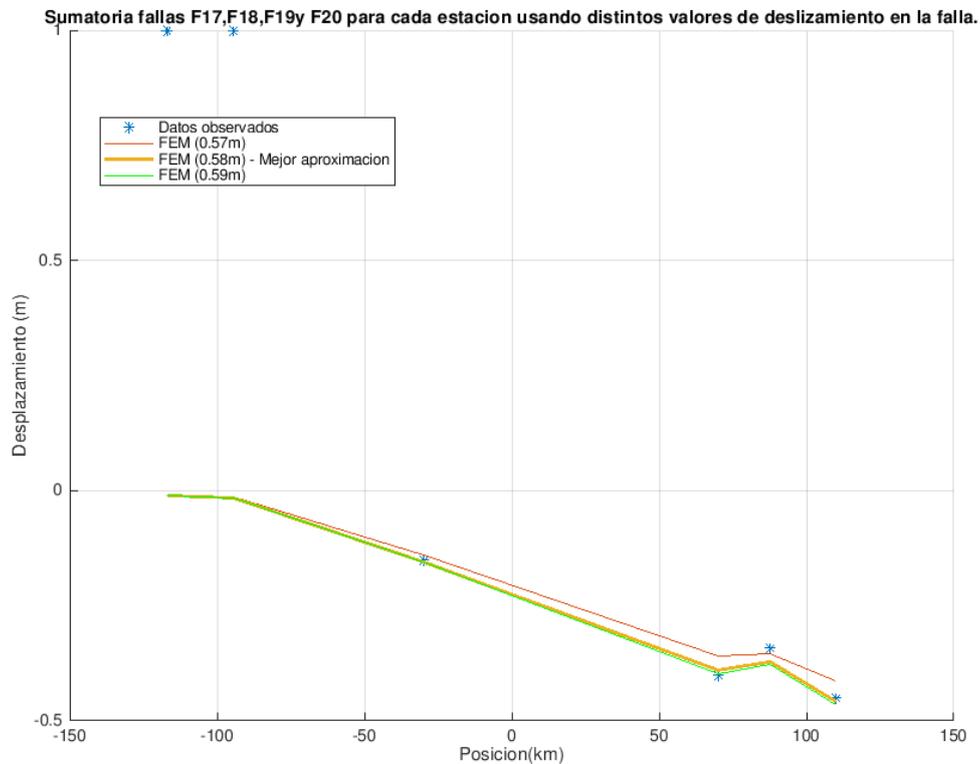


Figura 4.25: Periodo post-sísmico - Sumatoria desplazamientos superficiales

4.3. Método de elementos finitos (FEM) - Fallas 1 a 20

A continuación, a modo de ejemplo, se muestra una de las 368 simulaciones que se llevaron a cabo durante este estudio. Para cada simulación se muestran dos imágenes, la primera imagen superior representa el campo de desplazamiento en distintas tonalidades (los colores más rojizos indican mayor desplazamiento y los colores hacia el azul indican menor desplazamiento). La segunda imagen, en la parte inferior muestra la zona de subducción haciendo una distinción entre la corteza, el manto superior y el slab. La falla queda circunscrita a un rectángulo que está inmerso en un medio que representa las propiedades físicas del slab (su rigidez y coeficientes de elasticidad). Como se explico en la sección de metodología, se optó por hacer la simulación con fallas cercanas a la interfaz entre el manto superior el slab y luego la parte baja del slab que se considera como una falla a una mayor profundidad (que está en función del espesor del slab).

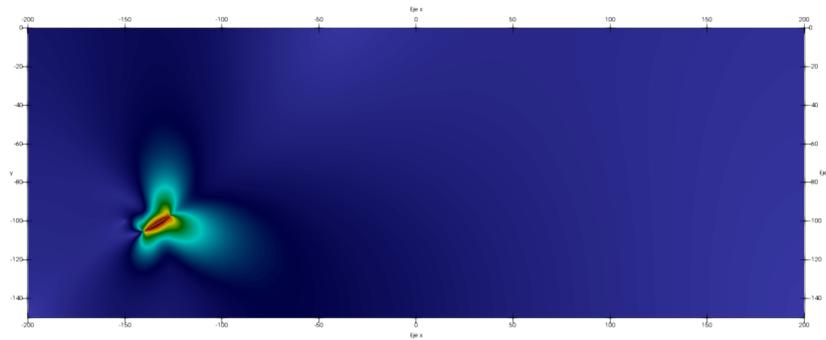


Figura 4.26: *Falla 1 - Simulación FEM*

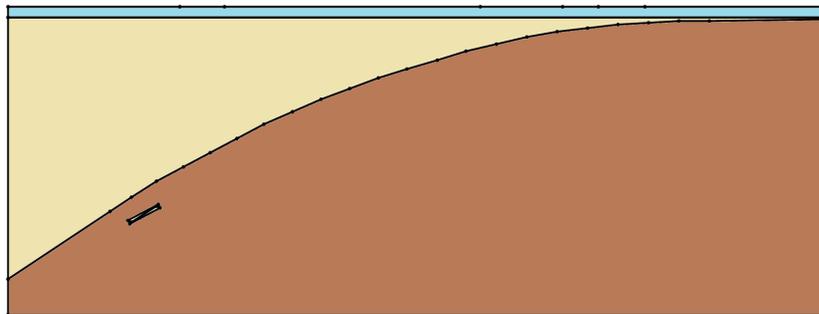
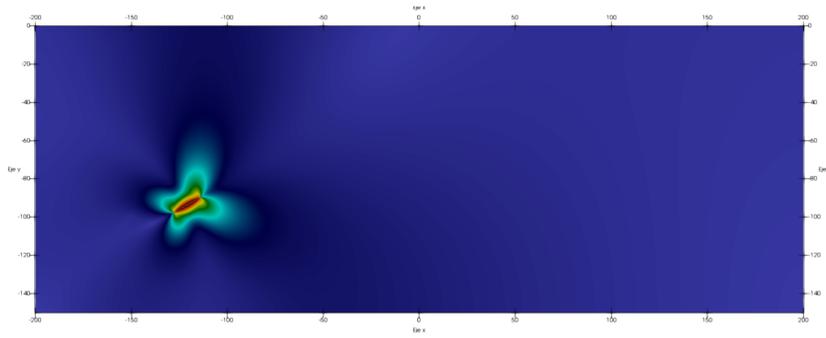
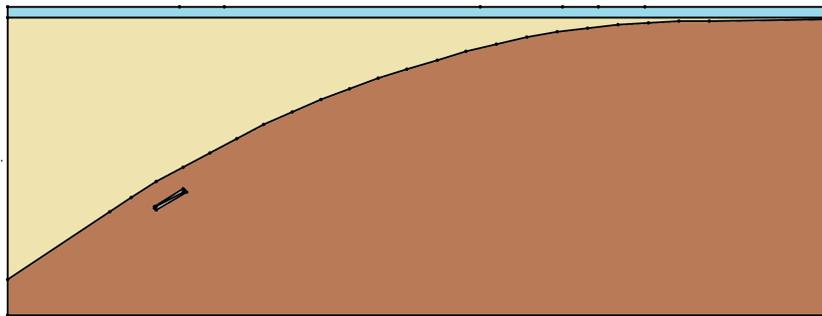
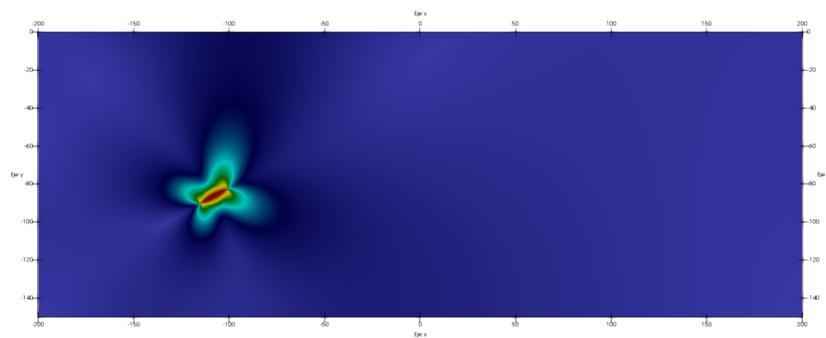
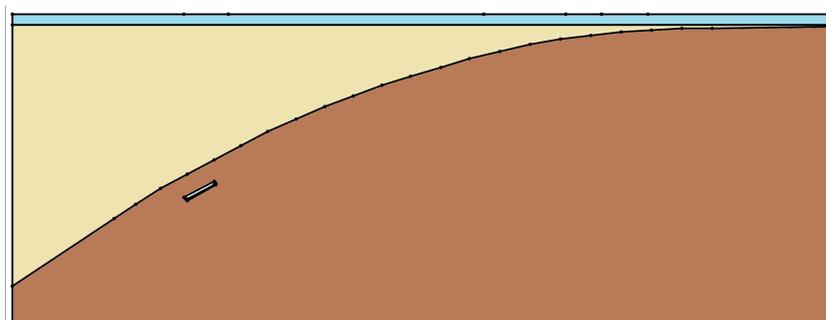


Figura 4.27: *Falla 1 - Geometría Triangle*

Figura 4.28: *Falla 2 - Simulación FEM*Figura 4.29: *Falla 2 - Geometría Triangle*Figura 4.30: *Falla 3 - Simulación FEM*Figura 4.31: *Falla 3 - Geometría Triangle*

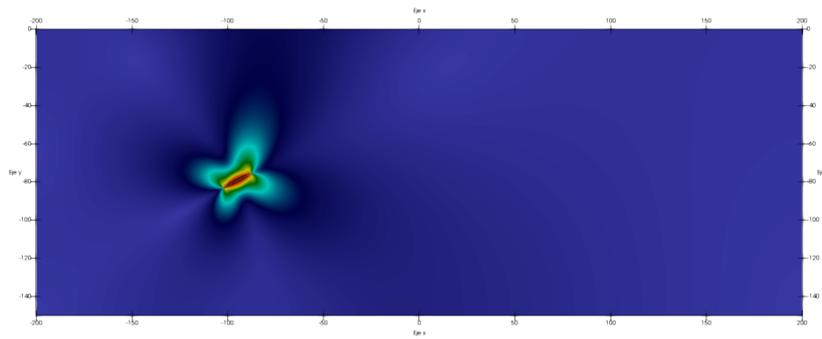


Figura 4.32: Falla 4 - Simulación FEM

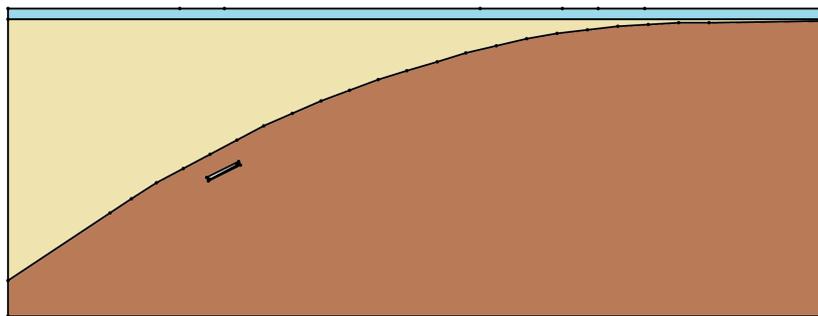


Figura 4.33: Falla 4 - Geometría Triangle

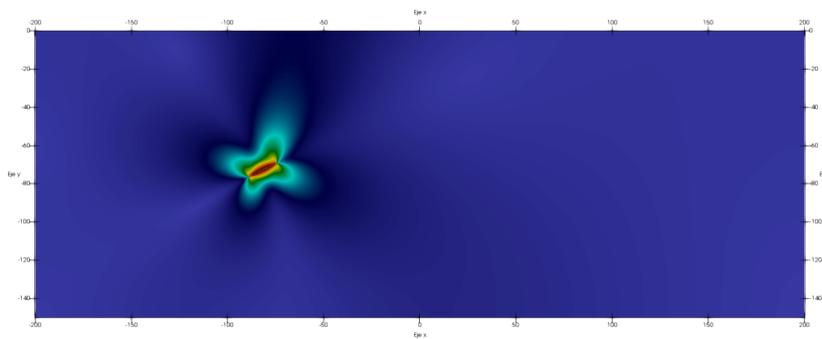


Figura 4.34: Falla 5 - Simulación FEM

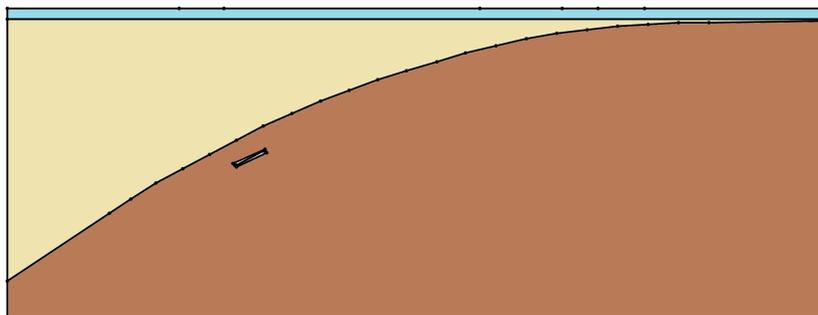
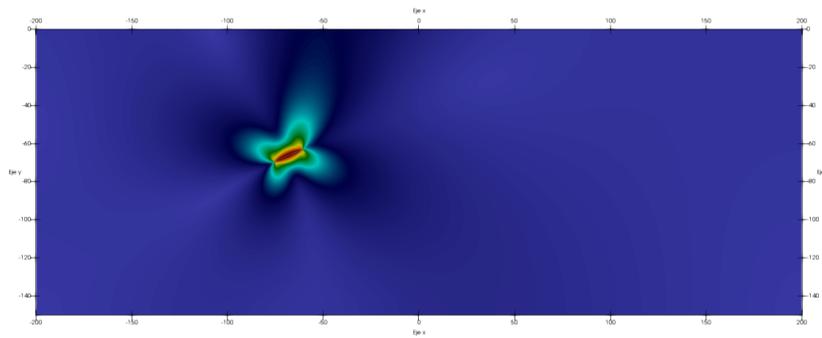
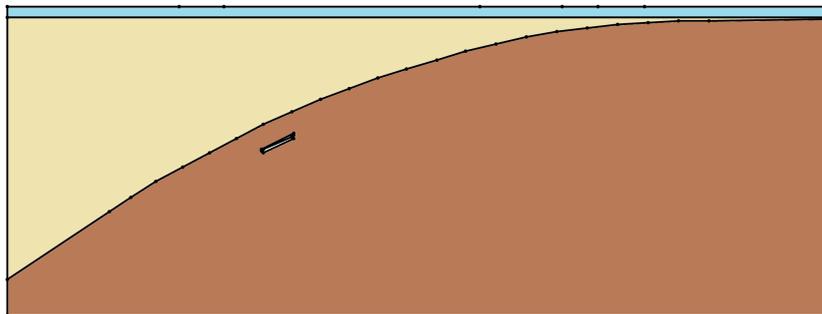
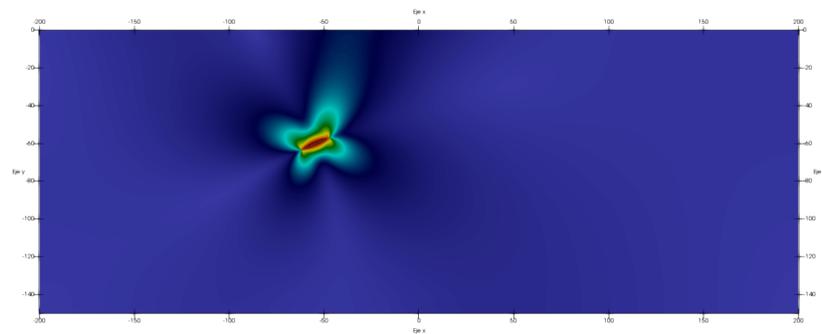
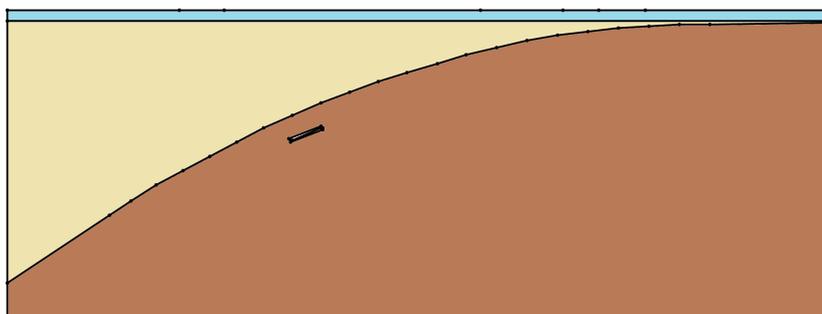


Figura 4.35: Falla 5 - Geometría Triangle

Figura 4.36: *Falla 06 - Simulación FEM*Figura 4.37: *Falla 06 - Geometría Triangle*Figura 4.38: *Falla 07 - Simulación FEM*Figura 4.39: *Falla 07 - Geometría Triangle*

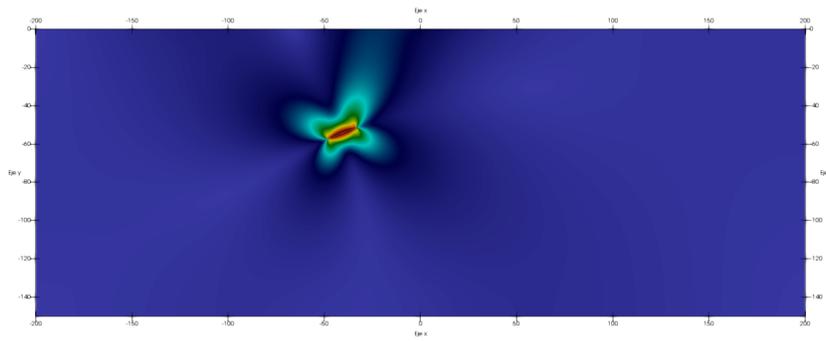


Figura 4.40: *Falla 08 - Simulación FEM*

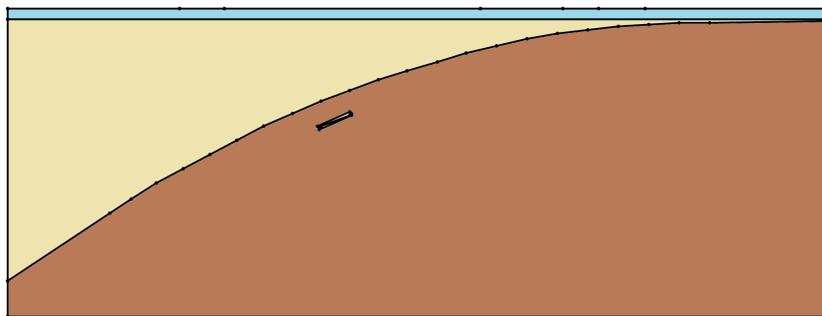


Figura 4.41: *Falla 08 - Geometría Triangle*

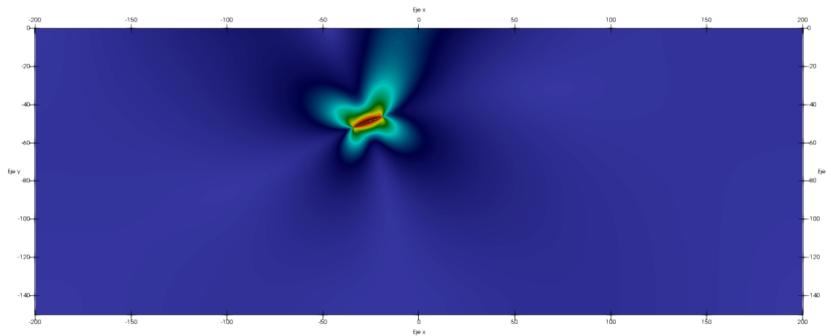


Figura 4.42: *Falla 09 - Simulación FEM*

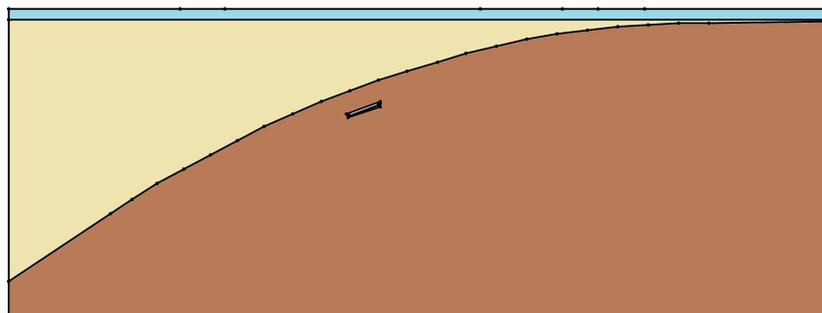
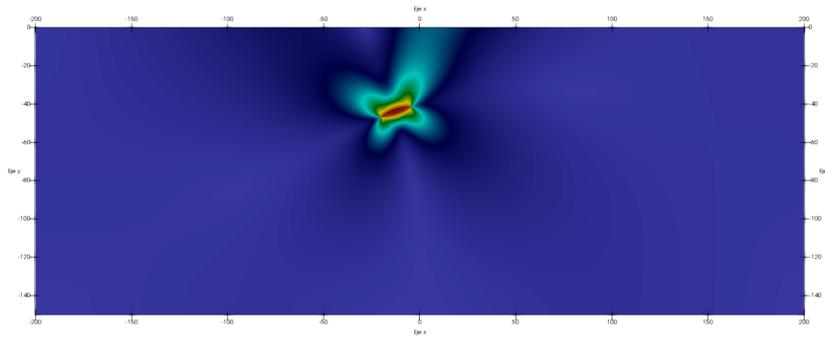
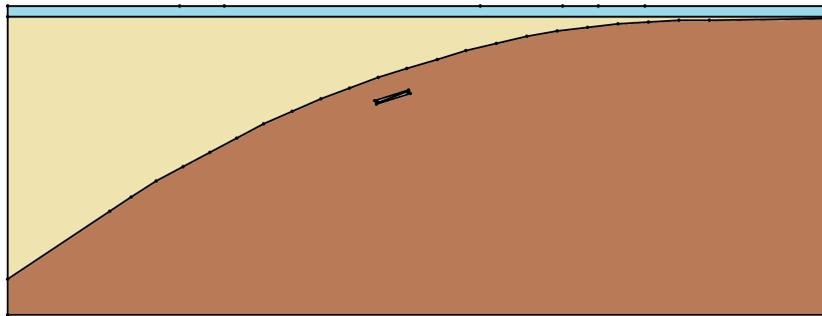
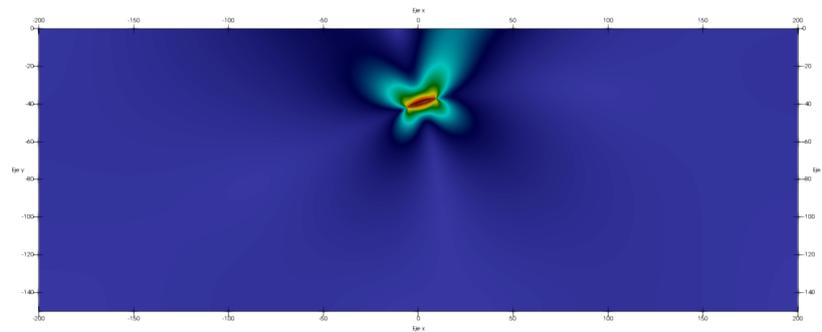
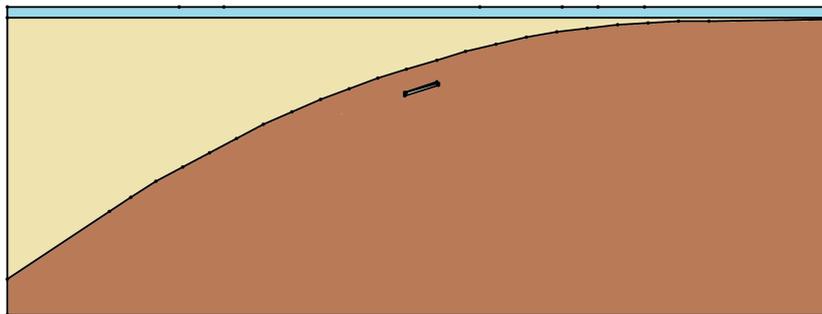


Figura 4.43: *Falla 09 - Geometría Triangle*

Figura 4.44: *Falla 10 - Simulación FEM*Figura 4.45: *Falla 10 - Geometría Triangle*Figura 4.46: *Falla 11 - Simulación FEM*Figura 4.47: *Falla 11 - Geometría Triangle*

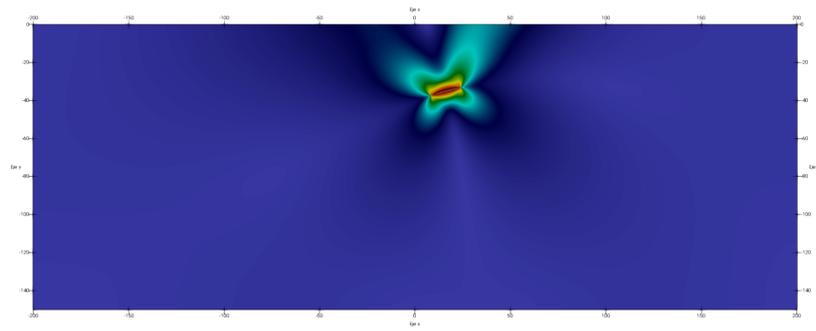


Figura 4.48: *Falla 12 - Simulación FEM*

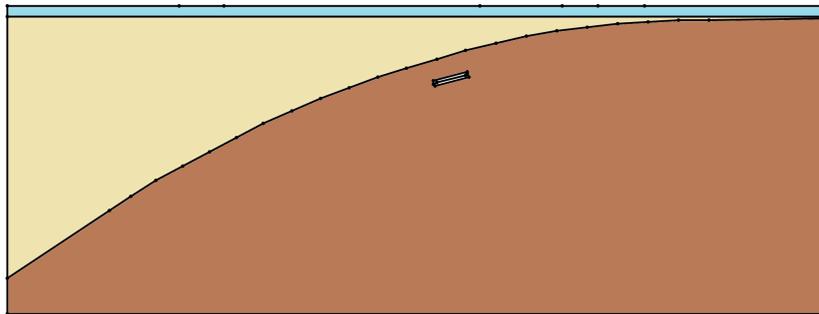


Figura 4.49: *Falla 12 - Geometría Triangle*

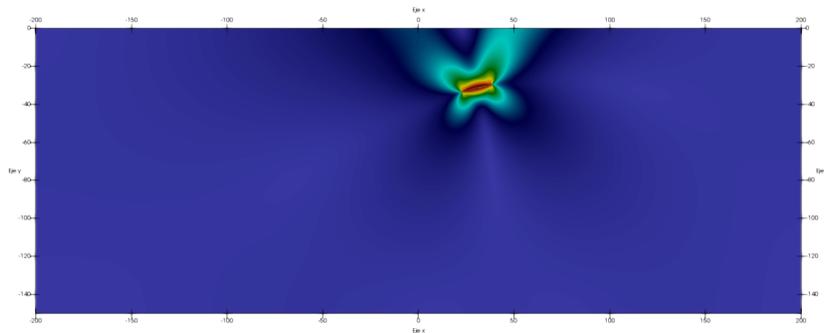


Figura 4.50: *Falla 13 - Simulación FEM*

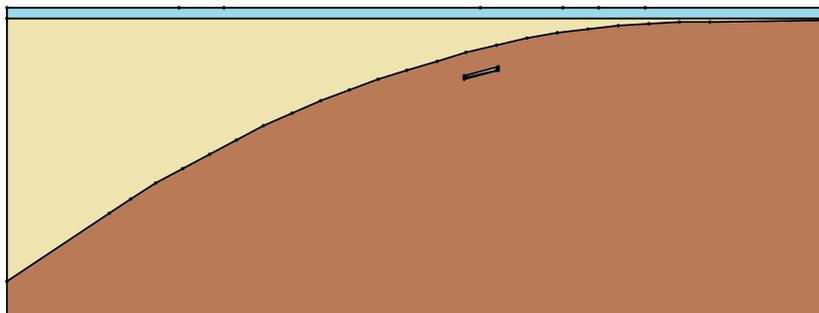
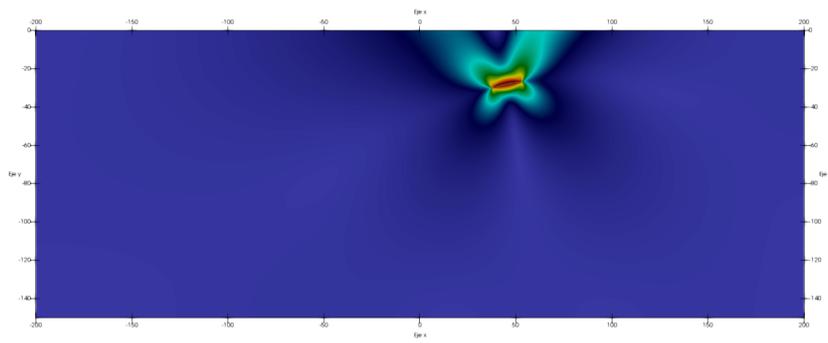
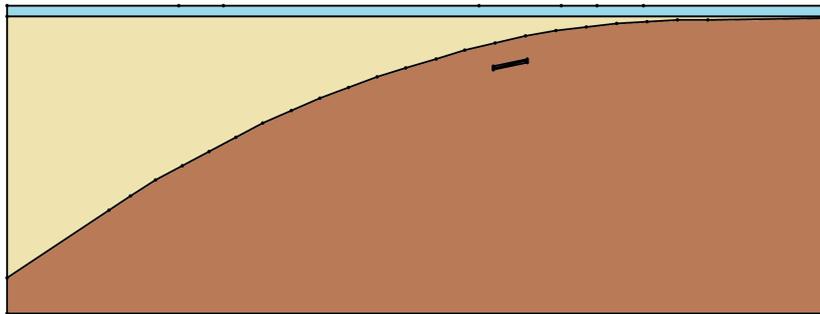
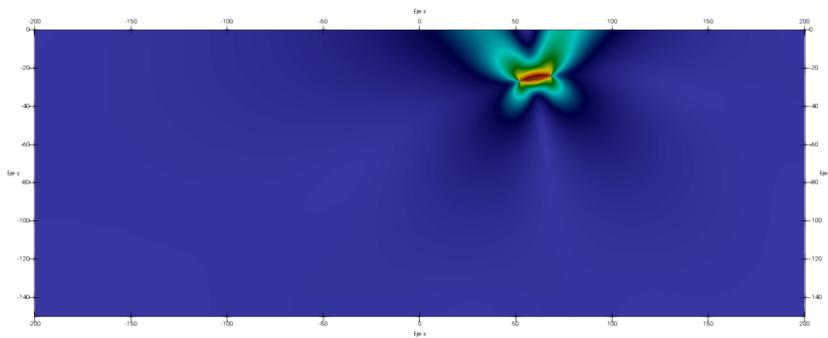
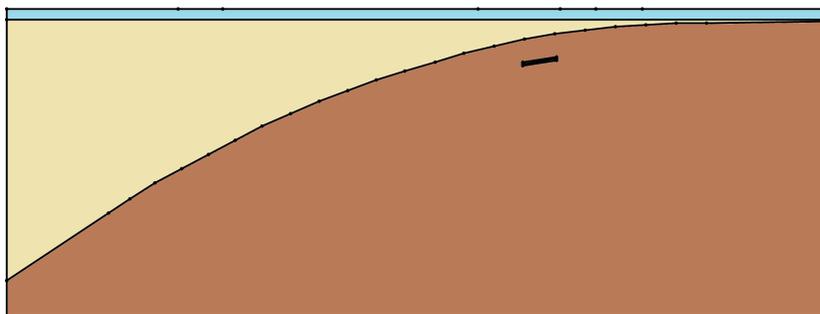


Figura 4.51: *Falla 13 - Geometría Triangle*

Figura 4.52: *Falla 14 - Simulación FEM*Figura 4.53: *Falla 14 - Geometría Triangle*Figura 4.54: *Falla 15 - Simulación FEM*Figura 4.55: *Falla 15 - Geometría Triangle*

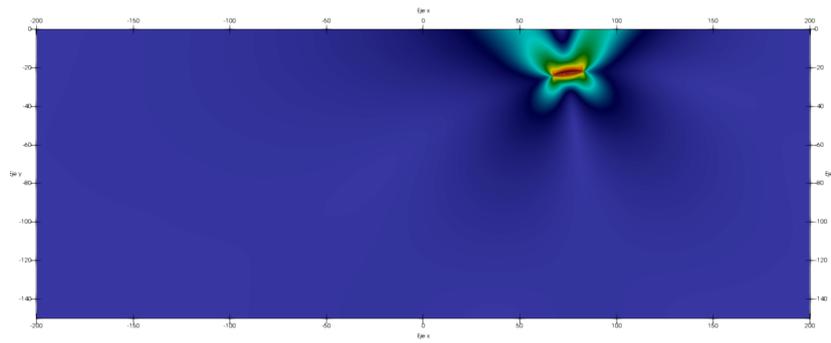


Figura 4.56: *Falla 16 - Simulación FEM*

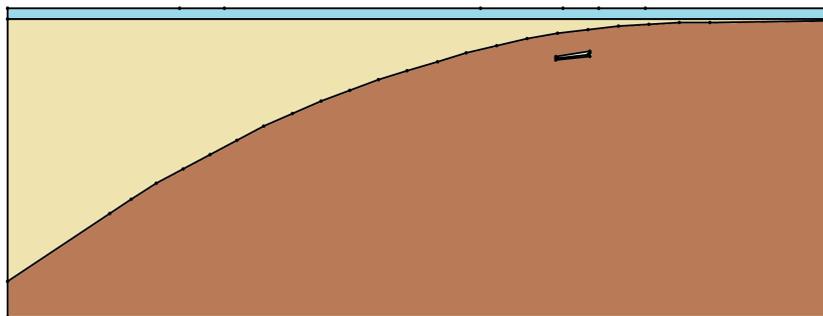


Figura 4.57: *Falla 16 - Geometría Triangle*

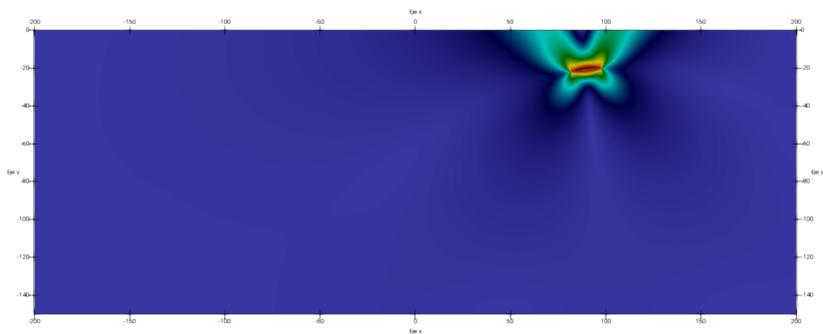


Figura 4.58: *Falla 17 - Simulación FEM*

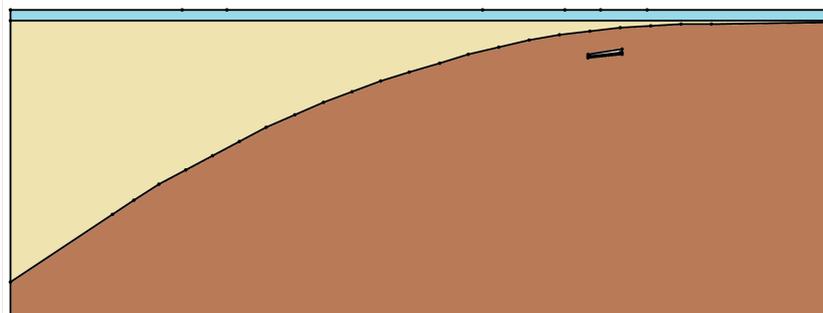
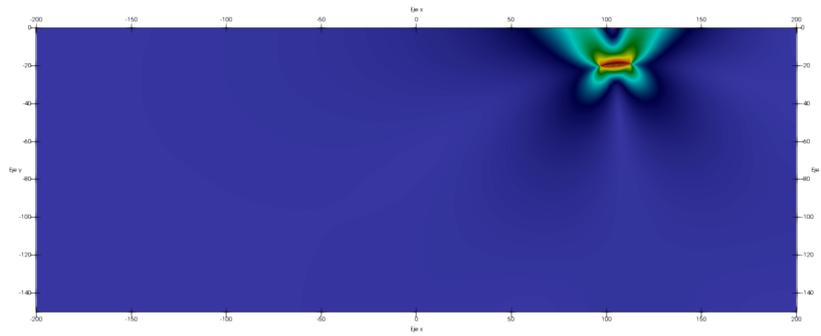
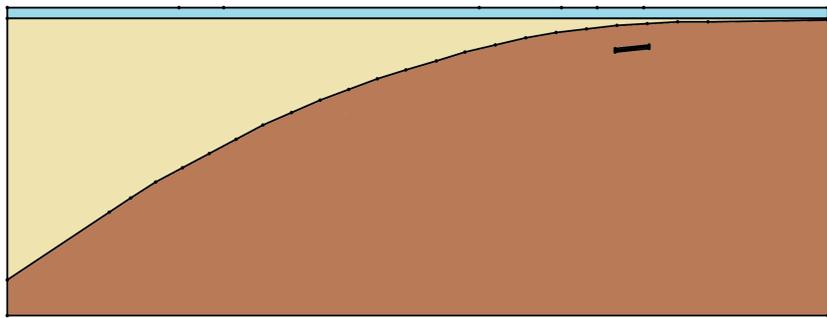
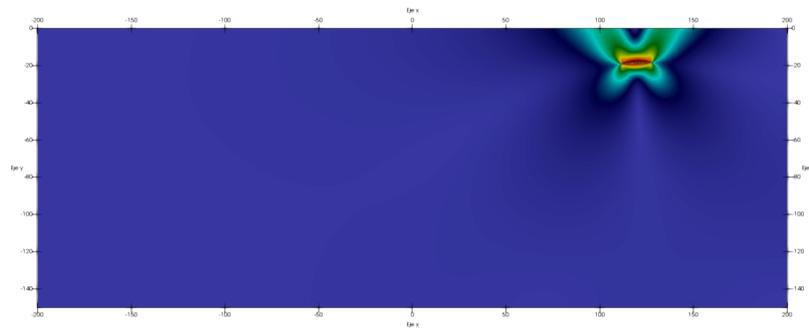
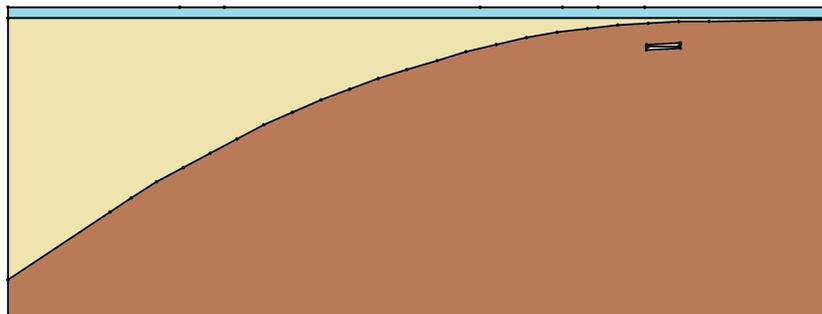


Figura 4.59: *Falla 17 - Geometría Triangle*

Figura 4.60: *Falla 18 - Simulación FEM*Figura 4.61: *Falla 18 - Geometría Triangle*Figura 4.62: *Falla 19 - Simulación FEM*Figura 4.63: *Falla 19 - Geometría Triangle*

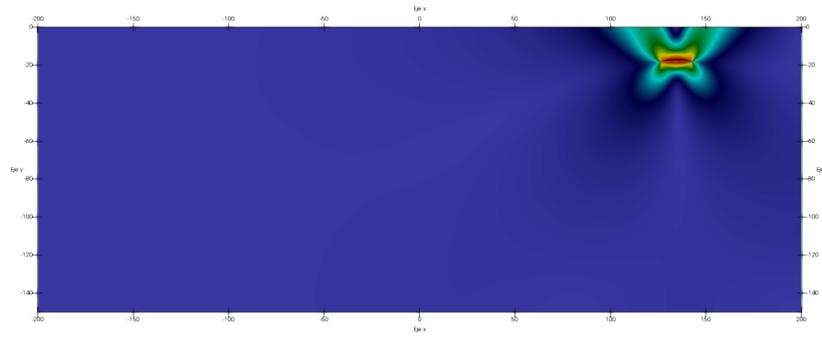


Figura 4.64: *Falla 20 - Simulación FEM*

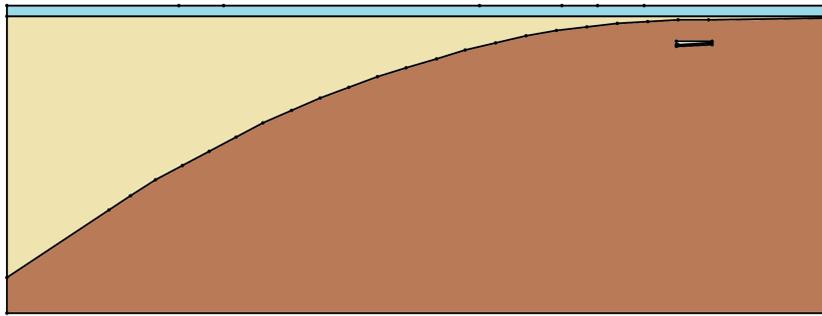


Figura 4.65: *Falla 20 - Geometría Triangle*

Capítulo 5

Análisis y Discusión

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones llevadas a cabo con el método de elementos finitos (FEM) permiten reproducir los desplazamientos superficiales experimentados en los periodos co-sísmico y post-sísmico sin considerar la relajación viscoelástica del manto con la cual algunos autores explican desplazamiento post-sísmico [4]. Para encontrar los valores de los parámetros de las simulaciones que logran reproducir los desplazamientos superficiales observados, se necesita experimentar con; un número variable de fallas, distintos deslizamientos impuesto (slip) y distintas combinaciones de sumatorias de desplazamientos superficiales a partir de fallas independientes lo cual genera una volumen de información, imágenes, recursos de procesamiento computacionales y tiempo de análisis considerable, por esta razón se opto por llevar a cabo un número de simulaciones moderado y sin una alta resolución espacial (se uso una densidad de malla acorde a las limitaciones de procesamiento). Los resultados de desplazamiento obtenidos mediante las simulaciones pretenden lograr el mejor ajuste de parámetros que a su vez reproduzca los desplazamientos observados por las estaciones GPS submarinas y sobre el continente.

Existe total libertad para el investigador de experimentar con distintos parámetros ya sea cantidades de deslizamientos y/o combinaciones (numero de fallas, cantidad de slip, ángulos de subsidencia, parámetros de rigidez, etc) además hay que considerar que se trata de un modelo idealizado y homogéneo. Los resultados del estudio presentan una primera aproximación al problema de encontrar los valores de los parámetros que explican los desplazamientos superficiales solo en términos de una componente elástica tanto como para el periodo co-sísmico como para el post-sísmico. Se observa que no es estrictamente necesario incorporar la componente viscosa para explicar los desplazamientos ocurridos durante le periodo post-sísmico.

Los desplazamiento que se obtuvieron al tratar de simular el movimiento continuo del slab en toda su extensión fueron una sumatoria de desplazamientos obtenidos con un slip constante para todos los segmentos que conformaban el slab. Se puede discutir si es posible o no discretizar una estructura y aplicar un número n de simulaciones y creer que se obtendrán los mismos resultados. Para este estudio se llevaron a cabo algunas pruebas de equivalencia de desplazamiento con las cuales quedo probado el hecho que la suma de n segmentos podía reproducir un efecto significativamente equivalente al calculado con la estructura como un continuo. La extensión del slab y su curvatura inevitablemente introducen algo de ruido al momento de hacer las simulaciones y esperar que estas sean totalmente iguales, pero en este estudio fue suficiente

con concretar las pruebas iniciales que permitían proceder con el resto de las simulaciones.

La resolución de los resultados de las distintas simulaciones dependieron de manera importante de la densidad del mallado de la zona de subducción que se uso. El orden de magnitud de longitud en la que se estaba interesado durante el estudio era en metros y centímetros, esta es la escala para los cuales se pueden extraer resultados con los cuales se pueden esbozar conclusiones. El programa Elast (la herramienta con la cual se llevaron a cabo las simulaciones numéricas) consideró una geometría de subducción de grandes dimensiones y se forzó a este programa para que entregara resultados en unidades de metro. El mallado de la zona de subducción en conjunto con el programa de simulación se forzaron al punto en que el procesamiento falló por falta de capacidad de procesamiento, en base a lo anterior se calibro la mayor densidad posible de la malla. El hecho de que con mayor capacidad de procesamiento es posible obtener mejores resultados para cada simulación e invita a considerar un conjunto mayor de segmentos y así reducir al mínimo la diferencia que existe entre tratar a una falla como un segmento continuo en donde hay distintos valores de desplazamiento a lo largo de la falla versus el forzar a que en la falla exista un deslizamiento constante a lo largo de toda sus extensión.

Los parámetros de elasticidad usados en este estudio fueron constantes en todo momento y no se considero el efecto del cambio de propiedades conforme aumenta la profundidad (en donde se generan cambios de temperatura y presión). El modelo de subducción tiene valores de rigidez fijos y esto indica que este estudio se puede considerar como una primera aproximación en cuanto a los efectos que las dislocaciones pueden generar el profundidad. Si se considera el efecto de la profundidad y como esto repercute en en las propiedades elásticas del medio, los resultados que se obtendrán deberían aproximarse mas a las observaciones si se hace apropiadamente.

La selección de las estaciones GPS para hacer las comparaciones de desplazamiento superficial con las modelaciones FEM se basó principalmente en la disponibilidad de datos para las estaciones marinas y sobre el continente. Se puede discutir el criterio considerado para hacer la comparación dado a que las 6 estaciones principales fueron alineadas y puestas sobre una transecta sin considerar la distancia de estas hacia dicha linea. La disposición de las estaciones sobre la transecta permitió comparar los desplazamientos de las estaciones GPS con los resultados calculados con el FEM. El argumento y sustento de lo anterior parte del hecho que se trabajó con un corte transversal de la zona de subducción y lo mas conveniente era colocar las estaciones a lo largo de la linea superior que representa la superficie. Para mejorar los resultados se debe considerar una estructura tridimensional que considere el efecto del campo de desplazamiento en las 3 direcciones, de esta manera se pueden tomar las estaciones GPS y luego compararlas directamente, en las mismas coordenadas, lo que se movió cada una.

Uno de los procedimientos importantes en este estudio fue lograr encontrar los valores de los parámetros que lograban generar un campo de desplazamiento tal que se tradujera como una buena aproximación a los datos de desplazamiento observado por las estaciones GPS. La exploración sistemática usando distintos valores de slip para un conjunto de fallas o fallas independiente permitieron hacerse una idea de lo alejado o cercano que estaban los valores

propuestos para asemejarse a los datos de desplazamiento superficial observados. Se abordaron dos enfoques, el primero consistió en tratar al slab como un elemento continuo que experimenta dislocación en la totalidad de su extensión (mediante la discretización en 20 segmentos en donde luego se hacía la sumatoria de los desplazamientos superficiales de cada elemento con un slip constante) y un segundo enfoque en donde la exploración consistió en considerar fallas independientes y cercanas a la superficie y ver como el efecto combinado de estas podía o no reproducir los valores de desplazamiento superficial observados con las estaciones GPS del fondo marino y el continente.

En este estudio no se considera la componente viscosa del medio y solo se trabaja con un modelo que consideraba la componente elástica. Un futuro estudio que considere la componente viscosa y elástica juntas permitiría realizar simulaciones que luego se podrían comparar con observaciones de desplazamiento llevadas a cabo con estaciones GPS. El principal objetivo de aislar las distintas componentes del problema (viscosa y elástica) tiene como fin poder estudiar independientemente el efecto de cada una de ellas y ver cual es la componente predominante para cada periodo.

Capítulo 6

Conclusiones

Los resultados de desplazamiento superficial obtenidos a partir del uso de la simulación numérica (FEM) en la zona de subducción frente a las costas de Japón (Tohoku) sugieren que es posible explicar el origen del desplazamiento observado en la superficie y el fondo marino a partir de un efecto meramente elástico, excluyendo de esta manera la componente viscosa que se considera en otros estudios para reproducir los mismos desplazamientos.

La contribución más importante en términos de desplazamiento superficial viene a partir de las fallas y dislocaciones que están más cercanas a la superficie. Conforme aumenta la profundidad, la cantidad de desplazamiento que migra hacia la superficie disminuye.

La densidad de malla de la zona de subducción incide directamente en el tiempo de proceso y la cantidad de información generada para cada simulación FEM efectuada. Mientras más densa es la malla mayor es la resolución de datos obtenidos. Hay un punto óptimo entre la densidad de malla máxima posible (en términos de capacidad de procesamiento) y la necesaria para obtener información de alta resolución que permita reproducir los datos observados por las estaciones GPS.

De acuerdo a lo expuesto en la sección de análisis y discusión, es posible realizar una simulación con el método FEM y queda bajo a criterio del investigador la cantidad y combinación de los parámetros que deben considerarse junto con el volumen de imágenes de simulación resultantes posteriormente a analizar.

Bibliografía

- [1] DANIELL ET AL, KHAZAI ET AL., 2011. *CATDAT damaging earthquake database.*
- [2] KELIN WANG, YAN HU, JIANGHENG HE *Deformation cycles of subduction earthquakes in a viscoelastic Earth*
- [3] SHUJI YAMAGIWA, SHIN'ICHI MIYAZAKI, KAZURO HIRAHARA, AND YUKITOSHI FUKAHATA *Afterslip and viscoelastic relaxation following the 2011 Tohoku-oki earthquake (Mw9.0) inferred from inland GPS and seafloor GPS/Acoustic data.*
- [4] TIANHAOZHE SUN, KELIN WANG, TAKESHI IINUMA, RYOTA HINO, JIANGHENG HE, HIROMI FUJIMOTO, MOTOYUKI KIDO, YUKIHITO OSADA, SATOSHI MIURA, YUSAKU OHTA AND YAN HU *Prevalence of viscoelastic relaxation after the 2011 Tohoku-oki earthquake.*
- [5] TOMITA, MOTOYUKI KIDO, YUKIHITO OSADA, RYOTA HINO, YUSAKU OHTA, TAKESHI IINUMA. *First measurement of the displacement rate of the Pacific Plate near the Japan Trench after the 2011 Tohoku-Oki earthquake using GPS Acoustic Technique Fumiaki.*
- [6] TAKUYA NISHIMURA, HIROSHI MUNEKANE, AND HIROSHI YARAI *The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and its aftershocks observed by GEONET*
- [7] T. IINUMA, R. HINO, M. KIDO, D. INAZU, Y. OSADA, Y. ITO, M. OHZONO, H. TSUSHIMA, S. SUZUKI, H.FUJIMOTO, S. MIURA. *Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data.*
- [8] T. IINUMA, R. HINO, M. KIDO, D. INAZU, Y. OSADA, Y. ITO, M. OHZONO, H. TSUSHIMA, S. SUZUKI, H.FUJIMOTO, S. MIURA. *Coseismic slip distribution of the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake (M9.0) refined by means of seafloor geodetic data.*
- [9] A. PETUKHIN, K. YOSHIDA , K. MIYAKOSHI *Tsunami simulation for the 2011 Great Tohoku earthquake (Mw 9.0), Japan, using seismic inversion source model and fully nonlinear tsunami model*
- [10] SEBASTIÁN RIQUELME, MAURICIO FUENTES, GAVIN P. HAYES, JAIME CAMPOS *A rapid estimation of near-field tsunami runup*
- [11] GOVERNMENT OF JAPAN, <https://japan.kantei.go.jp/kan/topics/201106/pdf/chapteriii-1.pdf>

Apéndice A

Códigos para MatLab y Script en Bash

A.1. Código MatLab: readdisplacement.m

```
1 clear
2 close all
3 clc
4
5 fid=fopen('estaciones.dat');
6 headers=textscan(fid,'%[^\n]',2);
7 datcell=textscan(fid,'%f %f %f %f');
8 x=datcell{1};
9 y=datcell{2};
10 u1=datcell{3};
11 u2=datcell{4};
12 nd=sqrt(u1.^2+u2.^2);
13 plot(x,u2)
14 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 10km
15     ')
16 xlabel('Distancia(km)')
17 ylabel('Desplazamiento(m)')
18 legend('Desplazamiento en u(y)a partir del reposo')
19 grid on
```

A.2. Código MatLab: compara.m

```
1 clear
2 close all
3 clc
4 %Carga de datos de 1km de resolucion
5 fid=fopen('estaciones1k.dat');
6 headers=textscan(fid,'%[^\n]',2);
7 datcell=textscan(fid,'%f %f %f %f');
8 x=datcell{1};
9 y=datcell{2};
```

```

10 u1=datcell{3};
11 u2=datcell{4};
12 nd=sqrt(u1.^2+u2.^2);
13 %Carga de datos de 10km de resolucio
14 fid2=fopen('estaciones10k.dat');
15 headers2=textscan(fid2,'%[\n]',2);
16 datcell2=textscan(fid2,'%f %f %f %f');
17 xx1=datcell2{1};
18 yy1=datcell2{2};
19 uu1=datcell2{3};
20 uu2=datcell2{4};
21 nd2=sqrt(uu1.^2+uu2.^2);
22 %
23 figure(1)
24 subplot(2,1,1)
25 plot(x,nd,'*')
26 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 1km
    ')
27 xlabel('Distancia(km)')
28 ylabel('Desplazamiento(m)')
29 legend('Desplazamiento en u(x,y)a partir del reposo')
30 grid
31 subplot(2,1,2)
32 plot(xx1,nd2,'*')
33 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 10km
    ')
34 xlabel('Distancia(km)')
35 ylabel('Desplazamiento(m)')
36 legend('Desplazamiento en u(x,y)a partir del reposo')
37 grid on
38
39 figure(2)
40 subplot(2,1,1)
41 plot(x,u1)
42 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 1km
    ')
43 xlabel('Distancia(km)')
44 ylabel('Desplazamiento(m)')
45 legend('Desplazamiento en u(x)a partir del reposo')
46 grid
47 subplot(2,1,2)
48 plot(xx1,uu1)
49 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 10km
    ')
50 xlabel('Distancia(km)')
51 ylabel('Desplazamiento(m)')

```

```

52 legend('Desplazamiento en u(x)a partir del reposo')
53 grid on
54
55 figure(3)
56 subplot(2,1,1)
57 plot(x,u2)
58 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 1km
    ')
59 xlabel('Distancia(km)')
60 ylabel('Desplazamiento(m)')
61 legend('Desplazamiento en u(y)a partir del reposo')
62 grid
63 subplot(2,1,2)
64 plot(x,u2)
65 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 10km
    ')
66 xlabel('Distancia(km)')
67 ylabel('Desplazamiento(m)')
68 legend('Desplazamiento en u(y)a partir del reposo')
69 grid on

```

A.3. Código MatLab: equifalla6.m

```

1 clear
2 close all
3 clc
4 %Carga de datos de 1km de resolucio
5 fid=fopen('estaciones1k.dat');
6 headers=textscan(fid,'%[^\n]',2);
7 datcell=textscan(fid,'%f %f %f %f');
8 x=datcell{1};
9 y=datcell{2};
10 u1=datcell{3};
11 u2=datcell{4};
12 nd=sqrt(u1.^2+u2.^2);
13 %Carga de datos de 10km de resolucio
14 fid2=fopen('estaciones10k.dat');
15 headers2=textscan(fid2,'%[^\n]',2);
16 datcell2=textscan(fid2,'%f %f %f %f');
17 xx1=datcell2{1};
18 yy1=datcell2{2};
19 uu1=datcell2{3};
20 uu2=datcell2{4};
21 nd2=sqrt(uu1.^2+uu2.^2);
22 %
23 figure(1)

```

```
24 subplot(2,1,1)
25 plot(x,nd,'*')
26 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 1km
      ')
27 xlabel('Distancia(km)')
28 ylabel('Desplazamiento(m)')
29 legend('Desplazamiento en u(x,y)a partir del reposo')
30 grid
31 subplot(2,1,2)
32 plot(xx1,nd2,'*')
33 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 10km
      ')
34 xlabel('Distancia(km)')
35 ylabel('Desplazamiento(m)')
36 legend('Desplazamiento en u(x,y)a partir del reposo')
37 grid on
38
39 figure(2)
40 subplot(2,1,1)
41 plot(x,u1)
42 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 1km
      ')
43 xlabel('Distancia(km)')
44 ylabel('Desplazamiento(m)')
45 legend('Desplazamiento en u(x)a partir del reposo')
46 grid
47 subplot(2,1,2)
48 plot(xx1,uu1)
49 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 10km
      ')
50 xlabel('Distancia(km)')
51 ylabel('Desplazamiento(m)')
52 legend('Desplazamiento en u(x)a partir del reposo')
53 grid on
54
55 figure(3)
56 subplot(2,1,1)
57 plot(x,u2)
58 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 1km
      ')
59 xlabel('Distancia(km)')
60 ylabel('Desplazamiento(m)')
61 legend('Desplazamiento en u(y)a partir del reposo')
62 grid
63 subplot(2,1,2)
64 plot(x,u2)
```

```
65 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 10km
      ')
66 xlabel('Distancia(km)')
67 ylabel('Desplazamiento(m)')
68 legend('Desplazamiento en u(y)a partir del reposo')
69 grid on
70
71 %% Comparacion desplazamiento entre la suma de la falla 1 mas la
      falla2
72 %respecto al desplazamiento generado por la falla 3.
73 clear
74 close all
75 clc
76
77 %Carga de datos falla 1
78 fid=fopen('estaciones_d2.dat');
79 headers=textscan(fid,'%[\n]',2);
80 testdistancia.m
81
82 datcell=textscan(fid,'%f %f %f %f');
83 x1=datcell{1}; %posiscion en x en km
84 y1=datcell{2}; %posicion en y en km
85 ux1=datcell{3}; %desplazamiento direccion x
86 uy1=datcell{4}; % desplazamiento direccion y
87 nd1=sqrt(ux1.^2+uy1.^2);
88 %Carga de datos falla 2
89 fid=fopen('estaciones_5d.dat');
90 headers2=textscan(fid,'%[\n]',2);
91 datcell=textscan(fid,'%f %f %f %f');
92 x2=datcell{1};
93 y2=datcell{2};
94 ux2=datcell{3};
95 uy2=datcell{4};
96 nd2=sqrt(ux2.^2+uy2.^2);
97 dif=nd1-nd2;
98 figure()
99 plot(x1,dif)
100
101 (comparacion.m)
102 clear
103 close all
104 clc
105
106 fid=fopen('estaciones_f1.dat');
107 headers=textscan(fid,'%[\n]',2);
108 datcell=textscan(fid,'%f %f %f %f');
```

```

109 x=datcell{1};
110 y=datcell{2};
111 u1=datcell{3};
112 u2=datcell{4};
113 nd=sqrt(u1.^2+u2.^2);
114 plot(x,u1)
115 title('Amplitud de desplazamiento a lo largo del perfil cada 100m
      ')
116 xlabel('Distancia(km)')
117 ylabel('Desplazamiento(m)')
118 legend('Desplazamiento en u(x)')
119 grid on

```

Código Bash

```

1  #! /bin/bash
2  #Autor:Marcelo Bernardin Sepulveda
3  #Fecha:02-05-2018
4  #Hint: Este programa de auto ejecucion se usa adentro de un
      directorio que contenga los archivos poly e input generados
      con el programa EQUIFALLAS. El programa genera un numero de
      directorios igual al numero de archivos poly,
5  #luego ingresa los archivos poly e input correlativos a cada
      directorio generado, ejemplo: Directorio falla01 va a contener
      al archivo falla_01.
6  #Generacion de directorios en funcion del numero de archivos.poly
      que existan en la carpeta de ejecucion de este programa.
7
8  a0="ls | grep falla_ "
9  a00=$(eval $a0) # Muestra las fallas_xy.poly que hay adentro
      del directorio en donde se ejecuta este programa, ej:
      falla_01.poly, falla_02.poly, falla_03,...
10 #echo $a00
11 a1="ls | grep falla_ | wc -l"
12 a2=$(eval $a1) # Almacena el numero de fallas_xy.poly que hay
      dentro directorio directorio
13 #echo $a2
14
15 #mkdir $(printf "falla%02i " $(seq 1 $a2)) # Se crean "a2
      numeros" directorios de la forma falla_xx
16 a3="ls -d */" # Almacena todos
      los directorios de forma falla_xx
17 a4=$(eval $a3) # Muestra los
      directorios de cada falla , ej; falla01, falla02,...
18 #echo $a4
19

```

```

20 #Ingreso de los archivos falla_ij e input_ij a directorios
    falla01, falla02, ..., fallaxy (???)
21
22     for i in $a00, j in $a4 ; do
23
24         cp $a00 $a4
25
26     done
27
28     start=01
29     end=$a2
30
31     for i in $(eval echo "${start}..$end") ; do
32         echo 'falla_'$i.poly
33         cp "falla_"$i".poly" "falla"$i
34         cp "input_"$i "falla"$i
35
36     done
37
38     exit
39
40 # Cambio de input_xy a input, recorre todos los directorios y
    entra a cambiar los input
41
42 # for i in */ ; do
43
44 # cd "$i"
45
46 # d1="ls | grep input"                # Se clasifican
    todos los archivos que tengan "input"
47 # d2=$(eval $d1)                      # Se almacena la
    variable
48 # mv $d2 input                        # Se cambia el
    input_?? a input, esto para poder correr elast
49
50 # cd ..
51
52 #done
53
54 # Etapa de ejecucion de programas: triangle, malla, elast.
55
56 for i in */ ; do
57
58     cd "$i"                            # Se ingresa a cada uno
    de los directorios fallaxy
59

```

```

60  c1="ls | grep poly" # Se el archivo
    que contiene la palabra poly, en esta caso los archivos.poly
61  c2=$(eval $c1)
62  # echo $c2
63  triangle -anepqCA $c2 # Se crean todas
    las mallas dentro cd cada directorio
64
65  cd ..
66
67  done
68
69  #Para poder correr el programa Malla y Elast
70
71  for i in */ ; do
72
73    cd "$i"
74
75    e1=" find -name '*.1.poly' " # Se busca
    generar un formato de la forma : falla_xy.1 , para esto se
    filtran los nombres
76    e2=$(eval $e1)
77    echo $e2
78    g1="ls | grep input"
79    g2=$(eval $g1)
80    f1= "echo $e2 | sed 's/1.poly/1/g' "
81    echo $f1 # $f1 corresponde al
    nombre de la falla_xy.1 que debe ejecutarse con el programa
82
83    ../../../../bin/malla <<EOF # Se ejecuta el programa
    malla
84    $f1 # Primer
    argumento-Malla
85    1 # Segundo argumento-
    malla
86    EOF
87    ../../../../bin/elast <<EOF # Se ejecuta el programa
    elast
88    $g2 # Primer
    argumento-elast
89    EOF
90
91    cd ..
92
93  done

```