

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



**Evidencia de migración sísmica previa al gran  
terremoto del 1 de Abril del 2014 ( $8.2 M_W$ )**

**Mauricio Ignacio Leiva Bustamante**

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

**13 de Junio de 2017**

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

**Evidencia de migración sísmica previa al gran  
terremoto del 1 de Abril del 2014 (8.2  $M_W$ )**

**Mauricio Ignacio Leiva Bustamante**

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

Profesor Guía:  
Dr. Klaus Bataille B.

Comisión:  
Klaus Bataille., Arturo Belmonte., Matthew Miller.



13 de Junio de 2017



---

# Agradecimientos

Al finalizar esta Habilitación Profesional tengo sentimientos encontrados, por una parte siento la alegría de finalizar con éxito una etapa de mi vida la cual no fue fácil, demandó mucho esfuerzo y sacrificios y que me hizo crecer no solo en conocimientos sino que también como persona ayudándome a madurar en muchas áreas, desde aprender una mayor constancia en el trabajo y a enfrentar la presión que trae consigo la profesión hasta mejorar mi relación con los demás y permitirme ser más maleable a los cambios que tiene la vida.

Por otro lado no puedo evitar sentir nostalgia debido a que las experiencias y las situaciones que experimenté durante estos largos años no volverán a repetirse, sin embargo no me arrepiento de nada, la gente que conocí, las experiencias que viví, mis éxitos y fracasos me templaron para enfrentar la nueva etapa que se avecina, si bien siento nostalgia también siento que cada etapa de nuestra vida tiene algo bueno que debemos aprovechar y sólo espero y le ruego a Dios que sepa aprovecharlo también en mi siguiente etapa.

Por lo anterior debo agradecer a todos quienes estuvieron siempre al lado mío, en primer lugar a Dios por ayudarme y darme la fuerza que necesitaba, mis padres por todo el apoyo que siempre me dieron ya sea en momentos de felicidad o tristeza, mi hermano Alfonso por ayudarme a madurar día a día más, a mi familia en general por su inmenso apoyo, al profesor Dante Figueroa por haberme apoyado desde el principio, al profesor Mathew Miller y mi profesor guía Klaus Bataille, porque alimentaron mi interés en la sismología, a mis amigos que aunque soy algo distante siempre estuvieron cerca y que a pesar de que a veces al enfrascarme en mi tesis me apartaba del mundo nunca se alejaron demasiado ni perdimos completamente el contacto, espero que eso se mantenga en el futuro.

Gracias a todos los que me acompañaron en este largo camino y a Dios por darme las fuerzas que necesitaba.

---

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>4</b>
<b>Resumen</b>	<b>11</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>12</b>
1.1. Objetivos . . . . .	17
1.2. Hipótesis . . . . .	17
<b>2. Metodología</b>	<b>18</b>
2.1. Marco teórico: . . . . .	19
2.2. Aplicación Practica: . . . . .	27
2.3. Base de Datos . . . . .	34
2.4. Zona De Estudio . . . . .	37
2.5. Organización de datos: . . . . .	37
2.6. División en Ventanas de Eventos . . . . .	42
<b>3. Resultados</b>	<b>45</b>
3.1. Primera Ventana de Eventos . . . . .	46
3.1.1. Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad: . .	46
3.1.2. Esfuerzos de Coulomb considerando el intersísmico . . . . .	49
3.1.3. Mecanismos Focales: . . . . .	52
3.1.4. Resumen . . . . .	53
3.2. Segunda Ventana de Eventos . . . . .	53
3.2.1. Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad . .	53
3.2.2. Esfuerzos de Coulomb considerando el Intersísmico . . . . .	57
3.2.3. Mecanismos Focales: . . . . .	60
3.2.4. Resumen . . . . .	61
3.3. Tercera Ventana de Eventos . . . . .	61
3.3.1. Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad . .	62

3.3.2.	Esfuerzos de Coulomb considerando el intersísmico . . . . .	67
3.3.3.	Mecanismos Focales: . . . . .	69
3.3.4.	Resumen . . . . .	70
3.4.	Cuarta Ventana de Eventos . . . . .	71
3.4.1.	Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad . .	71
3.4.2.	Esfuerzos de Coulomb considerando el intersísmico . . . . .	75
3.4.3.	Esfuerzos de Coulomb considerando el intersísmico y el “Terremoto Lento” . . . . .	78
3.4.4.	Mecanismos Focales: . . . . .	80
3.4.5.	Resumen . . . . .	81
3.5.	Quinta Ventana de Eventos . . . . .	82
3.5.1.	Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad . .	82
3.5.2.	Esfuerzos de Coulomb considerando el intersísmico . . . . .	85
3.5.3.	Esfuerzos de Coulomb considerando el intersísmico y el “Terremoto Lento” . . . . .	89
3.5.4.	Mecanismos Focales: . . . . .	92
3.5.5.	Resumen . . . . .	93
3.6.	Sexta Ventana de Eventos . . . . .	94
3.6.1.	Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad . .	94
3.6.2.	Esfuerzos de Coulomb considerando el intersísmico . . . . .	97
3.6.3.	Esfuerzos de Coulomb considerando el intersísmico y el “Terremoto Lento” . . . . .	100
3.6.4.	Mecanismos Focales: . . . . .	105
3.6.5.	Resumen . . . . .	105
<b>4.</b>	<b>Discusión</b>	<b>107</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>115</b>
<b>6.</b>	<b>Anexo: Demostración</b>	<b>117</b>

---

# Índice de figuras

1.1. Representación de la Sismicidad Chilena . . . . .	14
1.2. Laguna sísmica mostrada en Schurr et.al 2014 [5]. . . . .	15
1.3. Actividad sísmica ocurrida durante el 2014, los eventos azulados corresponden a eventos más antiguos, volviéndose rojos conforme son más nuevos . . . . .	16
2.1. Esfuerzos de Coulomb en Eventos Sintéticos . . . . .	31
2.2. Resultado Sintético de Lin & Stein et.al 2004 [7] . . . . .	32
2.3. Representación de los mecanismos focales dependiendo del movimiento de la falla. . . . .	35
2.4. Mapa de la Zona de Estudio . . . . .	37
2.5. Profundidad del Límite de Placas con Sismicidad en los planos Longitud-Profundidad Catálogo del CSN . . . . .	39
2.6. Acoplamiento según S.Ruiz et.al 2014 [11] . . . . .	40
2.7. Sismicidad en los planos Longitud-Profundidad Catálogo del CSN . . . . .	41
3.1. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 10 . . . . .	46
3.2. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 1-10 . . . . .	47
3.3. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 10 con un intersísmico de 100 años . . . . .	50
3.4. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 1-10 . . . . .	51
3.5. Mecanismos focales Primera Ventana . . . . .	53
3.6. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 20 incluyendo . . . . .	54
3.7. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 11-20 . . . . .	55
3.8. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 20 con un intersísmico de 103 años . . . . .	58
3.9. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 11-20 . . . . .	59
3.10. Mecanismos focales Segunda Ventana . . . . .	60
3.11. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 28 . . . . .	62
3.12. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 21-28 . . . . .	64

3.13. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 28 con un intersísmico de 108 años	66
3.14. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 21-28 . . . . .	68
3.15. Mecanismos focales Tercera Ventana . . . . .	70
3.16. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 38 sin intersísmico . . . . .	72
3.17. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 1-10 . . . . .	73
3.18. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 38 con un intersísmico de 109 años	75
3.19. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 29-38 . . . . .	76
3.20. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 29-38 . . . . .	79
3.21. Mecanismos focales Cuarta Ventana . . . . .	80
3.22. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 48 incluyendo un acople de 50 años	82
3.23. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 39-48 . . . . .	84
3.24. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 48 con un intersísmico de 109 años	86
3.25. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 39-48 . . . . .	87
3.26. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 48 con un intersísmico de 109 años y el Evento Lento . . . . .	89
3.27. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 39-48 . . . . .	90
3.28. Mecanismos focales Quinta Ventana . . . . .	92
3.29. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 54 . . . . .	95
3.30. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 49-59 . . . . .	96
3.31. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 54 con un intersísmico de 109 años	98
3.32. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 49-54 . . . . .	99
3.33. Esfuerzos de Coulomb Eventos 1 al 54, con un intersísmico de 109 años y el Evento Lento . . . . .	101
3.34. Valores del $CS_e$ en los eventos de la Ventana de Eventos 49-54 . . . . .	102
3.35. Comparativa Esfuerzos vs Deformación . . . . .	104
3.36. Mecanismos focales Sexta Ventana . . . . .	105
3.37. Comparación del $CS_e$ previo a la ventana con el $CS_e$ previo a cada evento . . . . .	106
4.1. Estadísticas de los Eventos sin Deslizamiento Intersísmico . . . . .	110
4.2. Estadísticas de los Eventos sin Deslizamiento Intersísmico . . . . .	111
4.3. Estadísticas de los Eventos Incluyendo el Intersísmico y el Evento Lento	112
4.4. Comparativa de $CS_e$ . . . . .	113

---

# Índice de cuadros

2.1. Geometrías de falla para cada interfase . . . . .	39
2.2. Plano de falla aproximado Para el movimiento lento . . . . .	41
2.3. Intervalos temporales de las ventanas de eventos . . . . .	42
3.1. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 1-10. . . . .	48
3.2. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 1-10. . . . .	49
3.3. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 1-10. . . . .	52
3.4. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 1-10. . . . .	52
3.5. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 11-20. . . . .	56
3.6. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 11-20. . . . .	57
3.7. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 11-20. . . . .	60
3.8. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 21-28. . . . .	64
3.9. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 21-29. . . . .	65
3.10. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 21-28. . . . .	68
3.11. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 21-29. . . . .	69
3.12. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 29 a 38. . . . .	74
3.13. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 29 a 38. . . . .	74
3.14. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 29-38 con acoplamiento. . . . .	77
3.15. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 29-38 con acoplamiento. . . . .	77
3.16. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 29-38 considerando el acoplamiento y el “Terremoto Lento”. . . . .	79
3.17. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 39-48 . . . . .	84
3.18. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 39-48 . . . . .	84
3.19. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 39-48 considerando el acoplamiento . . . . .	88
3.20. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 39-48 considerando el acoplamiento . . . . .	88

---

3.21. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 39-48 considerando el acoplamiento y el “Terremoto Lento” . . . . .	91
3.22. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 39-48 considerando el acoplamiento y el “Terremoto Lento” . . . . .	91
3.23. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 49-54. . . . .	96
3.24. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 49-54. . . . .	96
3.25. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 49-54. . . . .	99
3.26. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 49-54. . . . .	99
3.27. Sismos Negativos en la Ventana de Eventos 49-54 considerando el acoplamiento y el “Terremoto Lento”. . . . .	102
3.28. Sismos Positivos en la Ventana de Eventos 49-54 considerando el acoplamiento y el “Terremoto Lento”. . . . .	103

---

# Resumen

Mediante el cálculo de los esfuerzos de Coulomb se caracteriza las zonas más probables de actividad sísmica durante el enjambre sísmico asociado al terremoto de Iquique del 1 de Abril del 2014 ( $8.2 M_W$ ). Considerando la acumulación de esfuerzos debido a fuentes sísmicas y asísmicas, la mayoría de los eventos se ubican en sitios donde la acumulación de esfuerzos de Coulomb es positivo y mayor a  $0,6 \text{ bar}$ . Los datos cubren desde el 27 de Junio del 2005 hasta el 1 de Abril del 2014 y desde los  $18^\circ$  hasta los  $21^\circ$  de latitud sur, y desde los  $69$  hasta los  $72^\circ$  de longitud Oeste.

Son utilizados tres catálogos, (a) del Centro Sismológico Nacional (CSN), que contiene la localización de los eventos, (b) del Harvard CMT que contiene los mecanismos focales de la mayor parte de los eventos, y (c) del GeoForschungZentrum (GFZ) que contiene los mecanismos focales de algunos eventos no incluidos en el catálogo del Harvard CMT.

Se simula la acumulación de esfuerzos durante el intersísmico al suponer movimientos en dos planos de falla, con la geometría de la subducción en la zona de estudio. Se asume que la subducción involucra movimiento inverso en la interfase superior y movimiento normal en la interfase inferior con un deslizamiento de  $\approx 6,7 \frac{\text{cm}}{\text{año}}$ . La interfase superior corresponde a la zona de contacto entre las placas Sudamericana y de Nazca. La interfase inferior corresponde al límite de la respuesta frágil con la superficie dúctil del manto. Se aproxima de manera similar el Evento Lento reportado por Ruiz et.al 2014, como una segunda fuente asísmica de esfuerzos, que involucra movimiento únicamente en la interfase superior.

---

# Capítulo 1

## Introducción

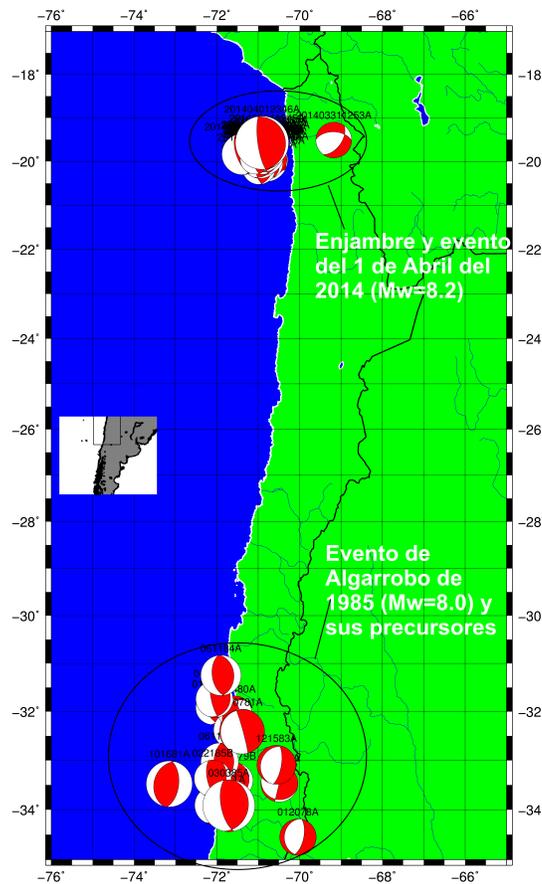
La migración de la actividad sísmica, en el período previo a un gran evento sísmico, propuesta por Mogi et.al 1968 [14], ha sido una materia de constante de estudio por diversos autores. Trabajos como los de Wu et.al 2008 [15] y L.L. Romashkova et.al 2009 [16] (quienes han buscado indicios de que las migraciones sísmicas vendrían a ser una preparación para un evento de gran magnitud) son ejemplos de estudios de este tipo y de la variedad de los métodos utilizados.

Chile es un país en el que la actividad sísmica es muy habitual, producto de que la mayor parte de sus más de 4000 km que lo componen de norte a sur, están ubicados en la Zona de Subducción entre la Placa Sudamericana y la Placa de Nazca (la cual forma parte del Cinturón de Fuego del Pacífico). En este borde de placas, la actividad sísmica es (salvo algunas excepciones) de geometría inversa y en ocasiones de gran magnitud, al punto de poder ocurrir, a lo largo del país, más de un Mega Evento (evento de magnitud superior a  $8.8 M_W$ , donde  $M_W$  es la *Magnitud de Momento Sísmico*) en menos de 20 años.

Entre algunos de los Mayores eventos ocurridos en el país recientemente, se cuentan el terremoto de Valdivia- de mayor magnitud registrado- (22 de mayo de 1960,  $9.5 M_W$ ), el terremoto del Maule (27 de febrero de 2010,  $8.8 M_W$ ), el terremoto de Iquique (01 de abril de 2014,  $8.2 M_W$ ) y el terremoto de Algarrobo (03 de marzo de 1985,  $8.0 M_W$ ). De estos, los dos primeros se encuentran dentro de los 10 eventos sísmicos de mayor magnitud a nivel mundial, desde que hay registros.

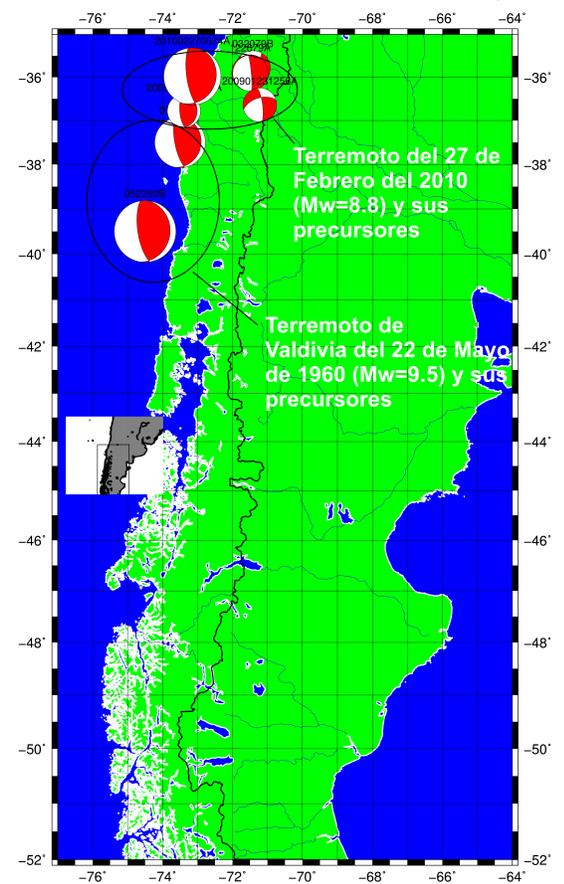
Puede verse en la figura (1.1) que, si bien más de uno de los Mega Eventos mencionados tienen enjambres precursores, sólo en el caso del evento de Iquique (01 de abril del 2014,  $8.2 M_W$ ) ocurrió un enjambre con eventos lo bastante grandes como para ser representados por mecanismos focales (necesarios para el método a utilizar) en los días previos al evento principal. Por el contrario, en el caso del terremoto de Algarrobo (03 de marzo de 1985,  $8.0 M_W$ ) hubo enjambres sísmicos tanto en los años previos como los días anteriores al evento principal. Sin embargo, en muchos casos, los eventos en los enjambres no fueron de la magnitud suficiente como para tener representación mediante mecanismos focales en el catálogo del Harvard CMT ( $M_W \geq 4.7$ ) y, de acuerdo al estudio de Korrat & Madariaga et.al 1986 [12], en los meses previos al evento principal sólo siete eventos sobrepasaron los  $4.3 M_W$ , de los cuales, sólo uno de estos tuvo magnitud suficiente para tener representación en el catálogo del Harvard CMT.

Eventos Sísmicos Previos Chile Centro y Norte



(a)

Eventos Sísmicos Previos Chile Centro y Sur



(b)

Figura 1.1: Representación en mecanismos focales de la actividad previa a un Mega-Evento junto con la representación de los Mega-Eventos ocurridos desde 1960 hasta el 2014 entre los  $-18^{\circ}$  y los  $-35^{\circ}$  de latitud (a) y entre los  $35^{\circ}$  y los  $-52^{\circ}$  de latitud (b)

Hay eventos que no presentan registros de una gran concentración de actividad sísmica precursora como es el caso del terremoto de Valdivia (22 de mayo de 1960,  $9.5 M_W$ ). Si bien constituye el sismo más fuerte del que se tenga registro, la escasa cobertura instrumental que había en la época, dificulta el análisis de estos eventos para obtener la representación mediante mecanismos focales (el catálogo de Harvard CMT, que comienza a partir de 1976). Además, no se observan registros de la geometría de la falla en la actividad sísmica precursora. La única excepción, sería el evento precursor ocurrido el día anterior en Arauco (21 de mayo de 1960,  $7.9 M_W$ ).

La presente investigación busca verificar si el enjambre precursor al evento de Iquique (01 de abril de 2014,  $8.2 M_W$ ) se trató o no de una migración de la actividad sísmica, ya que en el Norte Grande de Chile se cuenta con una alta cobertura instrumental (S.Ruiz et.al ACHISINA 2014 [10]). Además, este es el único enjambre en el que se muestran señales de que hubo una migración de la actividad sísmica en los días previos al evento principal y que, además, registra muchos eventos con magnitud mayor a  $4.7 M_W$ .

La zona en la que ocurre el evento de Iquique (01 de abril de 2014,  $8.2 M_W$ ) se encontraba en una laguna sísmica desde un evento ocurrido el 05 de septiembre de 1877 ( $8.5 M_W$ ), como se ve en la figura (1.2) obtenida de Schurr et.al 2014 [5].

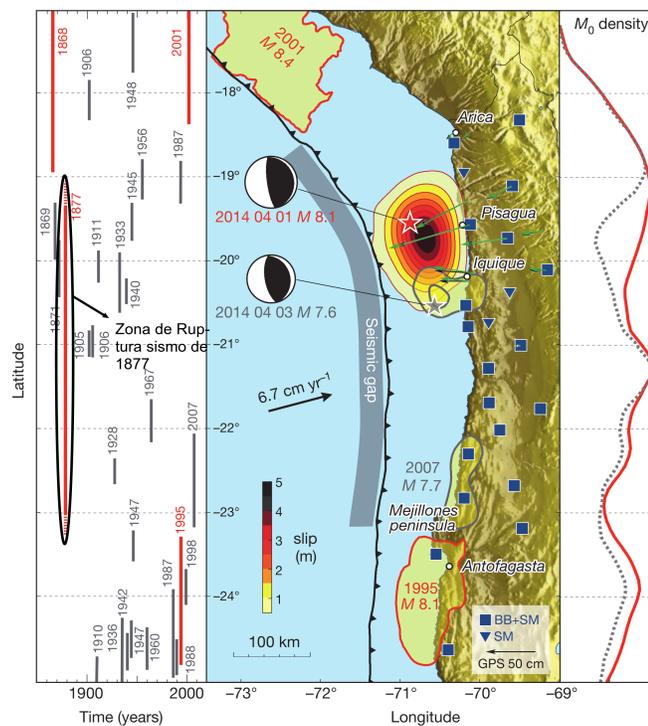


Figura 1.2: Laguna sísmica mostrada en Schurr et.al 2014 [5].

Según los trabajos de W. Bloch et.al 2014 [6] y S.Ruiz et.al ACHISINA 2014 [10], la recurrencia histórica de los eventos, permitía esperar, dentro de un tiempo relativamente corto, la ocurrencia de un nuevo evento. Se esperaba, por tanto, desde la década de los noventa, que un Mega Evento tuviera lugar en aquella zona. A partir del año 2005, comenzaron a registrarse una seguidilla de enjambres sísmicos en la zona, la cual, además tenía un alto grado de acoplamiento.

En esta zona se observan dos tipos de sismicidad en dos sitios en particular. El primero, se encuentra cercano a la fosa oceánica en la que ocurre subducción, por lo que, salvo algunos eventos, mucha de la actividad corresponde a eventos de falla inversa, con una orientación de fallas semiparalelas al norte geográfico. El segundo sitio, de concentración de sismicidad es la zona precordillerana, donde se observa que la actividad predominantemente es del tipo normal. No obstante, la sismicidad de esta zona no se tomará en cuenta debido a lo pequeño de la mayoría de los eventos ocurridos allí.

En el primer sitio de concentración de la sismicidad, entre el 13 de junio de 2005 y el 15 de marzo de 2014, la actividad sísmica se sucedía irregularmente. Luego, tuvo lugar un evento ocurrido el 16 de marzo de 2014, cuya magnitud fue de  $6.7 M_W$  y posteriormente comenzó un enjambre sísmico que culminó con el evento de Iquique (01 de abril de 2014,  $8.2 M_W$ ).

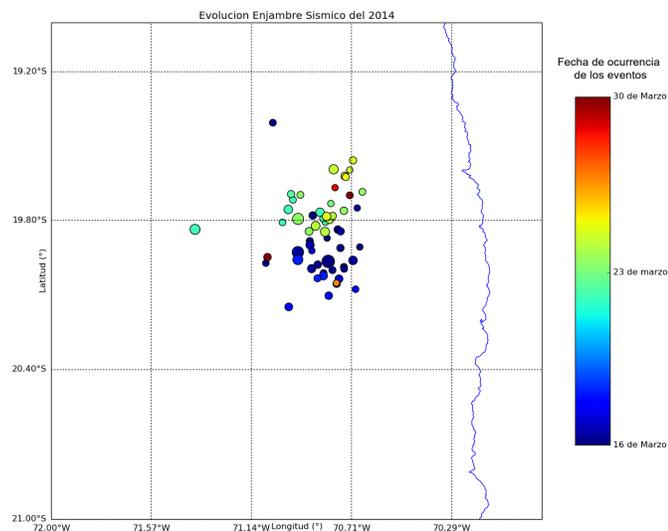


Figura 1.3: Actividad sísmica ocurrida durante el 2014, los eventos azulados corresponden a eventos más antiguos, volviéndose rojos conforme son más nuevos

No obstante, la ocurrencia de un enjambre, previo a un evento de gran magnitud, no es algo común. De acuerdo con S.Ruiz et.al ACHISINA 2014 [10], la sismicidad en este enjambre se desplazaría progresivamente hacia el norte rodeando la futura área de ruptura, ocurriendo muchos eventos de magnitud superior a  $5.0 M_W$  con muy poco tiempo de separación, como se observa en la figura (1.3).

Ante la situación planteada, cabe preguntarse si ¿Los eventos ocurridos están relacionados entre sí? De ser así, ¿Cómo?

## 1.1. Objetivos:

A continuación se presentan los objetivos de este trabajo

### Objetivo Principal:

- i Mediante el valor del cambio de los esfuerzos de Coulomb, determinar si los eventos ocurren en sitios donde los esfuerzos de Coulomb son positivos.

### Objetivos Específicos:

- i Interpretar los cambios de los esfuerzos de Coulomb para cada ventana de diez eventos y obtener un perfil con la influencia estos en los eventos posteriores.
- ii Dilucidar cuanto cambian los movimientos asísmicos el valor de los Esfuerzos de Coulomb y si al considerarlos, aumenta la cantidad de eventos cuyo hipocentro se encuentre en una Zona de Stress Positivo.
- iii Verificar si los esfuerzos de Coulomb son una herramienta útil a aplicar para el análisis de la sismicidad en áreas de subducción, al considerar los movimientos asísmicos.

## 1.2. Hipótesis:

La migración de la actividad sísmica iniciada el 16 de Marzo de 2014 y que culminó con el terremoto del 1 de Abril del 2014, está relacionada con los cambios en los esfuerzos de Coulomb, y en cierto modo, es posible explicarla por este método.

Además, se supondrá que los movimientos generado por fuentes asísmicas, podrían alterar de manera significativa los esfuerzos de Coulomb en la zona. Por lo que, al considerarlos podrían hacer que el MCEC (Método del Cambio de Esfuerzos de Coulomb) sea utilizable para el tiempo previo a un evento de gran tamaño en márgenes de subducción.

---

# Capítulo 2

## Metodología

## 2.1. Marco teórico:

Para buscar indicios de la existencia de una posible migración sísmica se probaron tres métodos diferentes.

- Cálculo de la densidad de actividad sísmica en determinado sitio y determinado tiempo, evaluando así como la concentración de esta cambia de posición.
- Usar la transformada de Fourier (en espacio y tiempo) para mediante un análisis en las frecuencias obtener la velocidad del desplazamiento de la actividad sísmica.
- El Metodo de Cambio en los Esfuerzos de Coulomb (MCEC), el cual al calcular los esfuerzos de Coulomb en la zona donde ocurre la actividad sísmica, se puede determinar si los eventos sísmicos están relacionados entre sí.

Debido a que los dos primeros métodos no podían determinar la existencia o no existencia de una migración sísmica usando variables físicas (puesto que eran mayormente observacionales), el método escogido es el MCEC. Ya que mediante una relación física, permite saber si el esfuerzo que recibe un sitio en específico tras la ocurrencia de un evento, aumenta o disminuye. De aumentar, la zona queda más propensa a la ruptura y si se reduce disminuye esa posibilidad. Y así, permite discriminar si es que un evento podría ser promovido (adelantado) por algún precursor cercano o no.

Lo anterior es válido para campos cercanos, debido a que, como se explicará, para que un evento pueda ser adelantado, el valor de los esfuerzos de Coulomb tiene que estar en rangos determinados, lo que ocurre sólo en la zona cercana a los evento ya ocurridos, puesto que en campos lejanos, este esfuerzo disminuye como  $\frac{1}{r^2}$ . Donde  $r$  es la distancia entre la fuente y el punto de observación.

### Definiciones de términos a utilizar en el trabajo:

- **Bloque de Techo:** Bloque superior de un sistema de falla.
- **Bloque de Piso:** Sección de la placa ubicada debajo del bloque de techo, para el caso en que la falla sea normal, inversa u oblicua (combinación entre una falla de cizalle y una normal o una inversa). Notar que en caso de fallas de cizalle perfectas, se determina cual bloque corresponde al bloque de piso y cual al de techo mediante el valor del Strike.

- **Vectores de deslizamiento y normal ( $\hat{d}$  y  $\hat{n}$ ):** Corresponden al vector unitario paralelo al deslizamiento del bloque de techo respecto al bloque de piso y al vector unitario en normal al plano de falla respectivamente.
- **Strike( $\phi_f$ ):** Ángulo medido entre el rumbo de la falla y el norte geográfico medido en sentido horario, sus valores pueden oscilar entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ . Es conocido también como Ángulo de Rumbo.
- **Dip( $\delta_p$ ):** Ángulo de inclinación medido entre el bloque de techo y el bloque de piso, su valor está entre los  $0$  y  $90^\circ$  respecto al eje perpendicular al rumbo de la falla. Este ángulo, suele simbolizarse por la letra griega  $\delta$ , sin embargo, en este trabajo será representado por  $\delta_p$  para evitar confusiones con la delta de Dirac.
- **Rake( $\lambda_d$ ):** Ángulo de deslizamiento, medido entre el eje que corre a lo largo del rumbo de la falla y el vector de deslizamiento ( $\hat{d}$ ). Aunque se le conoce como Rake, este ángulo también será denominado como Slip dependiendo de la fuente (por ser el ángulo de deslizamiento respecto al Strike), como es el caso de los catálogos obtenidos del Harvard CMT.

Sus valores pueden oscilar entre  $-180^\circ$  a  $180^\circ$  o entre  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , dependiendo de la fuente. Normalmente es caracterizado como  $\lambda$ , sin embargo, en este caso se utiliza  $\lambda_d$  para distinguirlo del primer parámetro de Lamé, simbolizados con el mismo carácter griego.

- **Coefficiente de Fricción ( $\mu_r$ ):** Coeficiente escalar adimensional que describe la razón de fricción entre dos cuerpos, sus valores van entre los 0,0 hasta los 0,8, siendo mayormente usados dos valores, los cuales, se eligen dependiendo del tamaño de la falla y el tipo de eventos, estos son  $\mu_r = 0,4$  y  $\mu_r = 0,8$ , de acuerdo con lo mostrado en Lin & Stein et.al 2004 [7] y en Nostro et.al 2005 [2].

En este trabajo, el Coeficiente de Fricción será simbolizado como  $\mu_r$ , para evitar confusiones con el modulo de corte de los parámetros de Lamé.

- **Esfuerzos de Coulomb ( $CS$ ):** Corresponde a un tipo de esfuerzos que indican que tan propenso a la ruptura se encuentra un sitio. Es obtenido mediante la relación de los esfuerzos normales ( $\sigma_n$ ), los esfuerzos de corte o cizalle ( $\tau$ ), el

coeficiente de fricción ( $\mu_r$ ) y la presión por porosidad de fluidos ( $P$ ), el cual en algunos casos no se utiliza al no considerarse de importancia.

- **Zona de Sombra de Stress de Coulomb (Zona de Sombra):** Zona en donde el valor de los esfuerzos de Coulomb son negativos, lo que significa que en dicha zona hay una reducción del esfuerzo, por lo que teóricamente no deberían de haber eventos sísmicos en esta zona. Si bien, en Lin & Stein et.al 2004 [7] se concluye que para los eventos de falla inversa, esta zona corresponde a los sitios donde  $CS \leq -1 \text{ bar}$ , en este trabajo usaremos un criterio diferente, en el que los sitios que correspondan a la Zona de Sombra serán aquellos en los que  $CS \leq -0,6 \text{ bar}$ , debido a que no todos los eventos utilizados serán de geometría inversa.
- **Zona de Stress favorable (Zona Favorable):** Corresponde a la zona donde se cumple que  $CS \geq 0,6 \text{ bar}$ , lo que en teoría significa, que en dicha zona el valor del esfuerzo de Coulomb es lo bastante alto como para poder decir que el evento ocurrido ahí pudo ser promovido por uno o varios eventos anteriores. Si bien, en Lin & Stein et.al 2004 [7] se utiliza el valor de  $CS = 1 \text{ bar}$  como límite inferior de esta zona. En este trabajo, debido a que algunos eventos no serán casos de falla inversa, se opta por utilizar un valor de  $CS$  ligeramente más bajo para este límite.
- **Zona de Stress Neutro (Zona Neutra):** Corresponde a la zona que pudiendo tener valores de  $CS$  ya sea positivos o negativos. Estos son, en valor absoluto, menores a  $0,6 \text{ bar}$ , por lo que no pueden realmente considerarse dentro de la Zona de Sombra o dentro de la Zona Favorable. A pesar de que los sismos ubicados en esta zona no son adelantados o inhibidos directamente por otro, sí puede haber una relación menos directa entre ellos. Por tanto, es útil separarlos dependiendo del valor de  $CS$  que presente el evento, definiéndose así la **Zona Neutra Positiva** y la **Zona Neutra Negativa** como las zonas en que  $0 < CS < 0,6 \text{ bar}$  y  $-0,6 < CS < 0 \text{ bar}$  respectivamente.

La importancia de conocer los eventos ubicados en esta zona es alta, especialmente cuando se calcule  $CS$  debido únicamente a la sismicidad, dado que:

- Si  $|CS| < 0,05 \text{ bar}$  se dirá que el valor de los esfuerzos de Coulomb es demasiado pequeño para decir que el evento a ocurrir es influido realmente por la sismicidad previa.

- ii Si  $0,05 < |CS| < 0,1 \text{ bar}$ , se dirá que hay un indicio debil de influencia entre un evento y otro, sirviendo sólo para señalar que puede haber otro proceso ocurriendo que haya aumentado el valor de  $CS$  y la sismicidad previa habría aumentado su valor sólo lo necesario para que pudiera romper. adelantándolo muy ligeramente. En caso de que  $CS < 0$  daría un indicio de que la sismicidad retardó muy ligeramente la ocurrencia del evento.
- iii Si  $0,1 < |CS| < 0,6 \text{ bar}$ , se dirá que el evento será promovido (o inhibido) indirectamente dependiendo del valor de  $CS$ .

Si  $CS > 0$  se tendrá que el hipocentro del evento próximo a ocurrir se encuentra en un lugar en el que la sismicidad habría aumentado los esfuerzos y por ende, deja el sitio más propenso a la ruptura, aunque también indica que probablemente haya otro proceso que haya aumentado el esfuerzo previamente, aunque la sismicidad habría sido un factor importante para que ocurriera la ruptura.

Si  $CS < 0$ , se dirá que la sismicidad habría reducido (junto con los esfuerzos) la posibilidad de una ruptura. No obstante si el esfuerzo debido a algún proceso previo es mucho más grande (por ejemplo más de  $5 \text{ bar}$ ), esto sólo corresponderá a un retardo del evento.

De haber eventos en la Zona Neutra aún considerando los esfuerzos asísmicos, puede deberse a un error debido a la aproximación de la falla y/o la idealización del modelo al no considerar cambios de material, rugosidades, o circulación de fluidos que podrían también cambiar este patrón de esfuerzos.

Lo descrito anteriormente es importante, ya que algunas de estas variables o términos, son utilizados en la obtención de los esfuerzos de Coulomb. Por lo que, es necesario entenderlas para comprender el proceso de obtención de  $CS$  y el MCEC en general.

### **Método de Cambio de los Esfuerzos de Coulomb (MCEC):**

Este método se caracteriza porque, mediante parámetros físicos, se puede analizar si es que un evento es promovido o inhibido por un evento anterior, de modo que,

si en el enjambre sísmico hay muchos eventos que sean promovidos por la sismicidad precia, se dirá que en este enjambre ocurrió una migración de la actividad sísmica.

Se postula que cuando ocurre un evento sísmico (normalmente sobre  $6.0 M_W$ ), los esfuerzos liberados podrían activar o relajar las fallas cercanas. Los lugares donde se acumula el esfuerzo y por tanto, se aumenta la posibilidad de una ruptura, dependerán de las características de la ruptura (largo, ancho y profundidad), magnitud del evento y el tipo de falla receptora (falla que recibirá estos esfuerzos).

Este tipo de esfuerzos, se han utilizado en diversos trabajos para discernir, si es que luego de algún evento de gran magnitud, los eventos que le suceden son promovidos por este, lo cual se notaría por un aumento en el valor del esfuerzo que se acumula en las áreas cercanas. En Lin & Stein et.al 2004 [7] se propone que un evento de falla inversa, puede ser promovido si es que su hipocentro se ubica en una zona cuyos esfuerzos de Coulomb (o  $CS$ ), sean mayores a  $1 \text{ bar}$  y menores a  $25 \text{ bar}$  ( $1 \leq CS \leq 25 \text{ bar}$ ). También son definidos como el límite superior de la zona de sombra de los esfuerzos de Coulomb (Zona de Sombra a partir de ahora), aquellos puntos cuyo valor de  $CS$  sea de  $-1 \text{ bar}$ . Aunque, como se mencionó en las definiciones, en el presente trabajo se asumen valores diferentes para definir los límites de la Zona de Sombra, la Zona Neutra y la Zona Favorable, debido a estos valores de  $CS$ , aplican exclusivamente para fallas inversas y dado que necesitamos agrupar los eventos (de diferentes tipos de falla), necesitamos un criterio único.

La principal interrogante será, si el evento sísmico del 16 de marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ), pudo haber promovido la actividad sísmica posterior a este y anterior al evento de Iquique (1 de abril del 2014,  $8.2 M_W$ ). De esta forma, se evaluará si existió una migración de la actividad sísmica, de ser así, deberían observarse una gran cantidad de eventos en la Zona Favorable.

Otra interrogante que se intentará aclarar es si el MCEC puede ser usado para el periodo previo a un Mega-Evento o Mega-Terremoto y no únicamente para los eventos posteriores a un Mega-Evento. Para esto, se utilizará sólo la actividad sísmica como fuente de cambio de  $CS$ . Así como también, al considerar los esfuerzos debidos a fuentes asísmicas típicas de un margen entre placas, como lo es el movimiento que ocurre durante el intersísmico ( intersísmico a partir de ahora).

La importancia de aclarar si el MCEC puede utilizarse para el periodo previo a un Mega-Evento, es dada porque el MCEC no se utiliza para estos casos. Es por esto que, se verá el comportamiento del MCEC incluyendo además el  $CS$  debido al intersísmico para un margen de subducción, cosa que normalmente se ignora (el único caso similar encontrado es el mostrado en Lin & Stein et.al 2004 [7], en el que se le agrega el  $CS$  producto del deslizamiento de la falla de San Andrés, en EEUU) y que podría explicar el porqué ocurren estos eventos previos.

### Planteamiento:

Para obtener los esfuerzos de Coulomb a partir de una dislocación en un semi-espacio. Lo que se tiene que obtener previamente el Tensor de Deformación y El Tensor de Esfuerzos, para luego separar (desde este último), los Esfuerzos Normales ( $\sigma_n$ ) y los Esfuerzos de Corte ( $\tau$ ), dado que la obtención de  $CS$  requiere separar  $\sigma_n$  y  $\tau$ .

El Tensor de Deformación, es definido por la expresión (2.1).

$$\epsilon_{i,j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.1)$$

Donde  $u_i$  es el vector de deslizamiento para los ejes  $x$   $y$  y  $z$  de la forma  $u_1 = u_x$ ,  $u_2 = u_y$  y  $u_3 = u_z$ , mientras que  $x_i$  son ejes en el plano, en los cuales  $x_1 = x$ ,  $x_2 = y$  y  $x_3 = z$  respectivamente.

Luego se utiliza la *Ecuación* (2.1) para obtener el Tensor de Esfuerzos, definido por (2.2)

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} + 2\mu \epsilon_{ij} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.2)$$

Donde  $\lambda$  y  $\mu$  son los parámetros de Lamé.

Para este caso se considerará que el medio es un sólido de Poisson, es decir que se asume  $\lambda = \mu$ . Cuyo valor típico para la litosfera es mostrado en el libro Turcotte & Schubert: Geodynamics [3] como.

$$\lambda = 30 \text{ GPa}$$

Donde  $1GPa = 10^9 Pa$ .

El término  $\delta_{ij}$  en (2.2) corresponde a la *Delta de Dirac*, la cual funciona de la siguiente forma.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases}$$

Habiendo obtenido el Tensor de Esfuerzos, separamos los Esfuerzos Normales de los Esfuerzos de Corte. Esto se hace mediante las expresiones (2.3) y (2.4), obtenidas del trabajo de Wang et.al 2014 [4].

$$\begin{aligned} \sigma_n = & \sin^2 \phi_f \sin^2 \delta_p \sigma_{11} - \sin(2\phi_f) \sin^2 \delta_p \sigma_{12} - \sin \phi_f \sin(2\delta_p) \sigma_{13} \\ & + \cos^2 \phi_f \sin^2 \delta_p \sigma_{22} + \cos \phi_f \sin(2\delta_p) \sigma_{23} + \cos^2 \delta_p \sigma_{33} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \tau = & \left\{ -\frac{1}{2} \sin^2 \phi_f \sin(2\delta_p) \sigma_{11} + \frac{1}{2} \sin(2\phi_f) \sin(2\delta_p) \sigma_{12} + \sin \phi_f \cos(2\delta_p) \sigma_{13} \right. \\ & - \frac{1}{2} \cos^2 \phi_f \sin(2\delta_p) \sigma_{22} - \cos \phi_f \cos(2\delta_p) \sigma_{23} + \left. \frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \sigma_{33} \right\} \sin \lambda_d \\ & + \left\{ -\frac{1}{2} \sin(2\phi_f) \sin \delta_p \sigma_{11} + \cos(2\phi_f) \sin \delta_p \sigma_{12} + \cos \phi_f \cos \delta_p \sigma_{13} \right. \\ & + \left. \frac{1}{2} \sin(2\phi_f) \sin \delta_p \sigma_{22} + \sin \phi_f \cos \delta_p \sigma_{23} \right\} \cos \lambda_d \end{aligned} \quad (2.4)$$

Donde  $\sigma_n$  y  $\tau$  son los esfuerzos normales y de cizalle para la falla respectivamente. Los ángulos de strike ( $\phi_f$ ), dip ( $\delta_p$ ) y rake ( $\lambda_d$ ) mostrados corresponden a la falla receptora del esfuerzo. Mientras que  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{12}$ ,  $\sigma_{13}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{23}$  y  $\sigma_{33}$  son las componentes del Tensor de Esfuerzos.

La demostración de las ecuaciones ((2.3)) y ((2.4)), es decir  $\sigma_n$  y  $\tau$  respectivamente se encuentra en el *Anexo: Demostración de ( $\sigma_n$  y  $\tau$ )*.

Para el cálculo de  $CS$  se requerirá definir la Presión por porosidad ( $P$ ), la cual es descrita por.

$$P = -\frac{B}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})$$

Donde  $B$  es el Coeficiente de Skempton, cuyo valor en Wang et.al 2014 [4]

se asume que oscila entre 0,3 y 0,6, aunque en este trabajo, lo aproximamos por 0,47. Teniendo esto, la expresión para los cambios en los esfuerzos de Coulomb es la siguiente.

$$CS = \tau + \mu_r (\sigma_n + P) \quad (2.5)$$

Dado que los esfuerzos de Coulomb son calculados respecto a la falla receptora (asociada al siguiente evento), no pueden sumarse de haber muchos eventos con geometrías diversas (se obtiene  $CS_e$  para un determinado tipo de falla receptora y no será el mismo valor si la falla receptora es inversa o normal aunque se use el mismo tensor de esfuerzos), es por esto que para obtener un valor acumulado de  $CS$ , se suman los  $\sigma_{ij}$  de la forma.

$$\sigma_{ij}^{eventos} = \sum_{eventos} \sigma_{ij}$$

Con lo que se utilizan las expresiones (2.3) y (2.4) reemplazando  $\sigma_{ij}$  por  $\sigma_{ij}^{eventos}$ , donde se obtienen  $\sigma_n^{eventos}$  y  $\tau^{eventos}$  respectivamente.

Posteriormente obtenemos la expresión para el cambio de los esfuerzos de Coulomb acumulado sobre los eventos ( $CS_e$ ).

$$CS_e = \tau^{eventos} + \mu_r (\sigma_n^{eventos} + P) \quad (2.6)$$

Expresión que nos permite analizar, cómo afecta cada evento al aumento o reducción de los esfuerzos de Coulomb para un sitio en el mapa, sitio que en este caso ocuparán los hipocentros de los eventos posteriores al calcularse sucesivamente conforme estos ocurren. Utilizando la expresión (2.6), se puede saber si es que hubo un aumento en el esfuerzo que pudiera promover algún evento posterior, el que, no necesariamente será el siguiente evento en el catálogo. Lo cual describe la importancia de la obtención de  $CS_e$ .

Si  $CS_e > 0$ , significa que los esfuerzos en esa área sufrirían un incremento. Lo que en teoría promueve la activación de ese sector.

Si  $CS_e < 0$ , entonces corresponde a una reducción del esfuerzo acumulado por lo que teóricamente inhibiría la activación de alguna falla circundante u otro sector de

la misma en caso de ser una falla de gran tamaño.

Si muchos eventos que tienen lugar en zonas cercanas entre sí muestran una tendencia a desplazarse hacia un lugar determinado y además ocurren en zonas donde  $CS_e > 0,6 \text{ bar}$ , entonces podemos hablar de migración sísmica.

Independientemente del tipo de actividad que tenga lugar, cada evento provocará una disminución de esfuerzos en ciertos sectores y los incrementará en otros. No obstante, la distribución de los sitios en que se liberará o acumulará esfuerzos, dependerá de la geometría de la falla involucrada, del tamaño del evento, de donde se ubique (debido a que se usarán los valores de  $\mu_r$  descritos por Lin & Stein et.al 2004 [7], en el cual  $\mu_r = 0,4$  si el evento es de subducción) y la geometría de la falla receptora.

## 2.2. Aplicación Practica:

Para obtener  $CS_e$  son necesarias las ecuaciones descritas en Okada Y., et.al 1992 [9], para una fuente rectangular en un semi-espacio a partir de las que se obtienen el tensor de esfuerzos.

Debido a la gran cantidad de restricciones que presenta el modelo de Okada Y., et.al 1992 [9] se adaptan algunos parámetros. De no hacerlo, estas son utilizables sólo para un evento originado en los puntos iniciales de los ejes  $x$  e  $y$  de la grilla, donde se asume que  $x$  es paralelo al strike del evento.

Para utilizar coordenadas donde el hipocentro no se encuentre en el sitio de inicio de la grilla (es decir en  $x = 0$ ,  $y = 0$  y  $z = c$ ), se hace la sustitución  $xh = x - x_0$  y  $yh = y - y_0$  donde  $x_0$  e  $y_0$  son las coordenadas del hipocentro del evento en latitud y longitud respectivamente.

Debido a que, en el modelo, el eje  $x$  es paralelo al strike (siendo los resultados obtenidos sin hacer una modificación equivalentes al caso de que  $\phi_f = 0$  para todos los eventos), por lo que para poder usar diferentes valores de  $\phi_f$ , se utilizan como entrada los ejes  $x_s$  e  $y_s$ , los que son una modificación de los ejes  $xh$  e  $yh$ . En los que se cumple con la condición de que  $x_s$  sea paralelo al strike de cada evento. Dichos

ejes son descritos en las siguientes expresiones.

$$x_s = xh \cos(-\phi_f) + yh \sin(-\phi_f)$$

$$y_s = -xh \sin(-\phi_f) + yh \cos(-\phi_f)$$

En este caso, se tiene que utilizar  $-\phi_f$ , dado que el eje  $y$  se introduce como positivo hacia el Oeste. Luego por la impariedad y pariedad de las funciones  $\sin$  y  $\cos$  respectivamente, la expresión resultante es de la forma.

$$\begin{aligned} x_s &= xh \cos(\phi_f) - yh \sin(\phi_f) \\ y_s &= xh \sin(\phi_f) + yh \cos(\phi_f) \end{aligned} \tag{2.7}$$

Las ecuaciones de Okada Y., et.al 1992 [9] en su forma pura, obtienen la deformación para los puntos ubicados en  $x$ ,  $x - L$ ,  $p$  y  $p - W$  con  $p = y \cos(\delta_p) + (c - z) \sin(\delta_p)$ . Lo cual, resulta en la resolución del problema para el caso que los ejes  $x$  e  $y$  sean los puntos de origen de la deformación. Por lo que, la modificación a realizar en este caso, sería el hacer que el programa resuelva las ecuaciones para la combinación de puntos  $x_s + \frac{L}{2}$ ,  $x_s - \frac{L}{2}$ ,  $p_s - \frac{W}{2}$  y  $p_s + \frac{W}{2}$  con  $p_s = y_s \cos(\delta_p) + (c - z) \sin(\delta_p)$ . En los que se ve que el hipocentro es ahora el centro de la deformación

Para resolver las ecuaciones de Okada Y., et.al 1992 [9] se utiliza un programa hecho por Catalán N., et.al [8] en *python 2.7* usando las modificaciones antes descritas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se prueba el método en un sistema de datos sintéticos. Es decir, un sistema en el que sabemos de antemano lo que ocurra en este.

## Modelo Sintético para los Esfuerzos de Coulomb:

Primero se genera una base de datos sintética, en donde se define una grilla y además un evento de cualquier tipo. Obteniéndose así, una falla con largo, ancho, profundidad, desplazamientos y magnitud conocidas. Para corroborar el éxito de la prueba, se replica el evento de la página 3 del trabajo Lin & Stein et.al 2004 [7], donde muestran un experimento para una falla inversa optima con un  $\delta_p = 45$ . Los resultados, tanto del experimento de Lin & Stein et.al 2004 [7] como los nuestros,

se muestran en las figuras (2.1) y (2.2).

A pesar de que la prueba del método es muy útil para observar un evento, ya sea en los ejes Latitud-Longitud o Longitud-Profundidad. Necesitamos poder observar también  $CS_e$ , a lo largo de un eje paralelo al plano de falla.

Los ejes en este experimento se mueven de la siguiente manera.

- $-30 \leq x \leq 0$
- $-60 \leq y \leq 0$
- $0 \leq z \leq 30$

Para visualizar el lugar por donde pasa la falla se usa una recta que pase por el hipocentro del evento y que tenga un ángulo de pendiente igual a  $-\delta_p$  (en este caso  $-45^\circ$  o  $-\frac{\pi}{4}$ , debe ser negativo debido a que en el caso sintético la profundidad de la falla disminuye con la distancia en el eje  $y$ ). Esta proyección debe tener un punto inicial en la superficie, que permita seguir la proyección de la falla. Esto se logra usando la ecuación de la recta de la siguiente forma.

$$z = m(y - y_0) + z_0 \quad (2.8)$$

Donde.

$$m = \frac{z_{final} - z_0}{y_{final} - y_0} \quad (2.9)$$

Si se considera que en el bloque de techo la distancia longitudinal y la profundidad serían los catetos de un triángulo rectángulo, el plano de falla podría considerarse la hipotenusa del mismo. Para este caso se tiene que.

$$\tan(-\delta_p) = \frac{cat_{op}}{cat_{ady}} = \frac{z_{final} - z_0}{y_{final} - y_0} \quad (2.10)$$

Al reemplazar la Ecuación ((2.10)) en la Ecuación(2.9) se obtiene la expresión.

$$m = \tan(-\delta_p) \quad (2.11)$$

La cual al ser reemplazada en la Ecuación ((2.8)) nos deja la expresión de la recta que representa al plano de falla.

$$z = [\tan(-\delta_p)(y - y_0)] + z_0 \quad (2.12)$$

Para la proyección, suponemos una falla de idénticas características a la falla real, con la diferencia de que la proyección supondría que la falla inicia en la superficie, razón por la que se considerará  $z_0 = 0$ . No obstante, la prueba también necesita que el hipocentro se pueda mover en longitud, por lo que se hace  $y_0 \neq 0$ , donde  $y_0$  es el punto en la superficie en donde comenzaría nuestra falla proyectada. En caso que la falla real no comience en superficie (como es el caso), este valor corresponderá a la proyección hacia la superficie de esta falla. Para deducir  $y_0$  usaremos el teorema de Pitágoras. Teniendo conocidos, el ángulo de inclinación (dip), la distancia longitudinal entre el origen y el hipocentro ( $y_{hip} = -30$ ), el valor del ángulo del dip ( $\delta_p = \frac{\pi}{4}$ ) y la profundidad hipocentral ( $z_{hip} = 10$ ) como sigue.

$$\tan\left(-\frac{\pi}{4}\right) = -\frac{z_{hip} - z_0}{y_{hip} - y_0} = \frac{-z_{hip}}{y_{hip} - y_0}$$

$$1 = -\frac{10}{y_{hip} - y_0}$$

$$y_{hip} - y_0 = -10 \quad (2.13)$$

Ahora al reemplazar  $y_{hip}$  en la Ecuación(2.13) resulta.

$$-30 - y_0 = -10$$

$$y_0 = -30 + 10 = -20$$

Obteniéndose así, el último parámetro que se necesitaba para poder utilizar la Ecuación (2.12). Pudiéndose ahora observar los resultados en el plano de la latitud y el plano de falla.

Sin embargo, es necesario que se puedan visualizar resultados con diferentes pendientes para no limitar la visualización a la falla proyectada. Para esto, hacemos que para  $y < y_0$   $z = 0$ , de modo que, para ese caso ,se pueda observar los resultados en planta.

La figura(2.1) muestra la recta en cuestión y como esta cruza el hipocentro del evento.

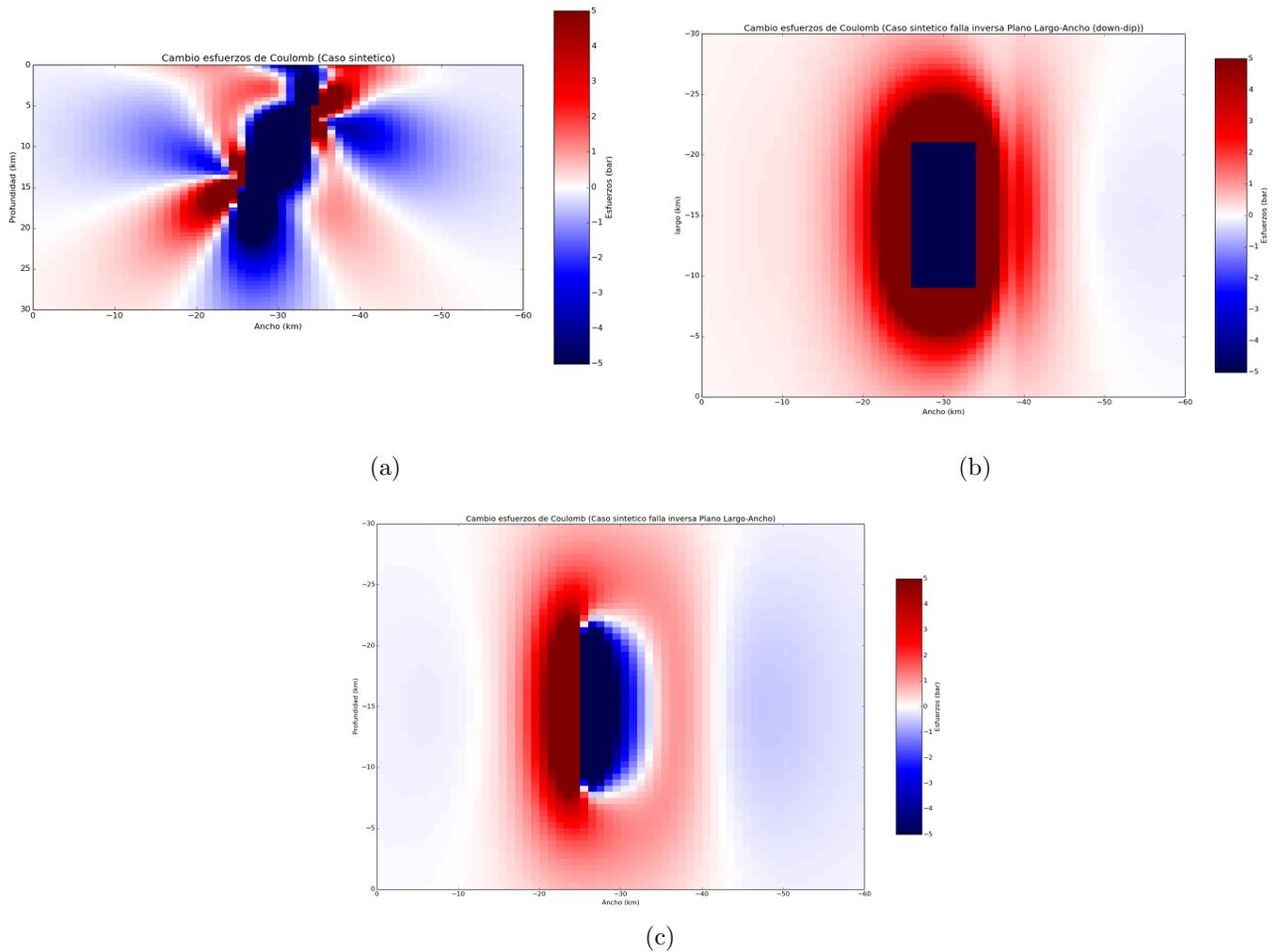


Figura 2.1: (a) Cambios en los esfuerzos de Coulomb para el caso sintético en el plano Longitud-Profundidad (mismo plano que el usado por Lin & Stein et.al 2004 [7]), la línea azul es la recta del plano de falla, (b) Cambio en los Esfuerzos de Coulomb para el caso sintético en el plano Latitud-Plano de falla, (c) Cambios en los Esfuerzos de Coulomb para el caso sintético en el plano Latitud-Longitud (a la profundidad del evento)

Como último paso, se hace que el programa sólo tome en cuenta los esfuerzos de

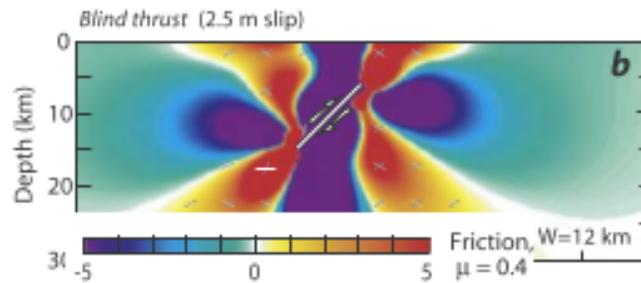


Figura 2.2: Resultado del evento sintético del trabajo de Lin & Stein et.al 2004 [7]

Coulomb ubicados a una longitud y profundidad iguales a las señaladas por la recta obteniéndose lo mostrado en la figura(2.1b). Cuya validez puede ser corroborada al observar la figura (2.1a) en los puntos que se ubican en torno a la recta.

Se ve, que los resultados mostrados en la figura(2.1a) coinciden con lo obtenido por Lin & Stein et.al 2004 [7] (mostrado en la figura (2.2)).

## Obtención de Ancho y Deslizamiento Para Cada Evento en el Catálogo:

Debido a que, la mayoría de los catálogos sísmicos, sólo presentan información de la ubicación y los parámetros de falla, (Latitud, Longitud, Profundidad, Strike, Dip, Rake, Magnitud), se debe encontrar una forma de aproximar el Largo, Ancho y el deslizamiento debidos al evento. Puesto que estos parámetros son necesarios para la ejecución del programa.

Wells & Coppersmith et.al 1994 [1] determinó una forma empírica para obtener una aproximación del largo y el ancho asociado a un sismo, a partir de su magnitud y algunos parámetros como el rake.

Mediante una regresión ordinaria de mínimos cuadrados, obtienen dos parámetros (denotados por  $a$  y  $b$ ), los que se usan en una relación logarítmica, por la que se obtiene un Largo y un Ancho teórico para cada tipo de falla involucrado. Estos coeficientes son obtenidos para el caso de una falla normal, una falla inversa, una falla transformante o una aproximación general para cualquier falla.

Las expresiones para el Largo ( $L$ ) y el Ancho ( $W$ ) que ellos obtuvieron son

mostradas en la Ecuación (2.14) y la Ecuación (2.15) respectivamente

$$L = 10^{(a_l + b_l \times M_w)} \quad (2.14)$$

$$W = 10^{(a_w + b_w \times M_w)} \quad (2.15)$$

$a_l$ ,  $b_l$ ,  $b_r$ ,  $a_w$  y  $b_w$  son los coeficientes obtenidos tras la regresión lineal, para el Largo ( $a_l$  y  $b_l$ ) y el ancho ( $a_w$  y  $b_w$ ). Los valores de estos coeficientes variarán con el tipo de falla e incluso la magnitud. Ya que, para algunos tipos de falla (como las inversas), los coeficientes son utilizables únicamente para eventos inferiores a  $7,6 M_W$ .

Lo anterior, nos permite aproximar un largo y ancho para la falla, pero no se obtiene el deslizamiento. Debido a eso y dado que conocemos la magnitud de los eventos, podemos aproximarlos usando la *Ecuación para la Obtención del Momento Escalar Sísmico* ( $M_0$ ), la cual es descrita por.

$$M_0 = \mu D A \quad (2.16)$$

Donde  $\mu$  es el modulo de rigidez o de corte,  $D$  es el deslizamiento (no confundir con el vector deslizamiento  $\hat{d}$ ) y  $A$  es el área de la superficie de la falla dada por.

$$A = L W$$

Para obtener el deslizamiento simplemente debemos despejar  $D$ , obteniéndose la expresión (2.17).

$$D = \frac{M_0}{\mu A} \quad (2.17)$$

Con lo que tenemos todos los parámetros necesarios para obtener los esfuerzos de Coulomb en un caso real.

## 2.3. Base de Datos:

Para poder analizar la sismicidad en la zona, se utiliza un catálogo procedente del Centro Sismológico Nacional (CSN a partir de ahora). El cual presenta la localización corregida de los eventos, la fecha y hora en la que ocurrieron y su magnitud (desde los 1.5  $M_W$ ). Esto para un rango de longitudes que va desde los  $-68^\circ$  hasta los  $-71$  y un rango de latitudes que va desde los  $-18^\circ$  hasta los  $-22^\circ$  y hasta los 350  $km$  de profundidad, comenzando en el año 2002 hasta mediados del 2015.

La importancia de este catálogo, radica en que la cantidad de eventos que tiene para el rango de latitud que va entre los paralelos  $-19^\circ$  y  $-20^\circ$  (intervalo aproximado de nuestra área de estudio) es bastante grande, y nos permite ubicar las interfases que encontró W. Bloch et.al 2014 [6] para los eventos en el intervalo de latitudes  $-20^\circ$  a  $-22^\circ$ , las que son necesarias para poder hacer las parametrizaciones, dado que la fosa se encuentra más hacia el Oeste en nuestro intervalo no podemos usar las mismas especificaciones.

Además del catálogo del CSN, obtenemos dos catálogos de mecanismos focales desde el Harvard Global CMT (Harvard CMT a partir de ahora) y un catálogo obtenido del Geo Forschungs Zentrum (GFZ).

### Mecanismos Focales:

Los mecanismos focales son una representación del tipo de parámetros de un sismo, tiene forma de una pelota de playa, con 2 cuadrantes blancos (que representan las zonas de extensión) y 2 coloreados (que representan las zonas de compresión), separadas por los ejes nodales, los que son dos grandes arcos ubicados a  $90^\circ$  uno del otro y que separan los planos compresivos de los extensivos.

Dependiendo de la orientación que tenga este diagrama podremos saber los ángulos de strike, dip y rake de un evento y por lo general, se representan con un tamaño proporcional a la magnitud del evento. En la figura(2.3) se ven los diferentes tipos de mecanismos focales y su significado en cuanto al tipo de evento asociado a este.

En este trabajo, se usarán catálogos de mecanismos focales debido a que, por lo general, presentan los parámetros de falla correspondientes a cada evento. De manera de poder no solo visualizar las características de la sismicidad, sino que también

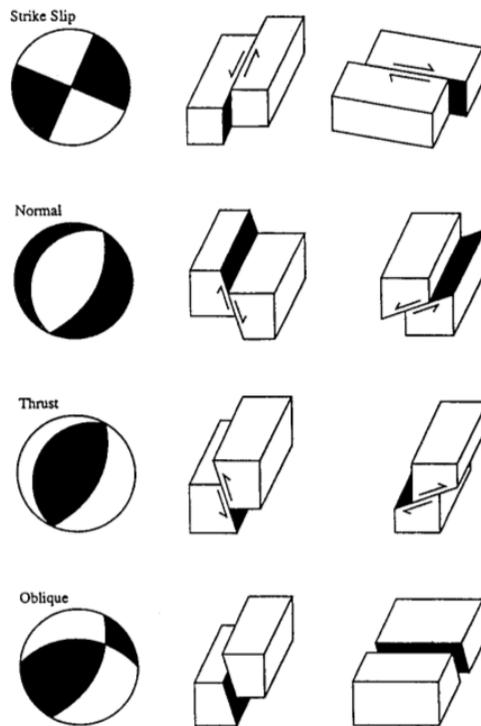


Figura 2.3: Representación de los mecanismos focales dependiendo del movimiento de la falla.

poder obtener  $CS_e$  a partir de estos.

El catálogo del Harvard CMT contiene mecanismos de varios sismos, ocurridos entre el 13 de Junio del 2005 y el evento del 01 de Abril del 2014. Los que son graficados utilizando el complemento Python Obspy, que permite su visualización en un mapa.

Este catálogo será también utilizado para obtener los esfuerzos de Coulomb, si bien la magnitud mínima que registra es de  $4.8 M_W$ , esta es lo bastante grande para hacer el seguimiento a la sismicidad.

El catálogo Harvard CMT presenta eventos en un rango temporal bastante grande. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que no registra (para el caso chileno) ningún evento cuya magnitud sea inferior a los  $4.8 M_W$  (Aunque debido a la resolución utilizada, este aspecto no es importante). Una segunda limitante de este catálogo es que no registra un evento si es que este ocurre en una zona cercana a otro mayor con 20 minutos de diferencia. Aunque, esto último, sólo se nota en las semanas previas al evento principal.

Este catálogo, a pesar de sus limitantes, tiene el mayor tiempo de registros para la zona. Lo que lo hace de gran utilidad al registrar eventos como el sismo del 13 de Noviembre del 2009 ( $6.5 M_W$ ), que fue localizado en un área muy cercana al evento principal. Además, tiene mayor cobertura de eventos, desde el 13 de Junio del 2005 hasta el 15 de Marzo del 2014.

Desde el 2011 en adelante, tenemos la posibilidad de usar un catálogo obtenido del GFZ. Este catálogo, a diferencia del obtenido por el Harvard CMT, presenta un rango temporal de registros más limitado, que comienza el 14 de Febrero de ese año. Sin embargo, registra eventos desde  $4.2 M_W$  y, en el caso de haber dos eventos cercanos, ocurridos con poca diferencia temporal, registra ambos eventos con su respectivo mecanismo focal.

No obstante, el catálogo del GFZ, tiene una escasa cobertura de eventos en comparación al catálogo de CMT, para el tiempo previo al evento del 15 de Marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ). Por lo que, en el periodo transcurrido entre el 14 de Febrero del 2011 y el 15 de Marzo del 2014, su utilidad se ve reducida.

Por lo que, consecuencia, se utiliza únicamente el catálogo del CMT, desde el 13 de Junio del 2005 hasta el 23 de Enero del 2011. Mientras que desde el 14 de Febrero del 2011 hasta el 15 de Marzo del 2014, se utiliza una combinación de ambos catálogos, en la que se utilizan los datos del catálogo del GFZ, en todos los eventos no incluidos en el catálogo del CMT. Finalmente, a partir del 15 de Marzo y hasta el 1 de Abril del 2014, se utilizará únicamente el catálogo del GFZ, dado que a partir de esa fecha, este tiene una mejor cobertura de los eventos.

## 2.4. Zona De Estudio:

La zona de estudio utilizada será la sección norte de Chile desde los paralelos  $19^{\circ}$ s a los  $21^{\circ}$ s, tomando también entre los meridianos  $-72^{\circ}$ O y  $-69.9^{\circ}$ . La figura(2.4) nos muestra la zona en cuestión pudiéndose distinguir claramente la fosa y la línea de costa.

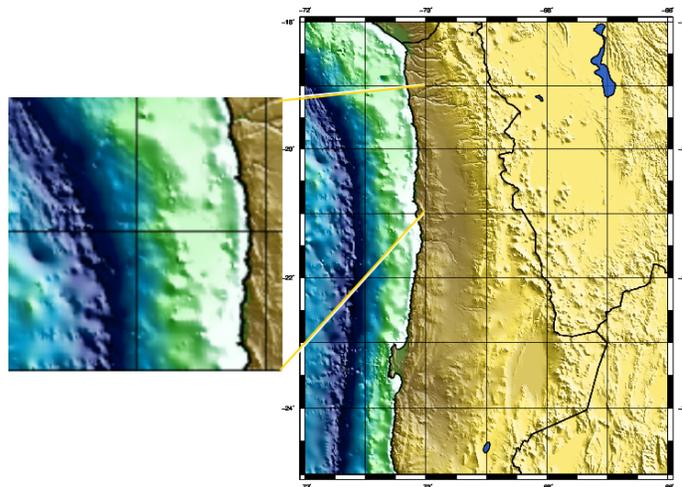


Figura 2.4: Mapa de la Zona de Estudio

## 2.5. Organización de datos:

Debe comprobarse si hubo una migración sísmica previa al evento del 1 de Abril del 2014 ( $8.2 M_W$ ) y calcular cuanto cambian estos esfuerzos debido al deslizamiento intersísmico y al “Terremoto Lento”, reportado en S.Ruiz et.al 2014 [11]. Para esto hacemos uso del MCEC, con lo que se comprobará si hubo una migración de esfuerzos, lo que se hará considerando los siguientes casos.

- i Al considerar únicamente el  $CS_e$  debidos a los eventos sísmicos.
- ii Al considerar los esfuerzos debidos a los eventos y los debidos al deslizamiento intersísmico, en el cálculo de  $CS_e$ .
- iii Al considerar los esfuerzos debidos a los eventos, al intersísmico y al “Terremoto Lento”.

De haber una migración de esfuerzos, diremos que hubo una migración sísmica si los hipocentros de los eventos sísmicos posteriores coinciden con los sitios donde el esfuerzo aumenta.

En este trabajo se utilizaremos un modelo en el que se supondrá que la subducción es dominada por gobernada por un *Slab-Pull*, en el cual se plantea que la subducción ocurre debido a la gravedad, por lo que la interacción no se limitaría simplemente al límite entre las placas involucradas (Sudamericana y de Nazca en este caso), sino que habría otro borde paralelo al límite de las placas, aunque sería de carácter normal en lugar de una subducción. Este nuevo borde corresponde al límite de la respuesta elástica de la corteza, bajo la cual habría una capa dúctil.

Un hecho que motiva el uso del modelo *Slab-Pull*, es que en W. Bloch et.al 2014 [6], se mostró que en la zona habría una zona de doble sismicidad, las que estarían separadas por una sección libre de actividad sísmica, con aproximadamente 20 kilómetros de espesor. Este valor, de acuerdo con los resultados obtenidos en Brudzinski et.al 2007 [13], corresponde a la separación local entre las interfases. El cual tiende a variar en proporción con la edad de la placa subductada.

Para calcular el  $CS_e$  debido a los eventos sísmicos se utilizan como fallas receptoras las geometrías de los eventos posteriores al sismo utilizado para calcular  $CS_e$ .

La principal razón para calcular la influencia del intersísmico sobre  $CS_e$ , es que durante el intersísmico, la sección más cercana a la fosa de la placa Sudamericana se encuentra trabada, es decir, la sección de la Placa Sudamericana cercana a la fosa se mueve en la misma dirección pero a menor velocidad que sección de la placa de Nazca inmediatamente inferior.

Sin embargo, en este trabajo se considerará que la sección de la Placa Sudamericana cercana a la fosa no se moverá respecto a la Placa de Nazca.

Para obtener el  $CS_e$  debido al intersísmico, se simula un evento sísmico anual que ocurra en las interfases superior y la inferior simultáneamente, usando la geometría de la subducción en dicha zona y como deslizamiento el valor de  $6,7 \text{ cm}$  (dado que la velocidad de convergencia entre las placas Sudamericana y de Nazca es de  $6,7 \frac{\text{cm}}{\text{año}}$ ). Sin embargo, como se muestra en la figura (2.5), ángulos como el del manto ( $\delta_p$ ) no son constantes (tampoco lo son el Strike ni el Rake), hecho que dificulta la obtención de  $CS_e$ , debido a que habría que introducir muchas variantes de estos ángulos.

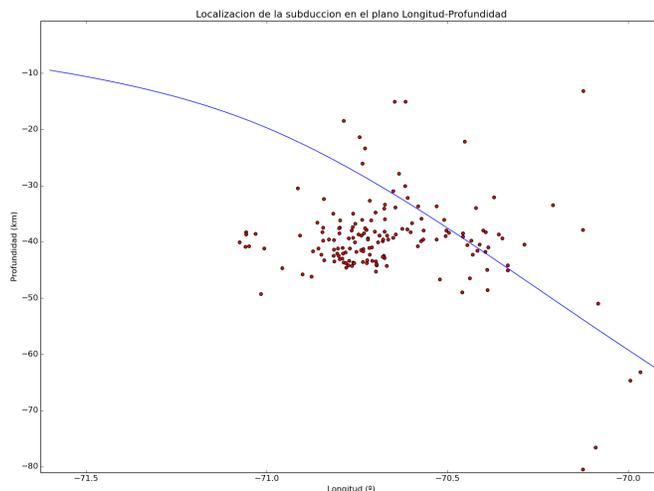


Figura 2.5: Profundidad del Límite de Placas con sismicidad en los planos Longitud-Profundidad obtenida gracias al catálogo de sismicidad del CSN y al *Slab 1.0*, para las rango de latitudes  $-19.4^\circ$  al  $-19.6^\circ$

Es por esto que se aproximará la subducción, dándoles a  $\delta_p$ ,  $\lambda_d$  y  $\phi_f$  valores fijos para cada sección utilizada de las interfases, los que son mostrados en el Cuadro(2.1).

Interfase Correspondiente	Strike	Dip	Rake
Superior	350	22	100
Inferior Primera	350	8	290
Inferior Segunda	350	22	290

Cuadro 2.1: Geometrías de falla aproximadas para cada interfase.

Las geometrías de las fallas aproximada serán basadas en el plano de falla del evento principal, para el caso de los ángulos  $\phi_f$  y  $\lambda_d$ . Mientras que el valor de  $\delta_p$  es

el que según W. Bloch et.al 2014 [6] tendría la subducción entre los  $71^{\circ}$  y los  $69.5^{\circ}$ .

Para aproximar las fallas primero se debe el límite de la zona trabada (Zona de Alto Acoplamiento) lo cual se hace en base a que descrito en W. Bloch et.al 2014 [6], donde identificaron que el punto donde más oriental de la zona trabada estaba aproximadamente a los  $-70.2^{\circ}$  de longitud. Sin embargo, dado que en la zona de estudio (ubicada ligeramente más al norte que la zona observada por W. Bloch et.al 2014 [6]), la fosa está más hacia el Oeste, por lo que asumimos que el punto más oriental de la zona trabada en estas latitudes es a los  $-70.4^{\circ}$  de longitud.

Los límites Norte y sur de la Zona de Alto Acoplamiento se obtienen del trabajo de S.Ruiz et.al 2014 [11], donde limitaron el segmento a la zona comprendida aproximadamente entre los  $-19^{\circ}$  y  $-20^{\circ}$  de latitud, como se muestra en la figura(2.6)

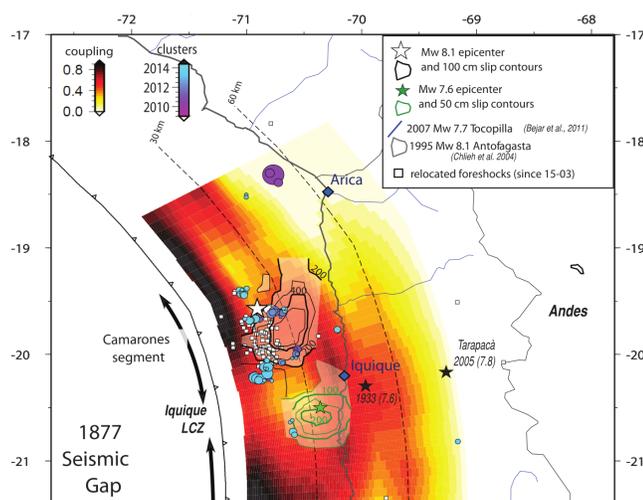


Figura 2.6: Mapa del acoplamiento por S.Ruiz et.al 2014 [11] para la Zona de Interés

La figura(2.7) muestra la sismicidad en la zona comprendida entre los paralelos 19 y 20, donde podemos ver la aproximación utilizada para Interfases Superior e Inferior.

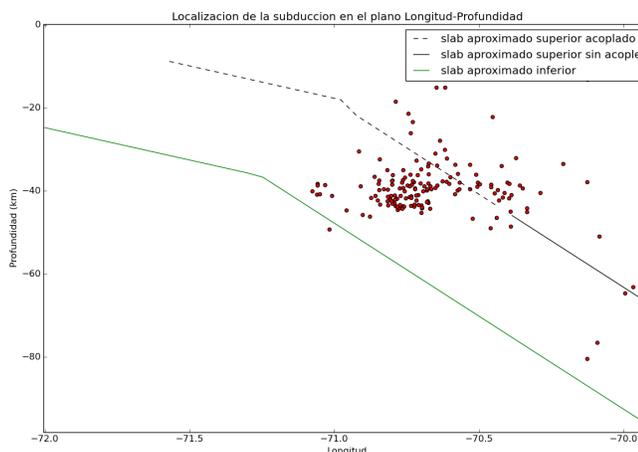


Figura 2.7: Sismicidad en los planos Longitud-Profundidad obtenida gracias al catálogo de sismicidad del CSN Para las rango de latitudes  $-19.3^{\circ}$  al  $19.7^{\circ}$

Adicionalmente en S.Ruiz et.al 2014 [11] se reportó, que desde la ocurrencia de un evento el 16 de Marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ), comenzaron a registrarse movimientos asísmicos en las estaciones de GPS (Global Position System) cercanas a la costa, en un evento conocido como “Terremoto lento” (también llamado Evento Lento). El hecho de que ocurriera este deslizamiento, que incumbe sólo a Interfase Superior y cuya magnitud equivalente fuera de aproximadamente  $7.2 M_W$ , fue la razón para analizar también la influencia de este “Terremoto lento” en el  $CS_e$  de las zonas aledañas.

A este evento lento le damos un plano de falla aproximado mostrado en el Cuadro 2.3.

Interfase Correspondiente	Strike	Dip	Rake
Superior	350	20	100

Cuadro 2.2: Geometría aproximada de la falla para el Evento Lento registrado entre el 16 de Marzo y el 30 de Marzo del 2014.

Nótese que la geometría de falla asociada al Evento Lento, mostrada en el Cuadro (2.3), es muy similar al de la interfase superior del Cuadro (2.1), teniendo los mismos  $\phi_f$  y  $\lambda_d$ , siendo diferenciado únicamente en el valor de  $\delta_p$ . Esto se hace debido a que este movimiento ocurre más cercano a la fosa, donde como vimos en la figura (2.5), el ángulo de manteo es menor, por lo que se usan los mismos ángulos  $\phi_f$ ,  $\delta_p$  y  $\lambda_d$  del evento principal del 01 de Abril del 2014 ( $8.2 M_W$ ).

## 2.6. División de los Esfuerzos de Coulomb en diferentes ventanas de eventos:

Para dividir el catálogo, primero se seleccionan los eventos cuyo hipocentro se encuentra entre los  $-19^{\circ}$  y los  $-21^{\circ}$  de latitud y entre los  $-72^{\circ}$  y los  $-69.9^{\circ}$  de longitud. Luego, los eventos dentro de este rango espacial se agrupan en 6 ventanas de 10 eventos cada una (con excepción de las ventanas 3 y 6 las que tienen 8 y 6 eventos respectivamente). Los que, suman un total de 54 eventos previos al evento principal y ocurren entre el 27 de Julio del 2005 y el 1 de Abril del 2014.

Nº de Ventana	Fecha inicio	Fecha finalización	Nº de eventos por ventana
1	27-05-05	01-03-08	10
2	17-04-08	18-07-12	10
3	23-07-13	15-03-14	8
4	16-03-14	22-03-14	10
5	22-03-14	24-03-14	10
6	24-03-14	01-04-14	6

Cuadro 2.3: Intervalos de tiempo existentes entre las diferentes ventanas.

El  $CS$  en estas ventanas de eventos, se obtiene de manera acumulativa (es decir, se utiliza como valor de entrada el  $CS$  de la ventana previa, siendo cero sólo para el primer evento de la primera ventana), obteniendo el valor de  $CS_e$  en cada punto de la grilla. De esta forma, se visualizan diferentes etapas de un mismo proceso.

A modo de análisis previo, se visualiza el  $CS_e$  en un mapa, para los planos Longitud-Profundidad, Latitud-Interface Superior y Latitud-Interfase Inferior. De manera de poder observar las zonas donde aumenta el stress de Coulomb y las zonas donde este disminuye, razón por la cual se utilizan muchas ventanas, dado que, al ocurrir los eventos, estos cambian el valor de  $CS_e$  a su alrededor, por lo que para saber si es que los eventos posteriores ocurren ya sea en la Zona Favorable o en un punto la Zona Neutra cercano a la Zona Favorable. Este análisis es particularmente útil cuando se obtiene el valor de  $CS_e$  debido únicamente a la sismicidad.

Para cada ventana se grafica el hipocentro de los eventos futuros, con el objetivo de precisar si los eventos ocurrieron donde  $CS_e$  era previamente positivo. Razón por

la que se analizan los esfuerzos de forma acumulativa. Considerando así la influencia de la ventana anterior en  $CS_e$ .

Además de los Esfuerzos de Coulomb y los hipocentros de los eventos posteriores, se grafica cuantos de estos están en zona positiva o negativa, ordenados respecto a su posición en el catálogo. También se grafica la concentración de eventos positivos y negativos. En ambos casos, para los eventos inmediatamente posteriores en cada ventana de tiempo.

Es importante conocer el hipocentro, tiempo en de ocurrencia (fecha y hora) y el valor de  $CS_e$  en el hipocentro del evento. Ya que teóricamente, los eventos deberían ocurrir en puntos donde previamente  $CS_e$  sea positivo, mientras que, las zonas donde  $CS_e < 0$ , deberían estar libres de eventos.

Dado que se quiere obtener, no sólo el  $CS_e$  para los eventos sísmicos, sino que además, ver la influencia del  $CS_e$ , debido a los distintos movimientos asísmicos, se analizarán los tres casos diferentes de manera independiente en cada ventana (donde esto sea posible), para posteriormente hacer una sección de resumen para un análisis general. Los distintos casos se detallan a continuación.

- **Cálculo del  $CS_e$  debido únicamente a eventos sísmicos:** En este caso se calcula  $CS_e$  sin considerar los esfuerzos debidos al Intersísmico ni el Evento Lento, por lo que se obtendrá para todas las ventanas.
- **Cálculo del  $CS_e$  debido a eventos sísmicos considerando el Intersísmico:** En este caso se utilizan las dos fallas cuyos geometrías están dados en el Cuadro (2.1). Se simulará un evento por cada año que transcurra en el catálogo, donde los deslizamientos serán de 6.7 cm para cada una, por un periodo de 109 años hasta el 2014 (100 al inicio de la primera ventana, por lo que, en este caso, para el primer evento del catálogo se dispondrá de un valor previo  $CS_e$ ). Ambas fallas abarcan un rango latitudinal que va desde los  $-18.5^\circ$  a los  $-20.6^\circ$  de latitud aproximadamente, el que varía ligeramente debido al ángulo de strike de ambas fallas.

Debido a que tanto en S.Ruiz et.al 2014 [11] como en W. Bloch et.al 2014 [6], se ha reportado un gran acoplamiento en la zona, suponemos que la falla superior (que representa el movimiento de la Interfase Superior), termina a los

-70.4° de longitud aproximadamente. Mientras que, la falla inferior se proyecta hasta los -72.5° de longitud, de forma que abarca prácticamente toda la sección de la Interfase Inferior en la zona de Interés.

Dado que parte de la Interfase Superior se encuentra acoplada, por lo que comienza desde los 70.4° de longitud, se le supondrá una profundidad de 80 *km* a -69.7° de longitud, para cada evento simulado. Mientras que, para la Interfase Inferior, la profundidad del evento simulado será de 95 *km* a -71.15° de longitud.

Este caso analizará para todas las ventanas, debido a que el intersísmico, comenzó mucho tiempo antes que el primer evento de la primera ventana.

- **Cálculo del  $CS_e$  debido a eventos sísmicos considerando el Intersísmico y el “Terremoto Lento”:** Este caso tiene la peculiaridad de sólo poder analizarse desde la cuarta ventana en adelante, y difiere del caso anterior únicamente en que, además de considerarse la influencia del Intersísmico, se considera también el Evento Lento reportado en el trabajo de S.Ruiz et.al 2014 [11].

De acuerdo a S.Ruiz et.al 2014 [11], el Evento Lento inicia aproximadamente, al mismo tiempo que ocurre el evento del 16 de Marzo 2014 (6.7  $M_W$ ), el cual, al ser el primer evento de la cuarta ventana, es la principal razón por la que la tercera ventana presenta sólo 8 eventos.

Para simular este evento, supuso una falla de  $70 \times 21,28$  *km* ubicada en torno a los -19.7° de latitud, -70.6° de longitud y a 34 *km* de profundidad, los cuales, en el caso de la latitud y la longitud, son los parámetros de este movimiento de acuerdo con lo obtenido por S.Ruiz et.al 2014 [11]. Mientras que la profundidad es supuesta al observar la profundidad de margen de subducción a esa latitud, el deslizamiento se aproxima utilizando la ecuación ((2.17)).

Este caso permite ver si es que los esfuerzos producidos por el Evento Lento, propiciaron aún más la sismicidad o la retrasaron. Dándonos de esta forma, una visión más precisa de lo que llegan a influir los movimientos asísmicos en la sismicidad previa a un Mega-Evento.

---

# Capítulo 3

## Resultados

### 3.1. Primera Ventana de Eventos (del 1 al 10):

#### 3.1.1. Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad:

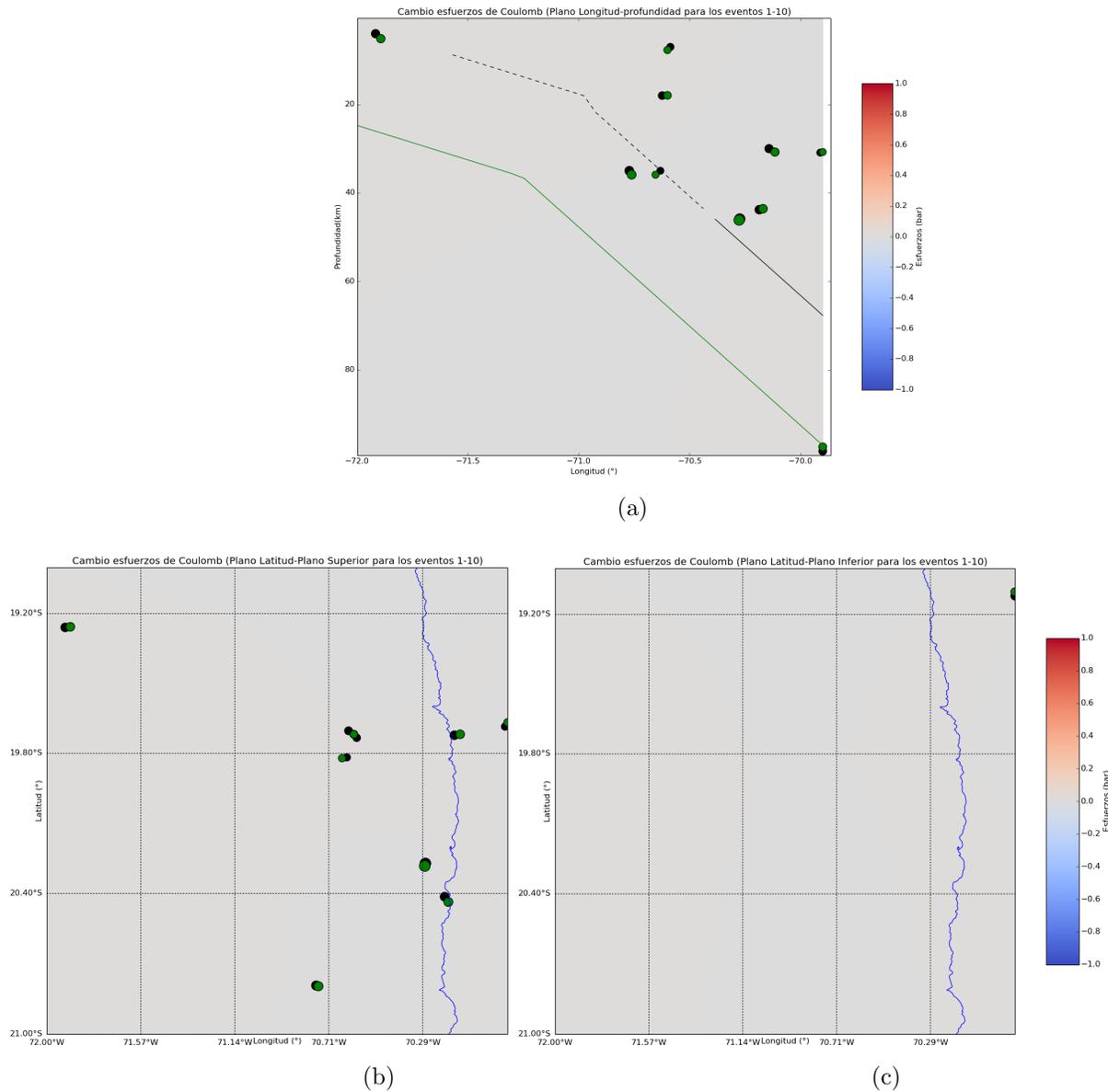


Figura 3.1: (a) Esfuerzos de Coulomb en el plano Longitud-Profundidad posterior al primer evento con sismicidad adjunta de los eventos 1 al 10, (b) Esfuerzos de Coulomb en el plano Latitud-Interfase superior posterior al primer evento con sismicidad adjunta de los eventos 1 al 10, (c) Esfuerzos de Coulomb en el plano Latitud-Interfase inferior posterior al primer evento con sismicidad adjunta de los eventos 1 al 10

### Análisis Observacional

Puede notarse en la figura (3.1), que a pesar de contar sólo con el  $CS$  del primer evento (por lo que  $CS = CS_e$ ), los hipocentros de cinco eventos se encontrarían donde previamente  $CS > 0$ , mientras que, los otros cuatro eventos, ocurren donde previamente  $CS < 0$ . No obstante, todos estos eventos se encontrarían en la Zona Neutra, debido al escaso valor de  $CS$  que provoca el primer evento.

Dado que los eventos ocurren, no necesariamente en torno a los ejes paramétricos utilizados y a que, cada evento modifica el valor de  $CS_e$ , la figura (3.1) no puede usarse para representar la condición de  $CS_e$  durante toda la ventana de eventos. Lo cual debe ser visto en el *Análisis Teórico*.

### Análisis Teórico

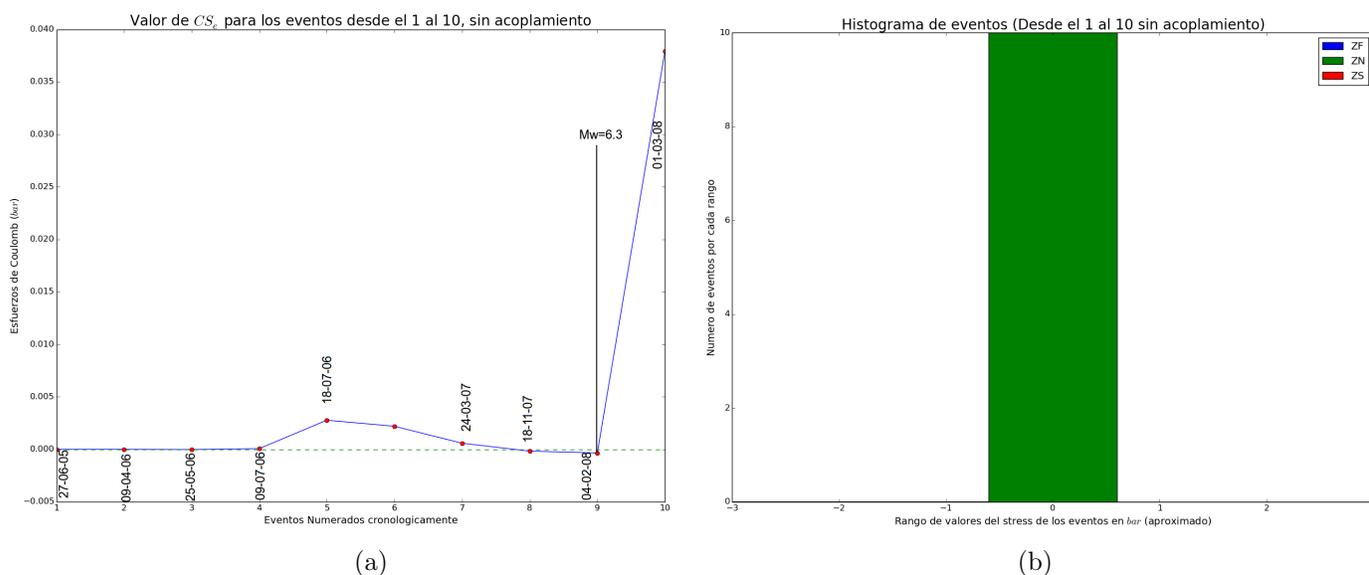


Figura 3.2: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en el hipocentro de los eventos 1 al 10 en el instante previo a su ocurrencia, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentro de  $CS_e$  negativo

En la figura (3.2a) se visualizan los valores de  $CS_e$  previos a cada evento en su hipocentro (agregando la fecha en la que ocurre en caso de que ocurra en una fecha diferente a la del evento anterior), mientras que la figura (3.2b) muestra la cantidad de eventos cuyo valor de  $CS_e$  en el hipocentro es positivo comparado a la cantidad de eventos cuyo valor de  $CS_e$  en el hipocentro es negativo.

En la figura (3.2) se tiene que la mayoría de los eventos ocurren en una zona donde  $CS_e \geq 0$ . Sin embargo, dado a que sus valores son muy pequeños, no se ubicarían en la Zona Favorable sino en la Zona Neutra.

De la figura (3.2) obtenemos los Cuadros (3.1) y (3.2), que se utilizarán para analizar de manera más precisa, no solo la cantidad de eventos ubicados en puntos donde  $CS_e$  era positivo o negativo. Sino que muestra además la magnitud de los eventos, donde y cuando ocurrieron y el valor hipocentral de  $CS_e$  en el momento inmediatamente anterior al evento. Permitiendo así discernir con precisión si es que los eventos están en la Zona Favorable, la Zona Neutra o la Zona de Sombra.

En el cuadro (3.2) se observa, que si bien en esta ventana hay cinco eventos ubicados en zonas donde  $CS_e > 0$ , todos se ubican en la Zona Neutra debido a que su valor es muy cercano a 0 *bar*.

El porqué ningún evento se encuentra en la Zona Favorable o en la Zona de Sombra, se debe en parte a la escasez de eventos previos y quizás a que al abarcar un periodo de más de dos años, el despreciar el efecto de los movimientos asísmicos sobre  $CS_e$ , resulte en que algunos eventos se registren como si se ubicaran en lugares con baja carga previa de esfuerzos.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
1	27-06-05 00:53	-19.685	-69.911	30,9	4.9	0
2	09-04-06 20:50	-20.792	-70.772	35,3	5.7	-0,0
3	25-05-06 20:48	-19.259	-71.916	4,0	5.5	-0,0
8	18-11-07 07:02	-19.12	-69.9	98,4	5.3	-0,0
9	04-02-08 17:01	-20.271	-70.274	45,9	6.3	-0,0

Cuadro 3.1: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 1 a 10. Los eventos cuyo esfuerzo asociado es representado por  $-0,0$  son aquellos que cuyo valor de  $CS_e$  es negativo pero muy cercano a cero.

Ev N°	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
1	27-06-05 00:53	-19.685	-69.911	30,9	4.9	0
4	09-07-06 16:36	-19.703	-70.624	18,0	5.2	0,0
5	18-07-06 00:31	-19.733	-70.587	7,0	5.0	0,003
6	18-07-06 03:54	-19.817	-70.632	35,0	4.9	0,002
7	24-03-07 19:13	-19.722	-70.142	30	5.5	0,001
10	01-03-08 19:51	-20.413	-70.186	43,8	5.6	0,038

Cuadro 3.2: Los eventos cuyo esfuerzo asociado es representado por 0,0 son aquellos que cuyo valor de  $CS_e$  es positivo pero muy cercano a cero.

A partir de los Cuadros(3.1) y (3.2) observamos que, por un lado esta ventana presenta eventos de magnitud de mediana a grande, lo cual implica que el  $CS_e$  producto de estos eventos será importante de considerar. Esto porque los eventos de magnitud superior a 6.0  $M_W$ , cambian el valor de  $CS_e$  de manera lo bastante considerable como para promover o inhibir eventos.

Por otro lado, la separación temporal entre eventos es muy grande. Un ejemplo de esto se puede ver en que el primer evento de la ventana ocurre el 27 de Junio del 2005. Mientras que, el segundo ocurre el 9 de Agosto del 2006. Si bien la diferencia temporal entre dos eventos tiende a ser de entre algunos días y algunos meses, no cambia el hecho de que esta ventana sea bastante irregular en los intervalos de tiempo entre dos eventos, especialmente al tenerse en cuenta que el último evento de la ventana ocurre en el año 2008.

Esta irregularidad probablemente se deba a que durante este periodo, la actividad sísmica se centraba en la zona pre-cordillerana. Mientras que, los eventos cercanos a la fosa, lo bastante grandes como para representarse mediante mecanismos focales eran escasos durante esos años.

### 3.1.2. Esfuerzos de Coulomb debidos a la sismicidad considerando el intersísmico:

#### Análisis Observacional

Puede notarse, que la cantidad de eventos ubicados en sitios donde  $CS_e > 0$  es grande. Mostrando así, que el intersísmico aporta mayormente esfuerzos positivos

(especialmente la Interfase inferior), siendo estos bastante altos hacia el área donde la sismicidad se concentra.

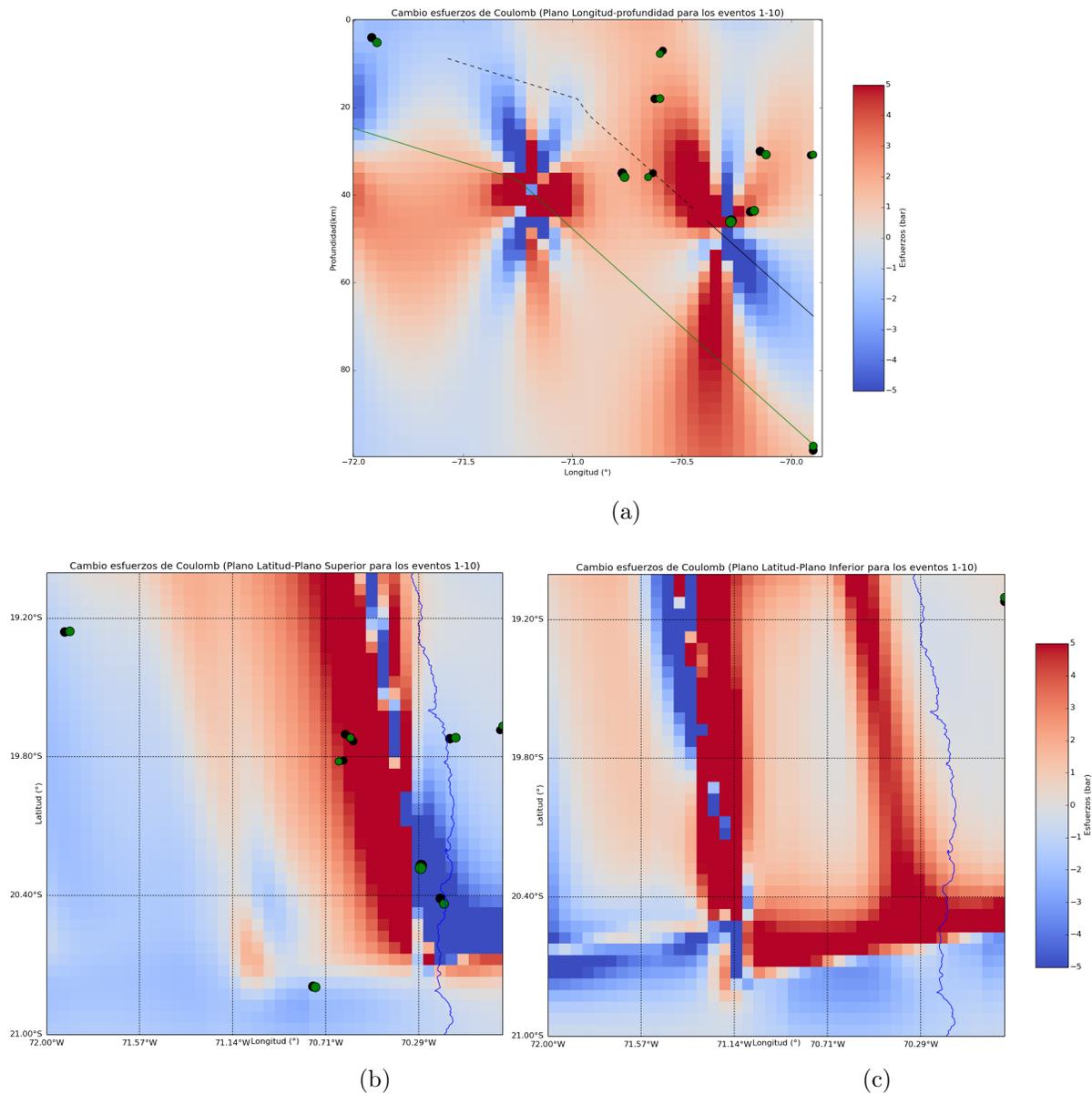


Figura 3.3: (a) Esfuerzos de Coulomb en el plano Longitud-Profundidad posterior al primer evento, considerando un Intersismico de 100 años con sismicidad adjunta de los eventos 1 al 10, (b) Esfuerzos de Coulomb en el plano Latitud-Interfase superior posterior al primer evento, considerando un Intersismico de 100 años con sismicidad adjunta de los eventos 1 al 10, (c) Esfuerzos de Coulomb en el plano Latitud-Interfase inferior posterior al primer evento considerando un Intersismico de 100 años y con sismicidad adjunta de los eventos 1 al 10

### Análisis Teórico

En la figura (3.4), se observa que la cantidad de eventos originados en sitios donde previamente  $CS_e > 0$  no aumentan tanto en cantidad, sino más bien lo que cambia es el valor de  $|CS_e|$  hipocentral (ahora notoriamente mayores), al punto de poder distinguir eventos en la Zona de Sombra, la Zona Neutra y en la Zona Favorable, predominando los eventos ubicados en la Zona Favorable.

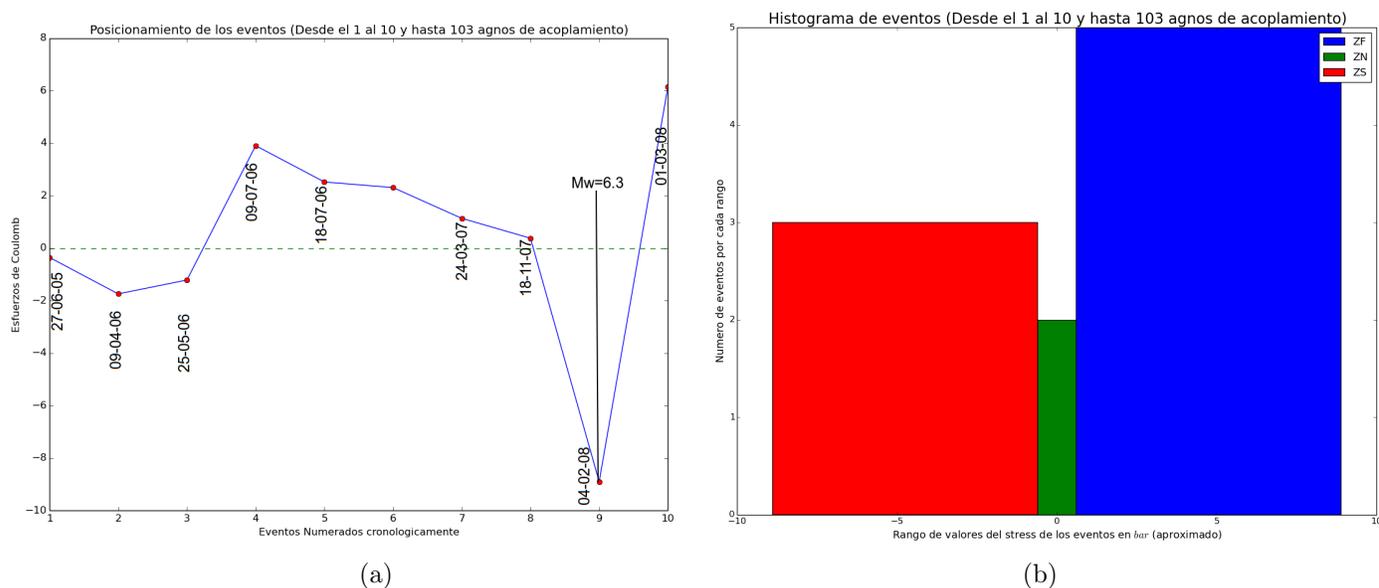


Figura 3.4: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en el hipocentro de los eventos 1 al 10 en el instante previo a su ocurrencia, considerando el intersísmico, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo al considerar el intersísmico

Para complementar la información obtenida en la figura (3.4) podemos ver los montos exactos que alcanza  $CS_e$  en los Cuadros (3.3) y (3.4), donde se ve que estos valores oscilan entre los  $-8,893 \text{ bar}$  y los  $6,142 \text{ bar}$ . Existiendo tres eventos en la Zona de Sombra, cinco en la Zona Favorable y dos en la Zona Neutra (uno en la negativa y uno en la positiva).

Al comparar los cuadros (3.3) y (3.4) con los cuadros (3.1) y (3.2), resultan estar compuestas casi los mismos eventos, con la excepción del evento número 8 y que el evento número 1 ahora está en la Zona Neutra Negativa.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
1	27-06-05 00:53	-19.685	-69.911	30,9	4.9	-0,353
2	09-04-06 20:50	-20.792	-70.772	35,3	5.7	-1,741
3	25-05-06 20:48	-19.259	-71.916	4,0	5.5	-1,212
9	04-02-08 17:01	-20.271	-70.274	45,9	6.3	-8,893

Cuadro 3.3: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 1 a 10.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
4	09-07-06 16:36	-19.703	-70.624	18,0	5.2	3,905
5	18-07-06 00:31	-19.733	-70.587	7,0	5.0	2,522
6	18-07-06 03:54	-19.817	-70.632	35,0	4.9	2,309
7	24-03-07 19:13	-19.722	-70.142	30,0	5.5	1,137
8	18-11-07 07:02	-19.12	-69.9	98,4	5.3	0,380
10	01-03-08 19:51	-20.413	-70.186	43,8	5.6	6,142

Cuadro 3.4: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 1 a 10.

### 3.1.3. Mecanismos Focales:

La figura (3.5) muestra que los mecanismos focales de los eventos en esta ventana son mayormente inversos. Existiendo únicamente dos eventos oblicuos, de los que uno ocurre en la Interfase Superior y el otro en la Interfase Inferior. El evento inicial del catálogo es el oblicuo ubicado en la Interfase Superior.

Si se observa el Cuadro (3.3), vemos que uno de los eventos en la Zona de Sombra, corresponde a un evento oblicuo predominantemente normal (nótese que es el evento más profundo de la ventana), los cuales en Nostro et.al 2005 [2] en ocasiones, se ubicaban también en la Zona de Sombra, por lo que el que este evento esté en la Zona de Sombra es algo que puede ocurrir.

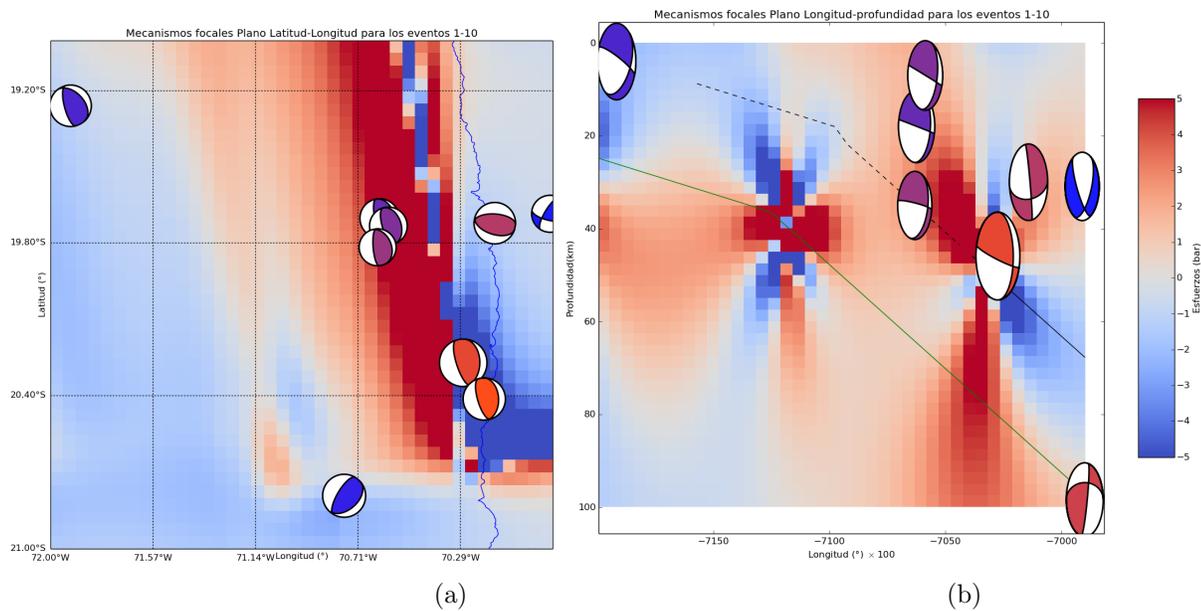


Figura 3.5: Mecanismos focales en el plano Latitud-Longitud (a) y en el plano Longitud-Profundidad (b) para la primera ventana de eventos.

### 3.1.4. Resumen

Durante esta ventana, los eventos fueron mayoritariamente de geometría inversa, con algunos oblicuos. Sus magnitudes fueron muy variables durante toda la ventana, al igual que su distribución temporal. Sin contar con que los eventos ocurrieron de forma dispersa en la zona de estudio.

Se nota, a partir de lo obtenido en las Subsecciones (3.1.1) y (3.1.2), que si bien, los sismos aumentan un poco el  $CS_e$ , la mayor parte de los esfuerzos aportados (lo cual, mostraría que, en efecto los eventos sí se gatillan en zonas donde previamente  $CS_e > 0$ ) provienen del Intersísmico.

## 3.2. Segunda Ventana de Eventos (del 11 al 20):

### 3.2.1. Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad:

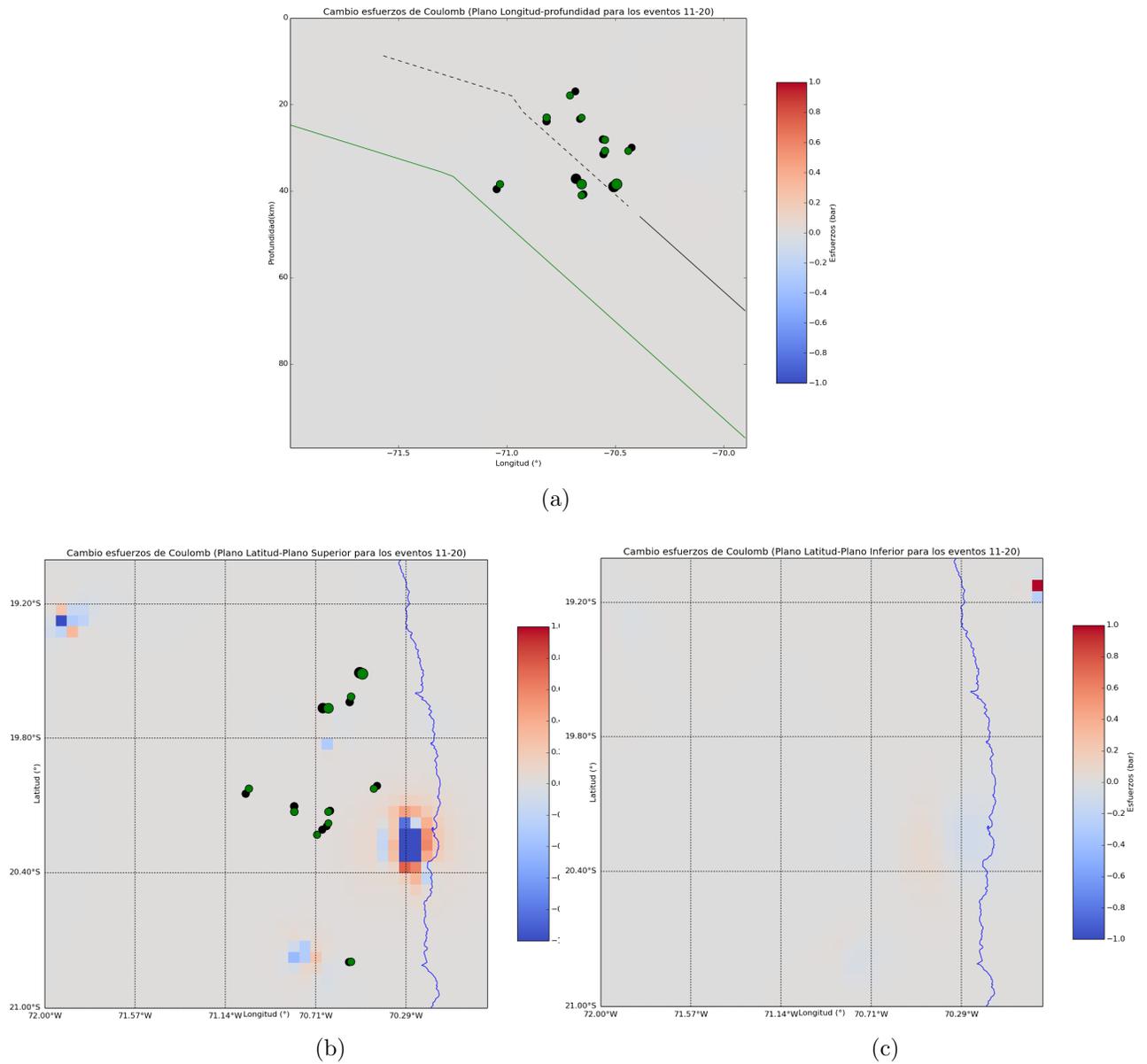


Figura 3.6: (a) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Longitud-Profundidad usando los eventos del 1 al 10 con sismicidad adjunta de los eventos 11 al 20, (b) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase superior usando los eventos del 1 al 10 con sismicidad adjunta de los eventos 11 al 20, (c) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase inferior usando los eventos del 1 al 10 con sismicidad adjunta de los eventos 11 al 20

### Análisis Observacional

En esta nueva ventana se toman los eventos desde el 11 al 20 del catálogo, de la misma forma que se utilizó en la ventana anterior. Obteniendo  $CS_e$  paulatinamente conforme ocurren los eventos.

A partir de la figura (3.6) vemos que los eventos comienzan a concentrarse principalmente en torno a dos puntos. Uno corresponde al área circundante al evento principal (lado norte) y el otro, corresponde al límite sur de la Zona de Alto Acoplamiento.

En la figura (3.6a), se observa que la actividad sísmica se concentra en la Interfase Superior y la zona entre ambas interfases. No obstante, debido a que en este caso, el perfil de los esfuerzos de Coulomb se muestra para una latitud específica, no puede asegurarse con la figura (3.6a), que los eventos ocurran efectivamente en una zona donde  $CS_e$  sea positivo. Para esto, es que se usan las figuras (3.6b) y (3.6c), las cuales, permiten observar el  $CS_e$  en las Interfases Superior e Inferior respectivamente en la latitud.

En las figuras (3.6b) y (3.6c), se puede ver que los eventos ocurrieron seguidamente en zonas donde  $CS_e$  se muestra positivo (tonos rojizos), también se observa que existen algunos eventos cuya representación, se muestra en lugares donde los esfuerzos de Coulomb son negativos (tonos azulados), los que, hasta donde se puede apreciar, corresponderían a tres de los eventos.

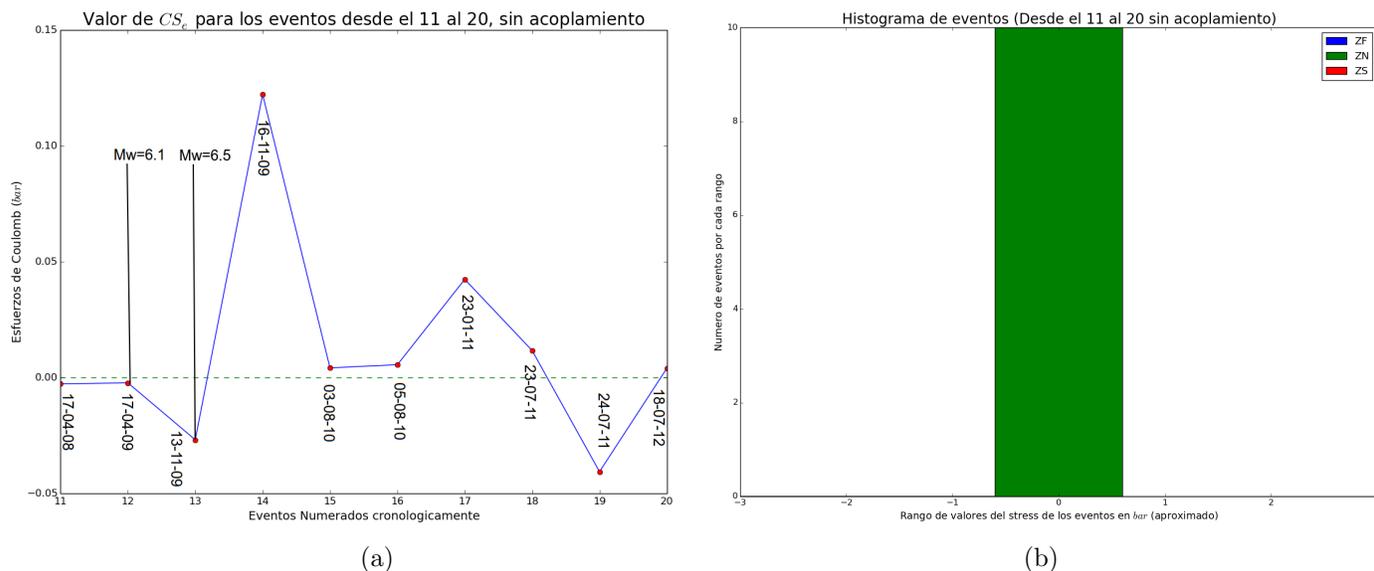


Figura 3.7: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en los hipocentros de los eventos 11 al 20 en el instante previo a su ocurrencia (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo

### Análisis Teórico

A pesar de lo observado en el mapa, los eventos ubicados en sitios de  $CS_e$  positivos y negativos son ligeramente diferentes (véase la figura(3.7b)), teniendo el 60 % de los eventos en sitios de  $CS_e > 0$  y el 40 % en sitios de  $CS_e < 0$ . Se tiene también, en la figura (3.7a), que  $|CS_e|$  es mayor hacia el lado de los valores positivos que los negativos, aunque en la mayoría de los casos es demasiado pequeño. Existiendo, de esta forma, seis eventos en la Zona Neutra Positiva y cuatro eventos en la Zona Neutra Negativa.

Las diferencias de los valores de  $CS_e$  entre lo mostrado en la figura (3.6) y lo mostrado en la figura (3.7) se deben a los siguientes factores.

- En la figura (3.6) los valores mostrados de  $CS_e$  son tomados para un perfil en torno a latitudes y profundidades específicas, las que no se condecirán necesariamente con los hipocentros de los eventos debido a la gran cantidad de estos. Mientras que en la figura (3.7) se muestran los valores de  $CS_e$  para el hipocentro de cada evento.
- La figura(3.6) muestra el valor de  $CS_e$  correspondiente al inicio de la ventana. Por lo que, de haber al menos un evento de magnitud superior a 6.0  $M_W$  durante esta, el valor posterior de  $CS_e$  se verá alterado de manera considerable. Mientras que, la figura (3.7), muestra el valor de  $CS_e$  en el momento inmediatamente previo a la ocurrencia del evento, considerando los cambios en  $CS_e$  resultante que pudieran haber.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
11	17-04-08 07:57	-20.048	-71.046	39,6	5.1	-0,003
12	17-04-09 02:08	-19.666	-70.68	37,2	6.1	-0,002
13	13-11-09 03:06	-19.508	-70.505	39	6.5	-0,027
19	24-07-11 01:54	-20.193	-70.662	23,4	4.9	-0,041

Cuadro 3.5: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 11 a 20.

Ev N°	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
14	16-11-09 18:34	-19.639	-70.553	31,5	5.2	0,122
15	03-08-10 05:29	-20.124	-70.646	40,8	5.1	0,004
16	05-08-10 20:35	-20.104	-70.816	23,9	5.2	0,006
17	23-01-11 16:02	-20.013	-70.423	30	5.0	0,042
18	23-07-11 22:45	-20.208	-70.683	17	5.0	0,012
20	18-07-12 18:24	-20.796	-70.556	28,1	5.1	0,004

Cuadro 3.6: Sismos cuyos Esfuerzos de Coulomb son positivos, ubicados en la ventana de eventos 11 a 20.

Tal y como se comprueba en los Cuadros (3.5) y (3.6), los eventos ocurren en sitios donde el valor de  $CS_e$  es muy pequeño, sin importar si estos se ubican en una zona donde  $CS_e$  era negativo o positivo, con la única excepción del evento número 14, el que fue el único que fue adelantado indirectamente por la sismicidad previa. Sin embargo, dado que la cantidad de eventos con los que se calculó  $CS_e$  es relativamente pequeña (de 10 a 19 eventos previos), es posible que esa zona en realidad estuviera bajo gran acumulación de esfuerzos anteriormente, pudiendo este ser tanto de origen sísmico como asísmico. Lo cual, se sospecha debido a que al observar el amplio rango temporal de esta ventana (mayor que el de la ventana anterior). Por lo que, ignorar la influencia del Intersísmico en estos casos, puede llevar a la apresurada conclusión de que estos eventos no presentaban relación entre sí al ocurrir todos en la Zona Neutra. Sin embargo, al tratarse de un margen de subducción, puede ser que la relación entre estos eventos exista pero sea más indirecta. Cosa que estudiaremos en el siguiente caso, donde consideraremos el Intersísmico para calcular  $CS_e$ .

### 3.2.2. Esfuerzos de Coulomb debidos a la sismicidad considerando el Intersísmico:

#### Análisis Observacional

Al considerar el Intersísmico, vemos que hay grandes cambios en el mapa respecto al caso anterior (3.2.1).

Es posible ver en la figura (3.8) que casi todos los eventos tendrían sus hipocentros cerca de la Interfase Superior, donde  $CS_e$  es positivo.

No obstante, es necesario utilizar la figura (3.9) con los valores de  $CS_e$  de cada evento, debido a que en esta ventana hay más de un evento de magnitud superior a  $6.0 M_W$  y a que también, en esta ventana transcurren cinco años entre el primer y el último evento, lo que causará cambios en el valor de  $CS_e$ , al agregar otros cinco años de Intersísmico.

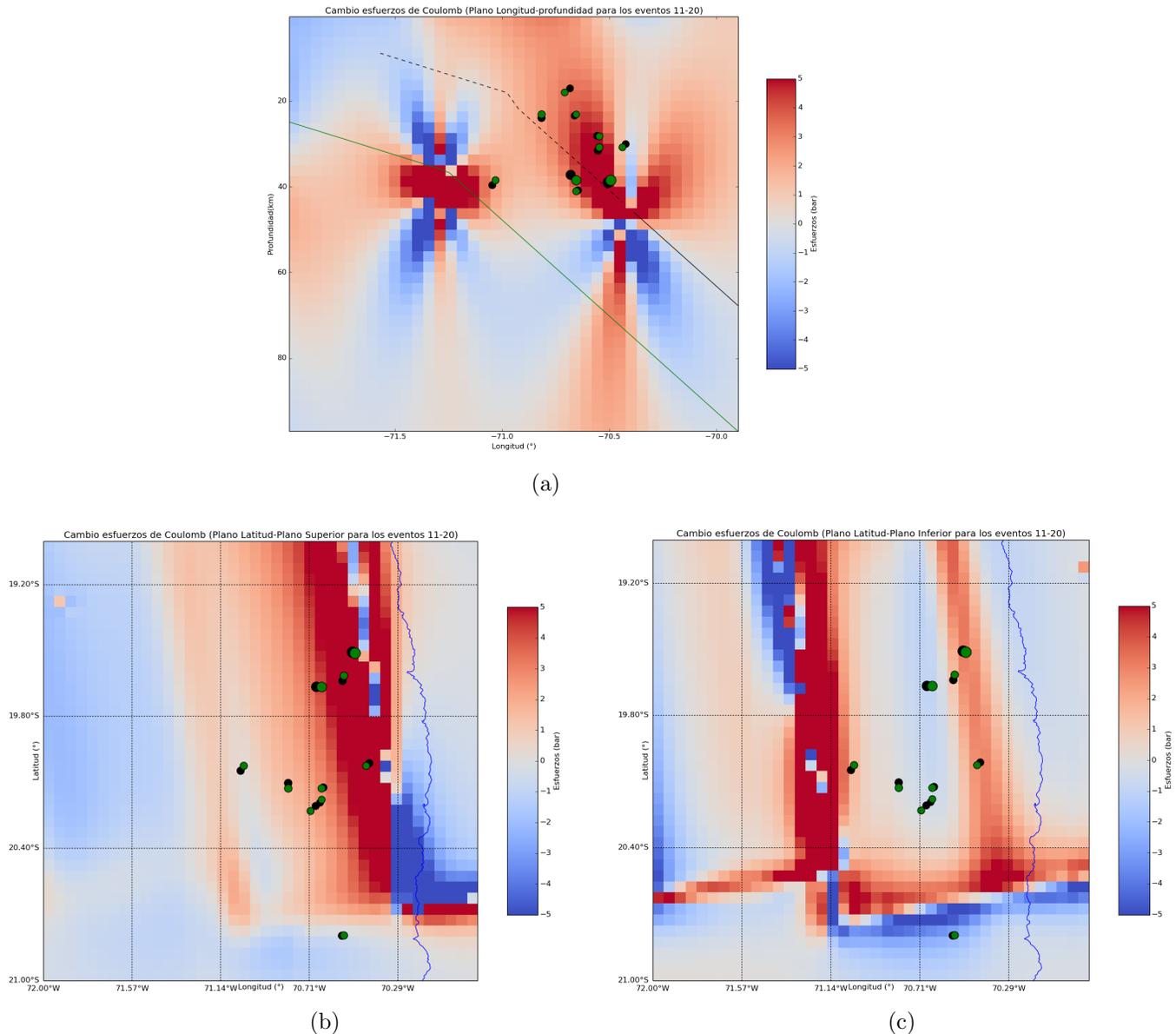


Figura 3.8: (a) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Longitud-Profundidad para los eventos del 1 al 10 con sismicidad adjunta de los eventos 11 al 20 y acoplamiento de 103 años, (b) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase superior para los eventos del 1 al 10 con sismicidad adjunta de los eventos 11 al 20, considerando un intersísmico de 103 años, (c) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase inferior para los eventos del 1 al 10 con sismicidad adjunta de los eventos 11 al 20, considerando un intersísmico de 103 años

### Análisis Teórico

En la figura (3.9) el 100% de los eventos, están ubicados en sitios con  $CS_e > 0$ . De los cuales el 80% son gatillados en la Zona Favorable, existiendo dos eventos en la Zona Neutra (uno de ellos ocurrido en un sitio de  $CS_e$  muy pequeño). Esto puede deberse, a que la zona donde este ocurre quedaría fuera de la Zona de Alto Acoplamiento lo que hace difícil concluir algo sobre este evento, pues el deslizamiento fuera de la Zona de Alto Acoplamiento es despreciado en este trabajo.

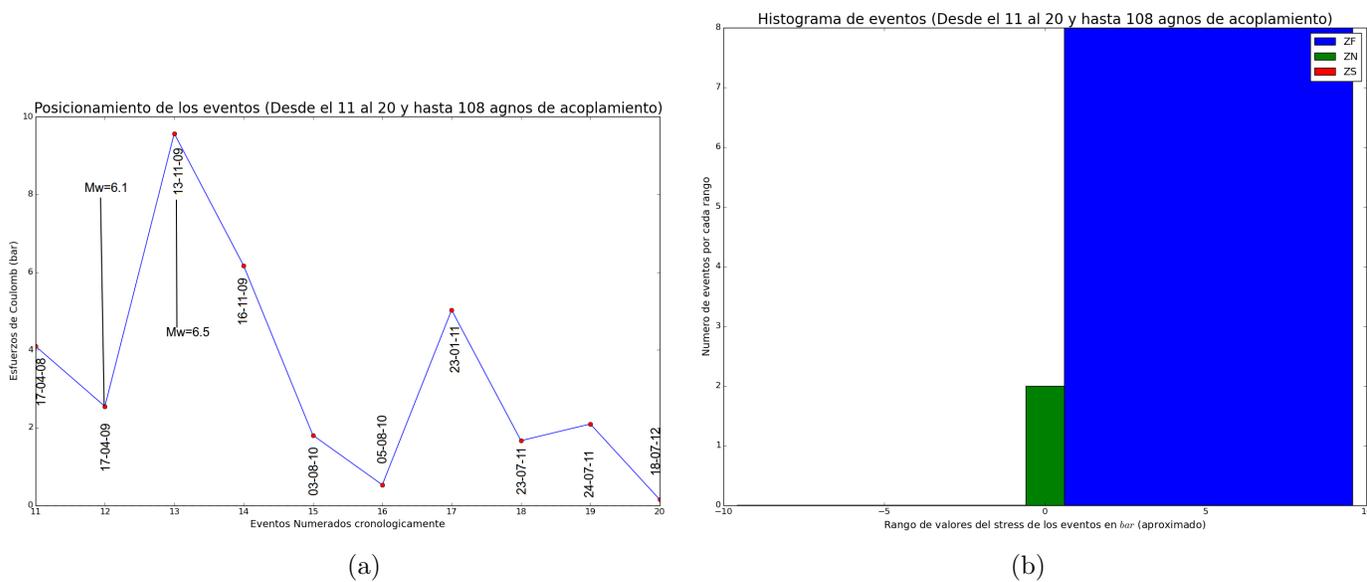


Figura 3.9: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en los hipocentro de los eventos 11 al 20 en el instante previo a su ocurrencia, considerando el intersísmico, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo al considerar el intersísmico

Observando el Cuadro (3.7), vemos que todos los eventos son localizados en zonas donde  $CS_e \geq 0,150 \text{ bar}$ , de los que ocho son superiores a  $1 \text{ bar}$ . Dando, como resultado, que prácticamente todos los eventos, han tenido lugar en lugares de alta concentración de  $CS_e$ . Los que, al ser comparados con los esfuerzos de los Cuadros (3.5) y (3.6), nos muestran la imprortancia que tiene el Intersísmico en el valor de  $CS_e$  en zonas de subducción.

Ev N°	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
11	17-04-08 07:57	-20.048	-71.046	39,6	5.1	4,094
12	17-04-09 02:08	-19.666	-70.68	37,2	6.1	2,546
13	13-11-09 03:06	-19.508	-70.505	39	6.5	9,568
14	16-11-09 18:34	-19.639	-70.553	31,5	5.2	6,170
15	03-08-10 05:29	-20.124	-70.646	40,8	5.1	1,804
16	05-08-10 20:35	-20.104	-70.816	23,9	5.2	0,528
17	23-01-11 16:02	-20.013	-70.423	30	5.0	5,026
18	23-07-11 22:45	-20.208	-70.683	17	5.0	1,665
19	24-07-11 01:54	-20.193	-70.662	23,4	4.9	2,093
20	18-07-12 18:24	-20.796	-70.556	28,1	5.1	0,150

Cuadro 3.7: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 11 a 20.

### 3.2.3. Mecanismos Focales:

Tal como se aprecia en la figura(3.10), la totalidad de los eventos presentan mecanismos focales de tipo inverso.

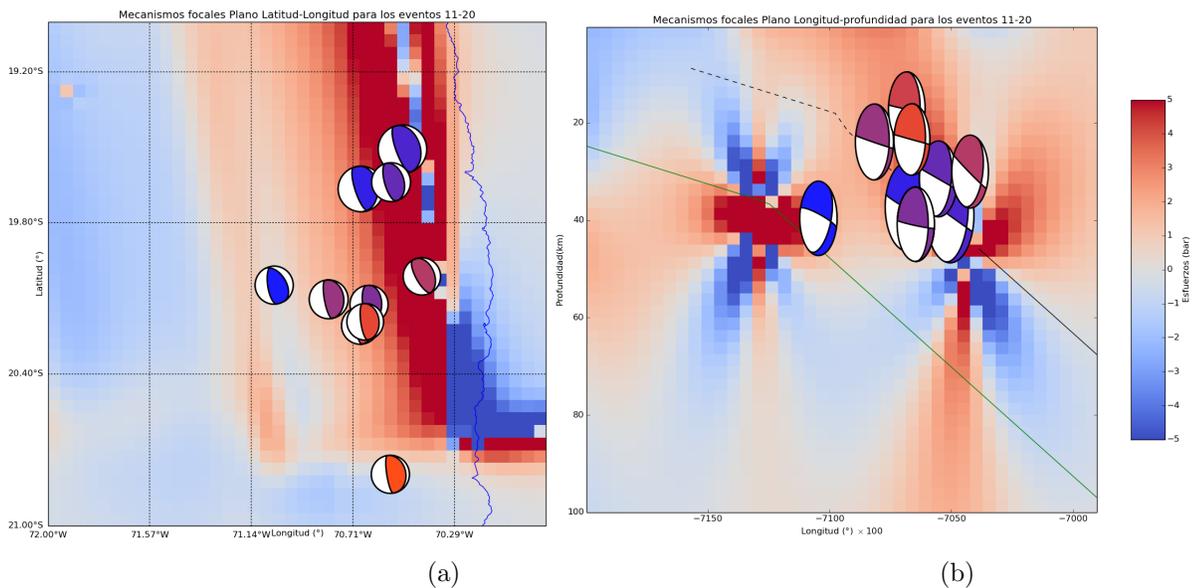


Figura 3.10: Mecanismos focales en el plano Latitud-Longitud (a) y en el plano Longitud-Profundidad (b) para la segunda ventana de eventos.

Se ve en la figura (3.10b), que hay un caso en particular, en que un evento de mecanismo inverso ocurre muy cerca de la Interfase Inferior, lo cual, posiblemente sea debido al esfuerzo aplicado sobre la Interfase Inferior por la Interfase Superior (esto será definido en la sección de *Mecanismos Focales*(3.5.4) y el *Resumen* de la *Quinta Ventana* (3.5.5)).

### 3.2.4. Resumen

Esta ventana no presenta los resultados esperados para el caso del  $CS_e$  obtenido únicamente por la sismicidad. Dado que, al tomar en cuenta los valores de  $CS_e$  en *bar*, estos son, en muchos casos, demasiado pequeños para siquiera decir que influyan en la ocurrencia de un evento, puesto que sólo en el evento 14  $|CS_e > 0,05| \text{ bar}$ .

Al considerar el intersísmico en el cálculo de  $CS_e$ , se tiene que los eventos quedan casi en su totalidad en la Zona Favorable, con sólo dos eventos en la Zona Neutra Positiva.

Estos diferencias son hacen que para este caso se deba decir que el intersísmico aportó el esfuerzo necesario para que estos eventos ocurrieran. Dado que incluso al haber eventos que se ubicarían en sitios donde previamente  $CS_e < 0$ , estos valores son demasiado pequeños en comparación con los esfuerzos aportados por el intersísmico, por lo que se concluye que en esta ventana la relación entre la sismicidad no es de la forma en que un evento promueva o retrase al otro, sino más bien, los eventos ocurridos serían provocados en esos puntos, debido a la gran cantidad de esfuerzo acumulado durante el intersísmico.

## 3.3. Tercera Ventana de Eventos (del 21 al 28):

En esta ventana se calculan el  $CS_e$  usando los 28 primeros eventos del catálogo (añadiendo desde los eventos del 21 al 28), teniendo una menor cantidad de eventos debido a que a partir del evento 29 en adelante hay que considerar también la influencia del “Terremoto Lento” (o Evento Lento) en el cálculo de  $CS_e$ .

### 3.3.1. Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad:

#### Análisis Observacional

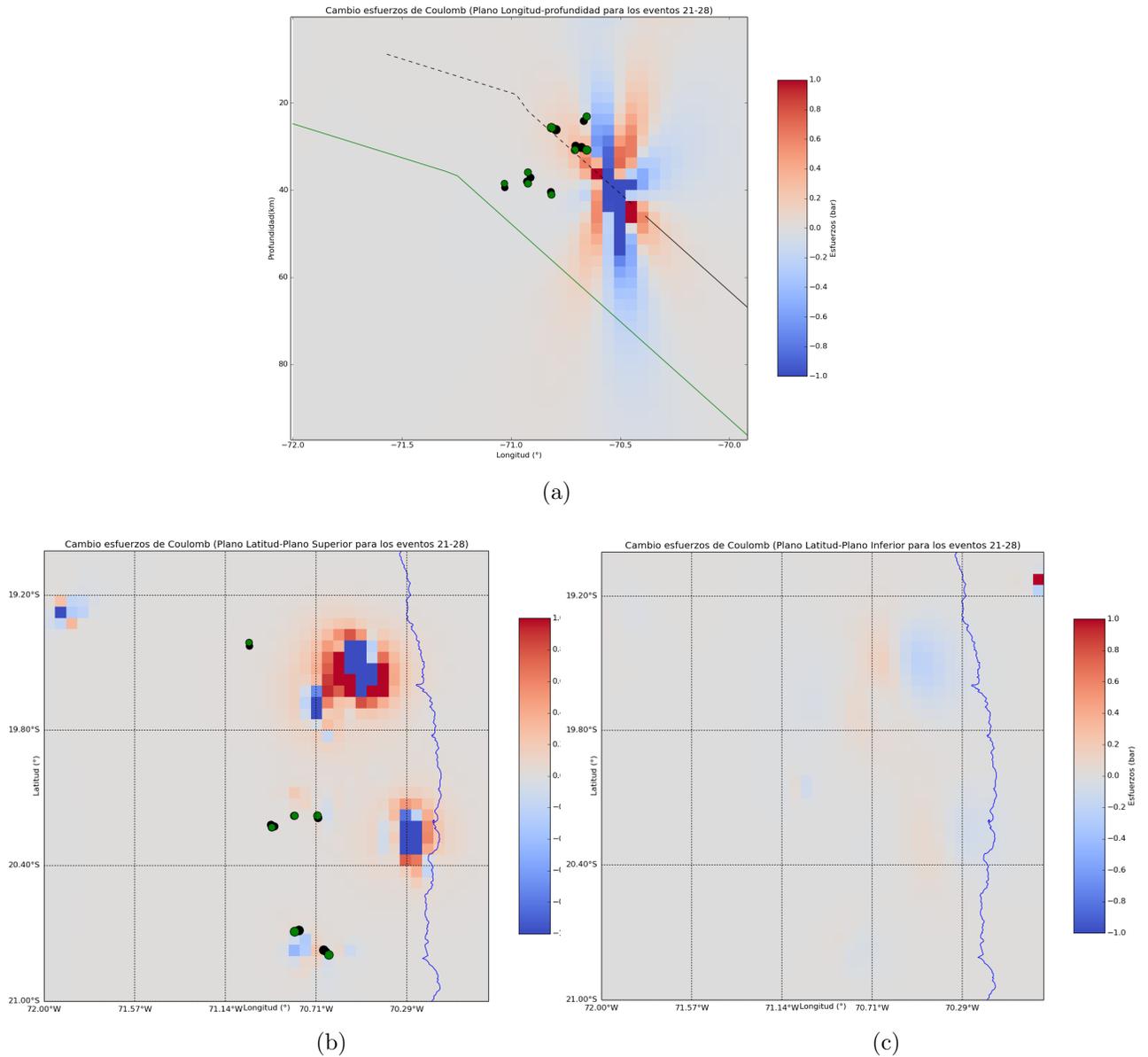


Figura 3.11: (a) Esfuerzos de Coulomb en el plano Longitud-Profundidad para los eventos del 1 al 20 con sismicidad adjunta de los eventos 21 al 28, (b) Esfuerzos de Coulomb en el plano Latitud-Interfase superior para los eventos del 1 al 20 con sismicidad adjunta de los eventos 21 al 28, (c) Esfuerzos de Coulomb en el plano Latitud-Interfase inferior para los eventos del 1 al 20 con sismicidad adjunta de los eventos 21 al 28

Al observar la figura(3.11) se ve que muchos eventos ocurren en torno al área de concentración del sur descrita en la *Segunda Ventana* (3.2.1), mientras que en la sección de concentración del norte sólo hay un evento.

Cabe mencionar que hay algo de actividad en el límite sur de la Zona de Alto Acoplamiento, la cual consta de sólo dos a tres eventos. Sin embargo, dado que corresponde a sismos de baja magnitud y que se ubican en el límite de la Zona de Alto Acoplamiento, esta actividad no ejerce gran influencia, al menos de forma directa, sobre los eventos que se concentran más al norte.

Existe sismicidad de baja profundidad (menor 30,2  $km$ ) y sismicidad algo más profunda (en el rango de 30 – 40  $km$  aproximadamente, véase la figura(3.11a)). Lo cual, puede en parte deberse al gran margen de latitudes de los hipocentros en esta ventana.

A partir de las figuras (3.11b) y (3.11c), puede notarse que los eventos tienen lugar hacia el Oeste respecto a las ventanas anteriores. Esto se comprueba al ver que los hipocentros de los eventos futuros se encuentran alejados hacia el Oeste de los sitios donde  $|CS_e|$  es mayor.

Se ve también, que varios eventos ocurrirían en una zona donde  $CS_e$  es negativo, así como algunos otros positivos, aunque de valores pequeños para ambos casos.

### Análisis Teórico

Luego de obtener los valores de  $CS_e$  para cada evento en esta ventana, notamos que en lo observado en la figura (3.11) coincide con lo observado en la figura (3.12), ya que un 62,5 % de los eventos ocurren en sitios de  $CS_e < 0$ . Mientras que, el restante 37,5 % ocurriría en sitios de  $CS_e > 0$ . Esto, puede deberse a la falta de eventos de magnitudes superiores a 6.0  $M_W$  en esta ventana, por lo que  $CS_e$  no sufriría cambios considerables durante la misma. Sin embargo, debido a que  $CS_e \approx 0$  para la mayoría de los eventos, se induce que todos yacen en la Zona Neutra. No existiendo por tanto, relación causa-consecuencia directa entre estos eventos.

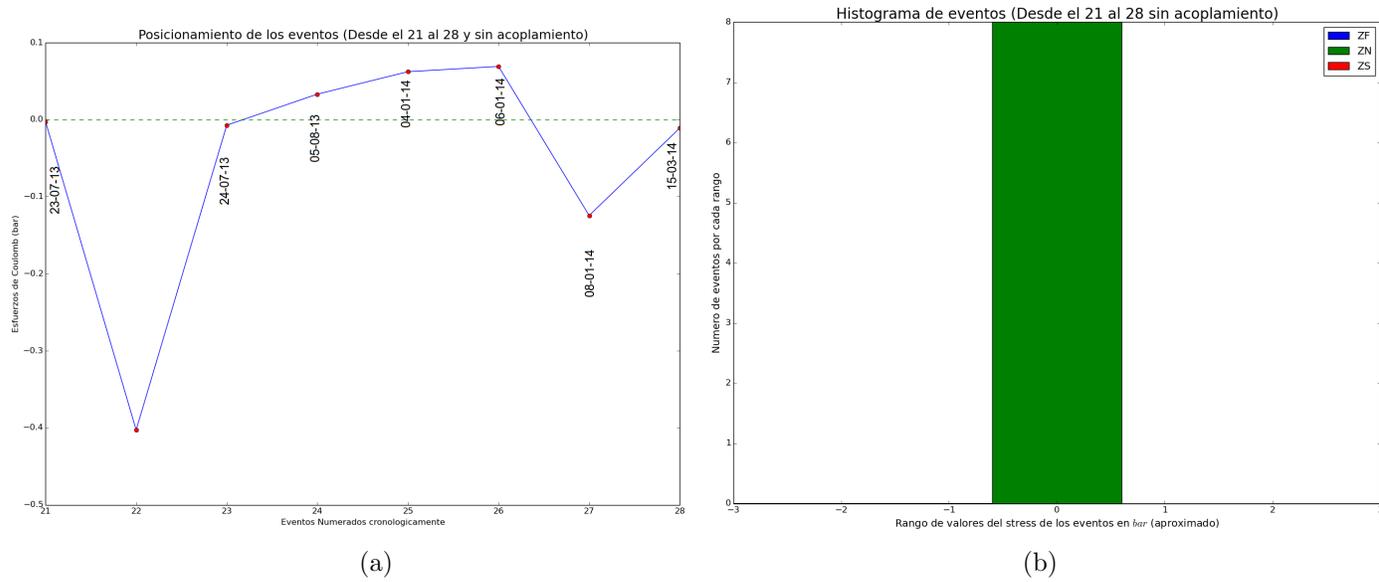


Figura 3.12: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en los hipocentro de los eventos 21 al 28 en el instante previo a su ocurrencia, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo

Lo visto en la figura (3.12), que a su vez es expandido en los Cuadros (3.8) y (3.9), nos dice que esta ventana se caracteriza por tener una actividad más constante, dado que, entre el inicio de la ventana y el final de esta, transcurren nueve meses y no tres a cinco años como en las ventanas anteriores, aunque el primer evento de esta ventana, ocurre un año después del último evento de la ventana anterior.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
21	23-07-13 17:27	-20.22	-70.927	38	5.1	-0,003
22	23-07-13 21:12	-20.227	-70.911	37,1	5.0	-0,372
23	24-07-13 13:29	-20.18	-70.818	40,4	5.0	-0,009
27	08-01-14 04:22	-20.774	-70.678	30,2	5.6	-0,133
28	15-03-14 20:14	-19.426	-71.029	39,4	4.7	-0,015

Cuadro 3.8: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 21 a 28.

Ev N°	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
24	05-08-13 05:40	-20.189	-70.705	29,8	5.2	0,031
25	04-01-14 00:11	-20.687	-70.795	26,1	5.7	0,064
26	06-01-14 03:59	-20.781	-70.667	24,1	5.1	0,068

Cuadro 3.9: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 21 a 28.

En los Cuadros (3.8) y (3.8), puede verse que la magnitud de los eventos en esta ventana, es inferior a las magnitudes de los eventos de ventanas anteriores. Lo cual, no corresponde necesariamente a una falta de registro, sino a que, en el tiempo en que los eventos de esta ventana ocurrieron, aumentó la recurrencia de sismos de magnitudes superiores a  $4.7 M_W$  (los cuales, son los que se representan mediante mecanismos focales). Esto se ve, en que, si bien, en ventanas anteriores tendían a haber sismos más grandes, estas también poseían eventos de magnitudes similares a los eventos de esta ventana.

La mayor constancia en la actividad, en principio nos haría pensar que los hipocentros se ubicarían mayormente, en sitios de  $CS_e > 0$ , cosa que no ocurre salvo por los eventos 24, 25 y 26, mas aún, en esos casos su valor hipocentral de  $CS_e$  es muy pequeño. No pudiendo ser realmente considerados como eventos que presentan una relación causa-consecuencia, aunque, se ve que hay alguna relación (menos directa) entre ellos .

De los eventos ubicados en la Zona Neutra, sólo los eventos 22 y 27 pueden considerarse que ocurrieron donde el esfuerzo se reduce (por lo que en teoría no debería ocurrir un evento en estos sitios), puesto que para el resto de los eventos  $|CS_e|$  es demasiado pequeño como para considerarse siquiera influidos por la sismicidad previa.

El hecho de que en ningún hipocentro  $CS_e \geq 0,6 \text{ bar}$ , a pesar de la menor brecha temporal y de la existencia de eventos relativamente cercanos entre sí, hace concluir que los eventos ocurridos no serían causados por otro anterior para este caso, sino más bien, serían la consecuencia de otro proceso, el cual probablemente sea el  $CS_e$  debido al intersísmico.

Esto puede sospecharse, por la gran profundidad de algunos eventos, que ocurren

particularmente cercanos a la fosa, ya que, se ubican a mayor profundidad que el contacto entre placas, muy cercanos a la Interfase inferior.

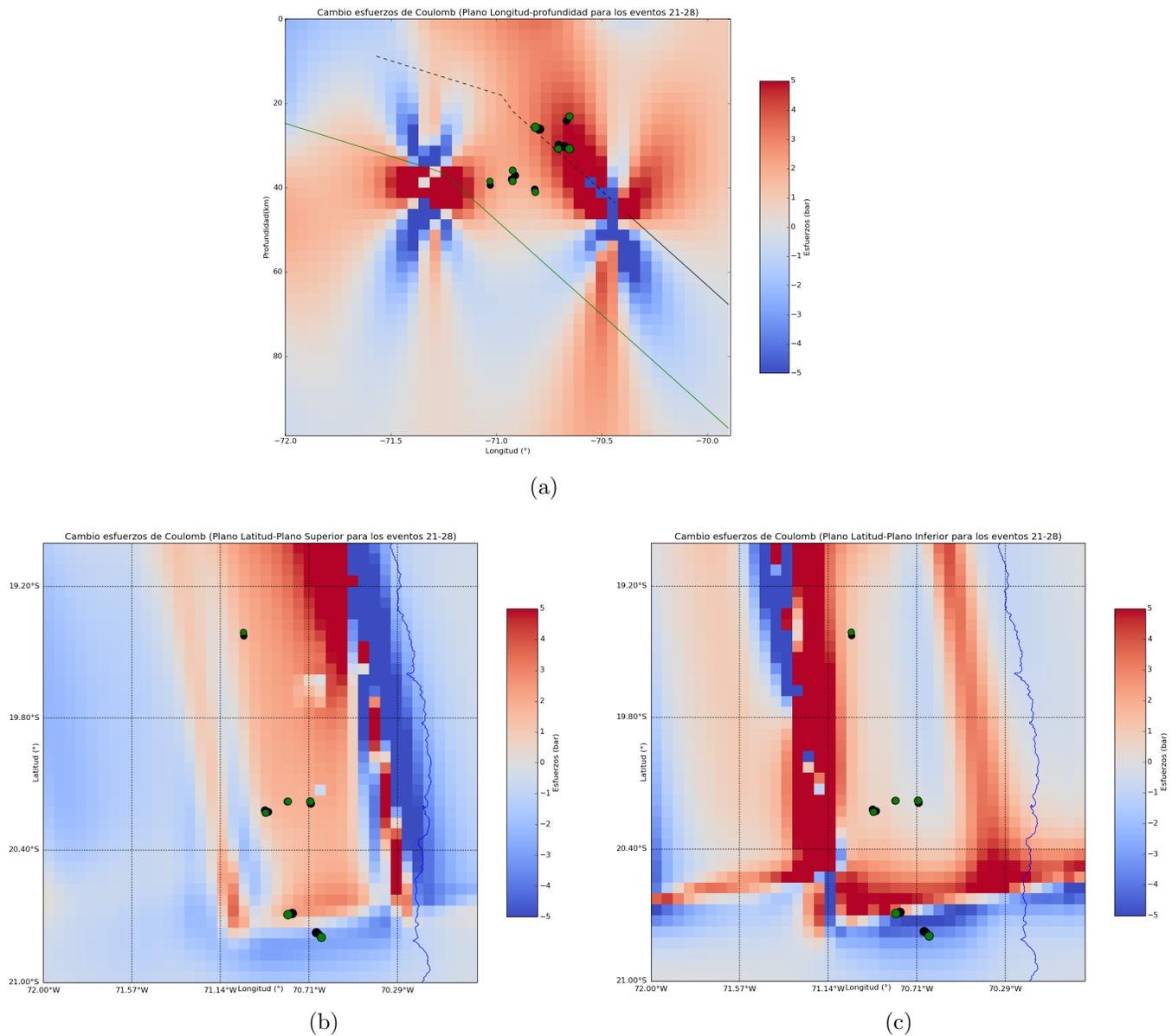


Figura 3.13: (a) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Longitud-Profundidad usando los eventos del 1 al 20 con sismicidad adjunta de los eventos 21 al 28, considerando un intersísmico de 108 años, (b) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase Superior usando los eventos del 1 al 20 con sismicidad adjunta de los eventos 21 al 28, considerando un intersísmico de 108 años, (c) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase Inferior usando los eventos del 1 al 20 con sismicidad adjunta de los eventos 21 al 28, considerando un intersísmico de 108 años

### 3.3.2. Esfuerzos de Coulomb debidos a la sismicidad considerando el intersísmico:

#### Análisis Observacional

Al considerar el intersísmico, se observa que, la mayoría de los eventos tienen lugar en sitios en los que  $CS_e > 0$  (véase la figura (3.13) para más detalles), lo cual contrasta con lo visto en el caso anterior (3.3.1), donde a simple vista podía verse, que estos eventos no ocurrirían en sitios donde  $CS_e > 0$ .

Puede notarse en la figura (3.13a), que los eventos ocurrirían en sitios donde, debido al acoplamiento, el esfuerzo aumentaría desde más de alguna dirección. Lo cual, puede apreciarse también en las figuras (3.13b) y (3.13c). Además, como se vio en el *Análisis Teórico* (3.3.1) del caso anterior, los eventos de esta ventana no causarían una gran alteración a los esfuerzos mostrados en el mapa, debido a su baja magnitud.

Puede verse en figura(3.13a), cómo los eventos ubicados en profundidades mayores, también serían ubicados en la Zona Favorable, habiendo todo un sector en que  $CS_e > 0$  entre las interfases que comprende desde los  $-70.4^\circ$  y los  $-71.5^\circ$  de Longitud.

Lo observado a partir de figura (3.13), nos dice a simple vista, que en esta ventana, el intersísmico también influye mucho en la ocurrencia de los eventos, aunque para comprobarlo debe hacerse el *Análisis Teórico*.

### Análisis Teórico

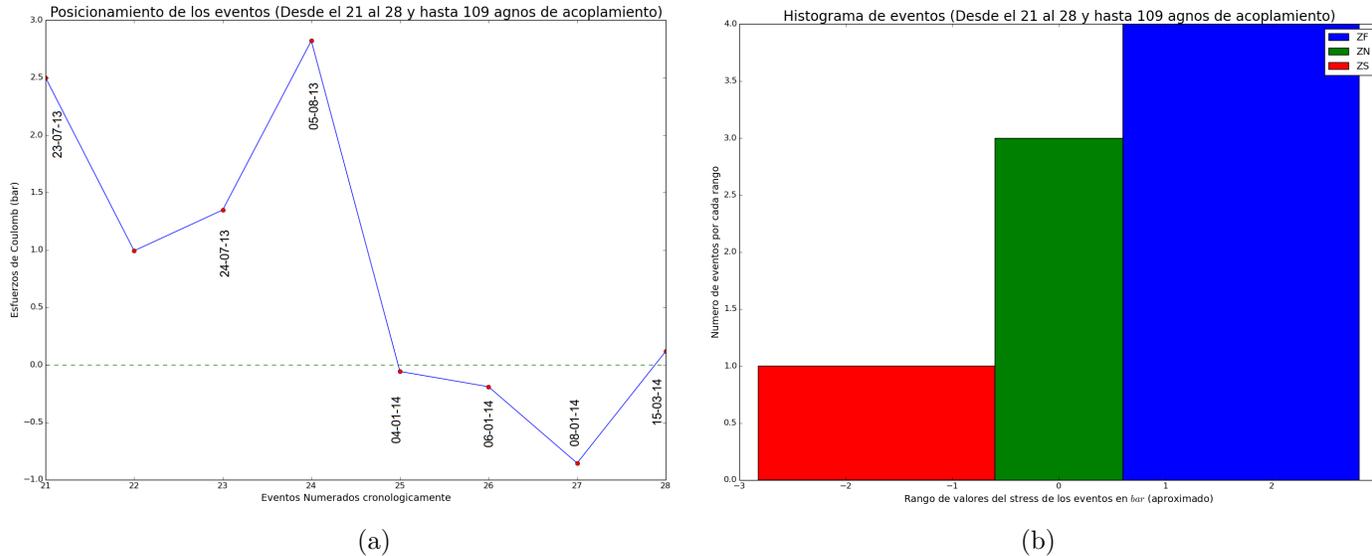


Figura 3.14: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en los hipocentros de los eventos 21 al 28 en el instante previo a su ocurrencia, considerando el intersísmico, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativos al considerar el intersísmico

La figura (3.14a) da a entender que los eventos en un principio serían promovidos por el  $CS_e$  aportado por el intersísmico. No obstante, este no es el caso de los últimos cuatro eventos, los cuales se ubicarían en la Zona Neutra y en la Zona de Sombra dependiendo del caso.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
25	04-01-14 00:11	-20.687	-70.795	26.1	5.7	-0,057
26	06-01-14 03:59	-20.781	-70.667	24.1	5.1	-0,190
27	08-01-14 04:22	-20.774	-70.678	30,2	5.6	-0,855

Cuadro 3.10: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 21 a 28.

Ev N°	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
21	23-07-13 17:27	-20.22	-70.927	38,0	5.1	2,501
22	23-07-13 21:12	-20.227	-70.911	37,1	5.0	0,993
23	24-07-13 13:29	-20.18	-70.818	40,4	5.0	1,349
24	05-08-13 05:40	-20.189	-70.705	29,8	5.2	2,821
28	15-03-14 20:14	-19.426	-71.029	39,4	4.7	0,118

Cuadro 3.11: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 21 a 28.

En los Cuadros (3.10) y (3.11), se ve que hay cuatro eventos en la Zona Favorable, ubicados todos alrededor de los  $-20.2^\circ$  de latitud y por sobre los 30 km de profundidad. De estos el evento con el  $CS_e$  más bajo es el evento 22, que en el caso anterior  $CS_e = -0,372$  bar, mientras que en este caso  $CS_e = 0,993$  bar, lo cual en principio significaría que la actividad sísmica habría retrasado la ocurrencia del evento pero  $|CS_e|$  no era lo bastante grande como para inhibirlo.

Los eventos ubicados tanto en la Zona de Sombra como en la Zona Neutra Negativa ocurren todos al sur del límite de la Zona de Alto acoplamiento considerada, por lo que no puede decirse realmente nada respecto a estos. Igualmente ocurre para el evento 28, que está en la Zona Neutra en cualquiera de los casos considerados.

### 3.3.3. Mecanismos Focales:

Podemos ver que, al igual que en la ventana anterior, es casi exclusivamente de mecanismos inverso. Con la sola excepción del evento número 28, el cual es más bien oblicuo pero predominantemente inverso.

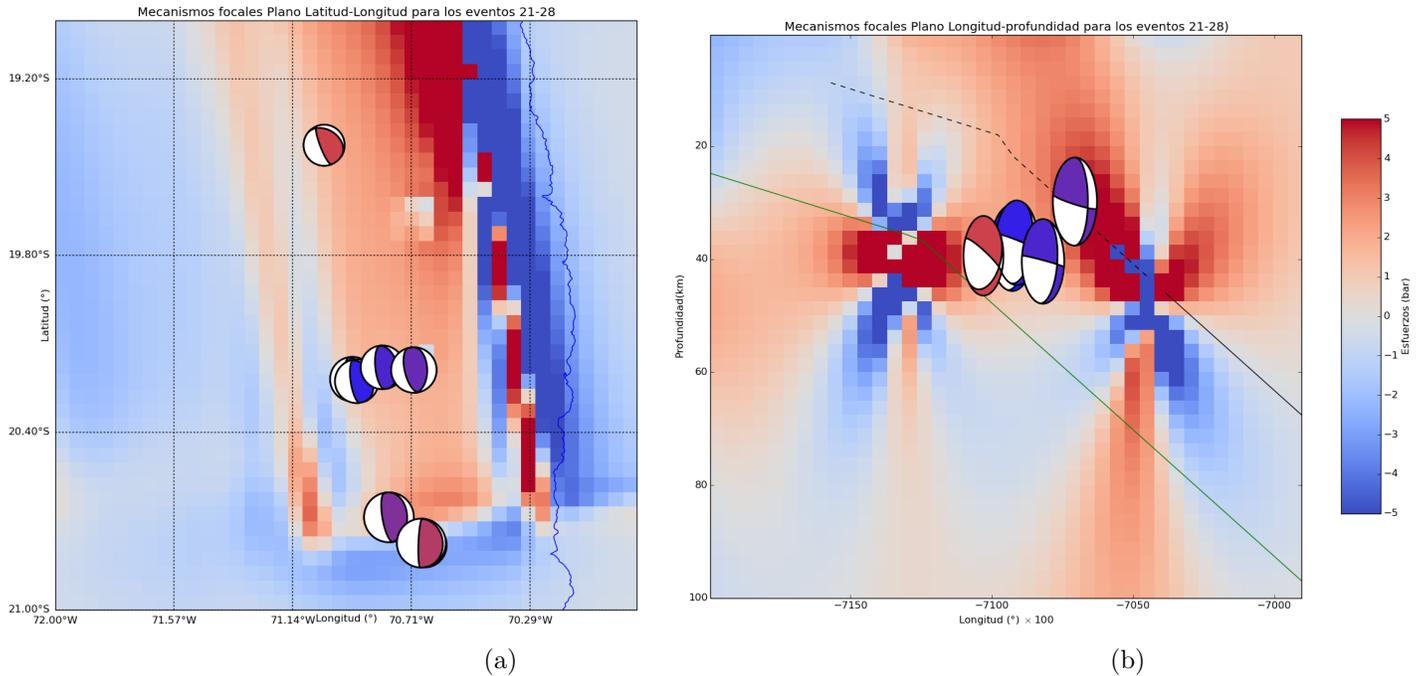


Figura 3.15: Mecanismos focales en el plano Latitud-Longitud (a) y en el plano Longitud-Profundidad (b) para la tercera ventana de eventos.

Puede verse también, un aumento en la profundidad de los eventos al compararlos con eventos localizados en latitud, longitud y mecanismos focales semejantes en ventanas anteriores.

### 3.3.4. Resumen

En esta ventana, al considerar sólo los eventos en el cálculo de  $CS_e$ , los eventos parecieron poco relacionados entre sí a pesar de su relativa cercanía. Esto causa, que al sólo considerar los eventos sísmicos, se den resultados que indicarían que los sismos ocurren como eventos aislados, sin relación aparente entre ellos. Sin embargo, al considerar el  $CS_e$  debido al intersísmico, se puede no es así, siendo este una posible causa de su ocurrencia, al aumentar el valor de  $CS_e$  en la zona.

Hasta el momento, esta consideración del intersísmico en el cálculo de  $CS_e$ , es lo que permite utilizar el MCEC para el periodo previo a un Mega Evento en un margen de subducción. Siendo este, el que facilitaría la ocurrencia de los eventos previos al enjambre precursor del evento principal, más que una interrelación entre sismos cercanos.

### 3.4. Cuarta Ventana de Eventos (del 29 al 38):

En esta ventana, si bien seguimos analizando los mismos casos vistos en las ventanas anteriores, agregamos un tercer caso. El cual es el Evento Lento observado luego del evento  $6.7 M_W$  ocurrido el 16 de Marzo del 2014, (primer evento de esta ventana).

#### 3.4.1. Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad:

##### Análisis Observacional

Se usará el mapa de esfuerzos de Coulomb correspondiente al momento posterior al evento  $6.7 M_W$ , 16 de Marzo del 2014, debido a que es necesario poder visualizar los cambios que este evento provoca en  $CS_e$  y así, determinar si es que los eventos posteriores pudieron haber sido causados por este.

Vemos en la figura(3.16), que el evento que ocurre el 16 de Marzo, cambia totalmente los esfuerzos de Coulomb en el área y es posible ver, como los eventos posteriores se suceden en sus cercanías.

En la figura (3.16c) puede verse que los eventos tienden a ocurrir a una mayor profundidad. A su vez, pareciese que algunos ocurren en la Zona de Sombra, mas esto no se puede asumir, dado que, como se verá en el *Análisis teórico*, hay tres eventos en esta ventana cuya magnitud supera los  $6.0 M_W$ , incluyendo el evento  $6.7 M_W$  del 16 de Marzo de 2014.

Una observación importante, es que tras el evento del 16 de Marzo ( $6.7 M_W$ ), la actividad se concentra en torno al hipocentro de este evento ( $-19.965^\circ$  de latitud), o ligeramente más al norte. Mientras que la actividad previa a este evento estaba ubicada más al sur, en torno a los  $-20.18^\circ$  de latitud, o más al Norte ( $-19.5^\circ$  de latitud). Por lo que el cambio en el  $CS_e$  debido al evento del 16 de Marzo ( $6.7 M_W$ ) probablemente sea considerable.

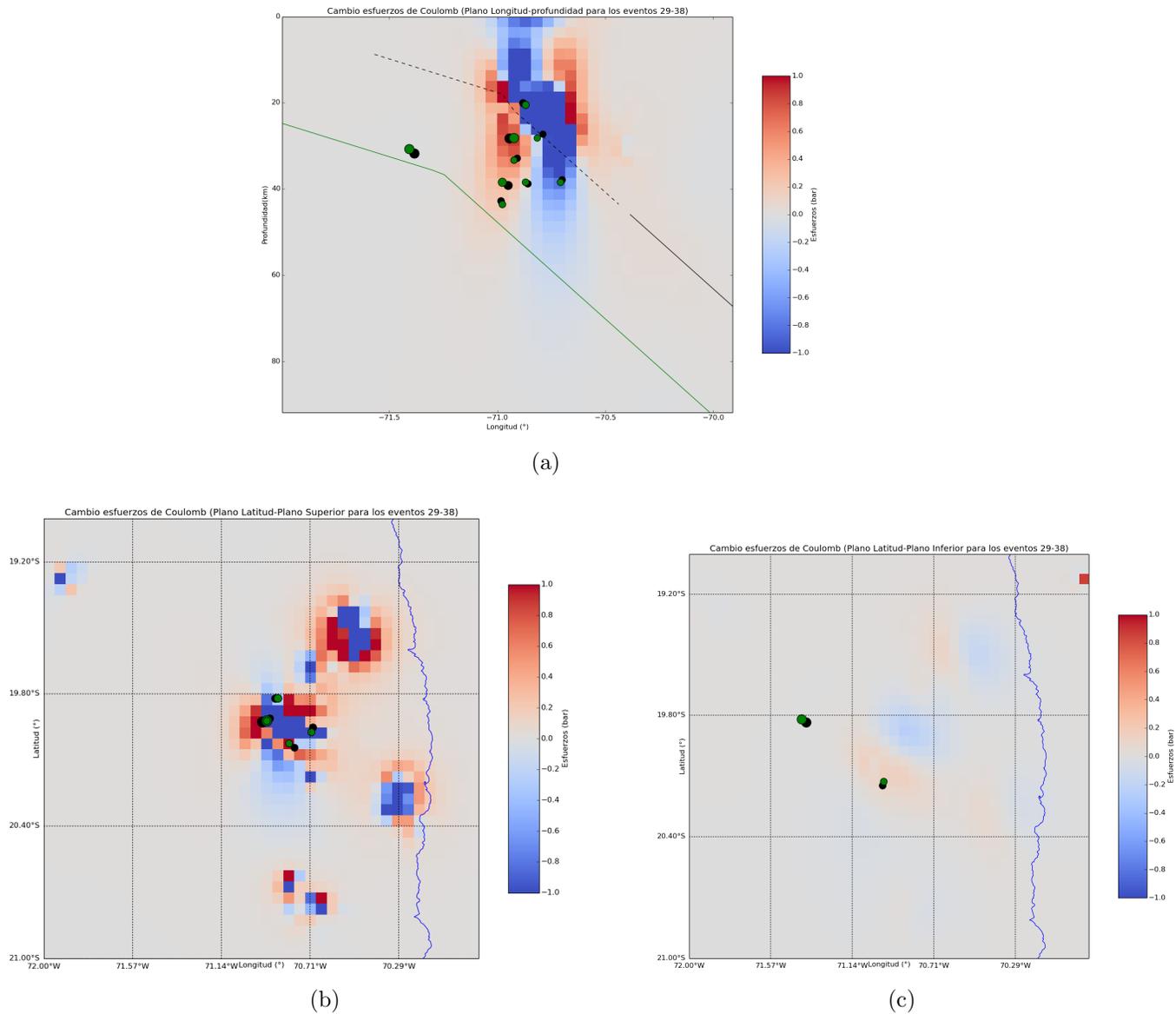


Figura 3.16: (a) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Longitud-Profundidad para los eventos del 1 al 29 con sismicidad adjunta de los eventos 30 al 38, (b) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase superior para los eventos del 1 al 29 con sismicidad adjunta de los eventos 30 al 38, (c) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase inferior para los eventos del 1 al 29 con sismicidad adjunta de los eventos 30 al 38

Un evento que llama la atención es el que ocurre en la zona más occidental del mapa, el que, de acuerdo a la figura (3.16c), este evento sería más cercano a la Interfase Inferior que a la Interface Superior, sin embargo esto será profundizado en el *Análisis Teórico*, debido a que visualmente no se puede llegar a ninguna conclusión que sea certera.

### Análisis Teórico

En la figura(3.17), se ve que la proporción de eventos positivos y negativos es de un 60 % y un 40 % respectivamente. Sin embargo, los eventos en la Zona de Sombra serían tres. Mientras que, sólo dos eventos serían considerados dentro de la Zona Favorable, estando el resto de los eventos en la Zona Neutra (mayormente en la Zona Neutra Positiva).

Debido a la mayor concentración de eventos cuyo  $CS_e > 0,1 \text{ bar}$  es posible empezar a preguntarnos si este primer evento sería la causa de los eventos posteriores en esta ventana, dado el fuerte cambio en la recurrencia de la sismicidad. Con lo que también nos preguntamos si estamos frente a una migración sísmica, o si el enjambre sísmico no corresponde a eventos relacionados entre sí.

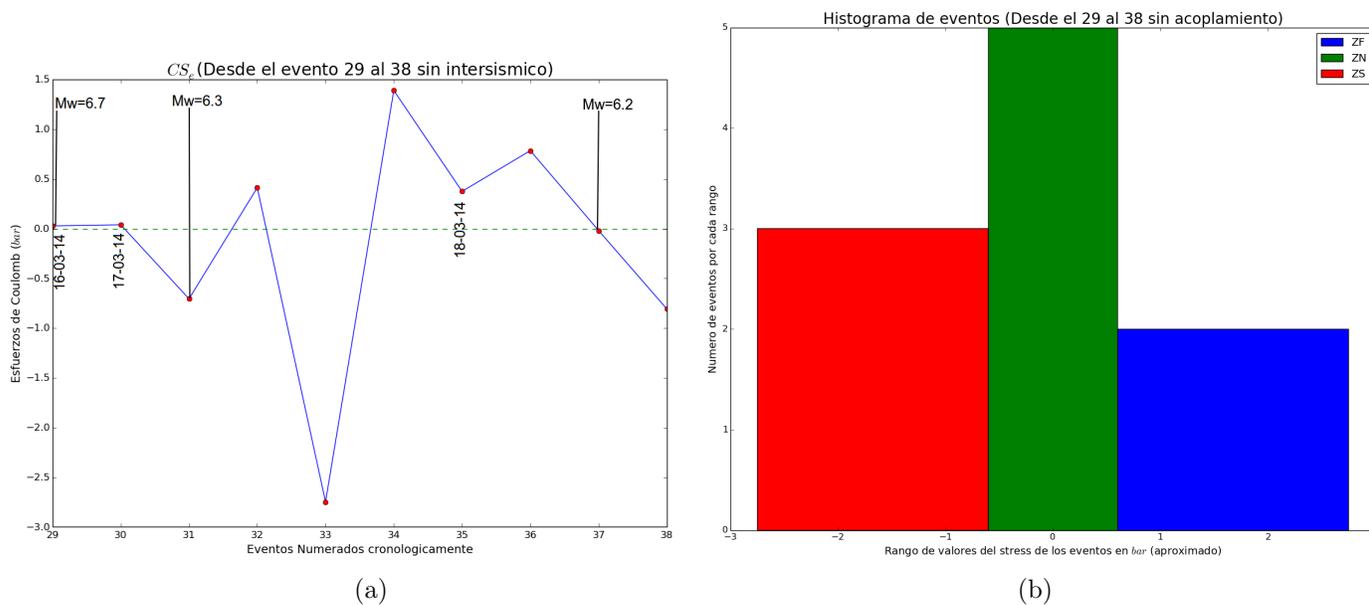


Figura 3.17: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en los hipocentros de los eventos 29 al 38 en el instante previo a su ocurrencia, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo

Debe notarse que el enjambre sísmico previo al evento principal da comienzo, esto significa que la separación temporal se reduce a un intervalo, desde pocas horas a pocos días, en vez del intervalo de días a meses, como en la ventana anterior, lo cual es mostrado por los Cuadros (3.12) y (3.13).

De los Cuadros (3.12) y (3.13), se tiene que a pesar de la gran concentración de eventos en la Zona Neutra hay dos de ellos cuyo  $CS_e > 0,1 \text{ bar}$ , por lo que si habría interacción entre estos eventos, aunque no tan directa como se esperaría considerando las magnitudes, recurrencia y la cercanía de los eventos.

Ev N°	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
31	17-03-14 05:11	-19.928	-70.944	28,3	6.3	-0,705
33	17-03-14 11:12	-19.912	-70.908	32,9	5.0	-2,747
37	22-03-14 12:59	-19.836	-71.384	31,8	6.2	-0,019
38	22-03-14 13:14	-19.821	-70.881	20,1	5.3	-0,807

Cuadro 3.12: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 29 a 38.

Ev N°	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
29	16-03-14 21:16	-19.965	-70.814	20,6	6.7	0,027
30	17-03-14 01:34	-19.978	-70.859	38,8	5.1	0,039
32	17-03-14 08:32	-19.953	-70.700	37,9	5.0	0,413
34	17-03-14 19:05	-20.045	-70.789	27,3	4.9	1,390
35	18-03-14 14:35	-20.148	-70.983	42,8	5.1	0,375
36	18-03-14 21:26	-19.957	-70.950	39,2	5.8	0,785

Cuadro 3.13: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 29 a 38.

Se ve también en los Cuadros (3.12) y (3.13) que el  $|CS_e|$  de los eventos, cuyos hipocentros están en sitios de  $CS_e > 0$ , es menor al de los eventos de hipocentros donde  $CS_e < 0$ , lo cual, no concuerda con la afirmación de que este enjambre corresponde a una migración sísmica. Sin embargo, el número de eventos ubicados en sitios donde  $CS_e > 0$  es mayor, además al considerar que hay dos eventos en la Zona Neutra con  $CS_e > 0,1$ , puede significar que ese pequeño aumento en los esfuerzos haya sido suficiente para promover algún evento si previamente el valor de  $CS_e$  es alto, lo cual no se puede saber hasta no considerar dentro del cálculo de  $CS_e$  el intersísmico y el Evento Lento.

### 3.4.2. Esfuerzos de Coulomb debidos a la sismicidad considerando el intersísmico:

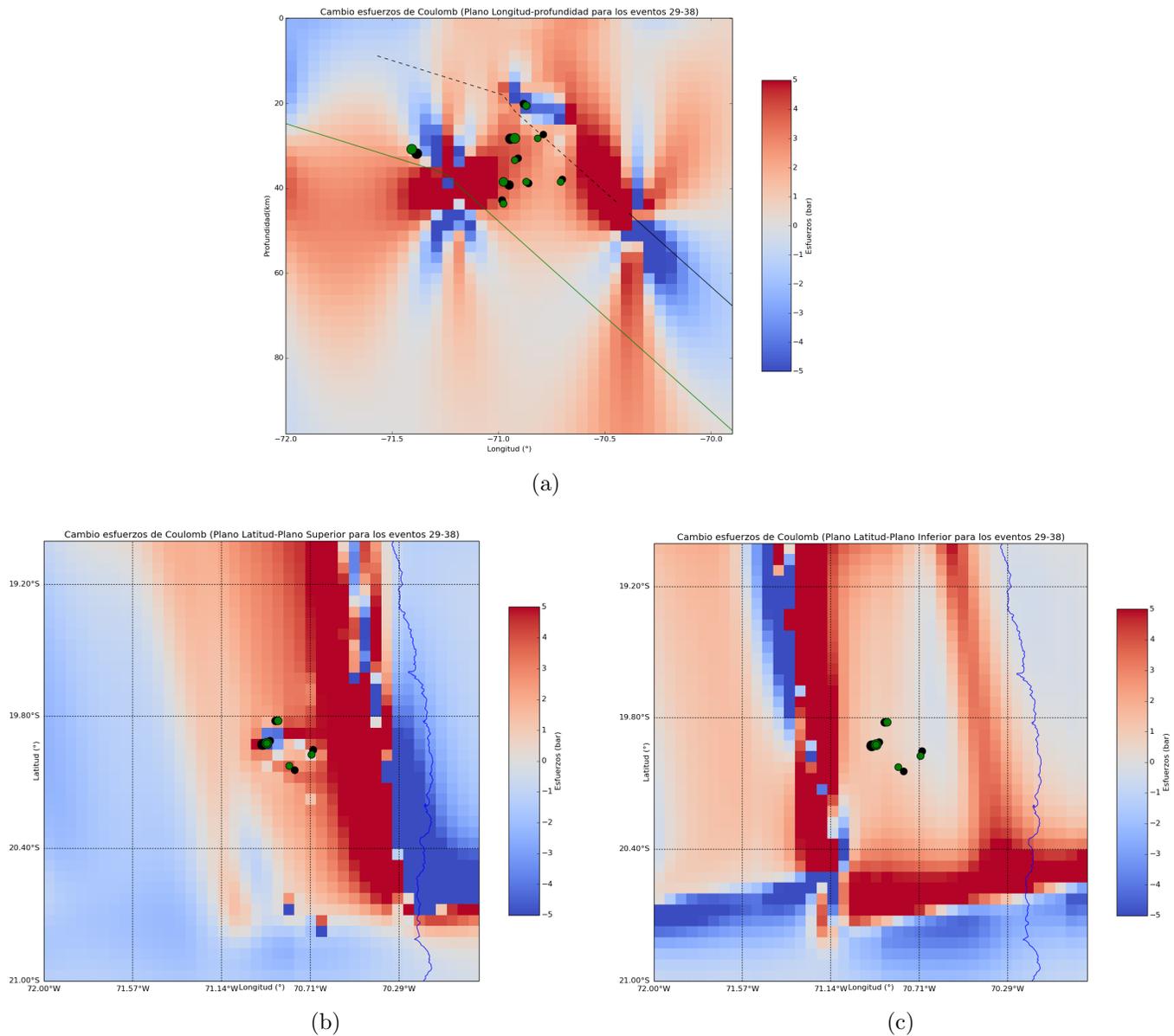


Figura 3.18: (a) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Longitud-Profundidad para los eventos del 1 al 29 con sismicidad adjunta de los eventos 30 al 38, considerando un intersísmico de 109 años, (b) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase superior para los eventos del 1 al 29 con sismicidad adjunta de los eventos 30 al 38, considerando un intersísmico de 109 años, (c) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase inferior para los eventos del 1 al 29 con sismicidad adjunta de los eventos 30 al 38, considerando un intersísmico de 109 años

### Análisis Observacional

Puede verse en la figura (3.18), que al ocurrir el evento del 16 de Marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ), la zona aledaña se encuentra con altos niveles de  $CS_e$ , se observa en la figura (3.18a) que si bien los eventos ocurren a una mayor profundidad que el margen de las placas, la Interfase Inferior sería la que aumentaría el esfuerzo en estos sitios (para sismos de falla inversa) y haría que muchos eventos ocurran en una zona donde  $CS_e > 1$ . Sin embargo, debido a la magnitud de varios de los eventos, no se puede sacar conclusiones con el *Análisis Visual*.

### Análisis Teórico

En la figura (3.19), se observa que el 90% de los eventos se originan en zonas de  $CS_e > 0$ . De los cuales, ocho se ubica en la Zona Favorable, hay dos eventos en la Zona Neutra y no hay eventos en la Zona de Sombra.

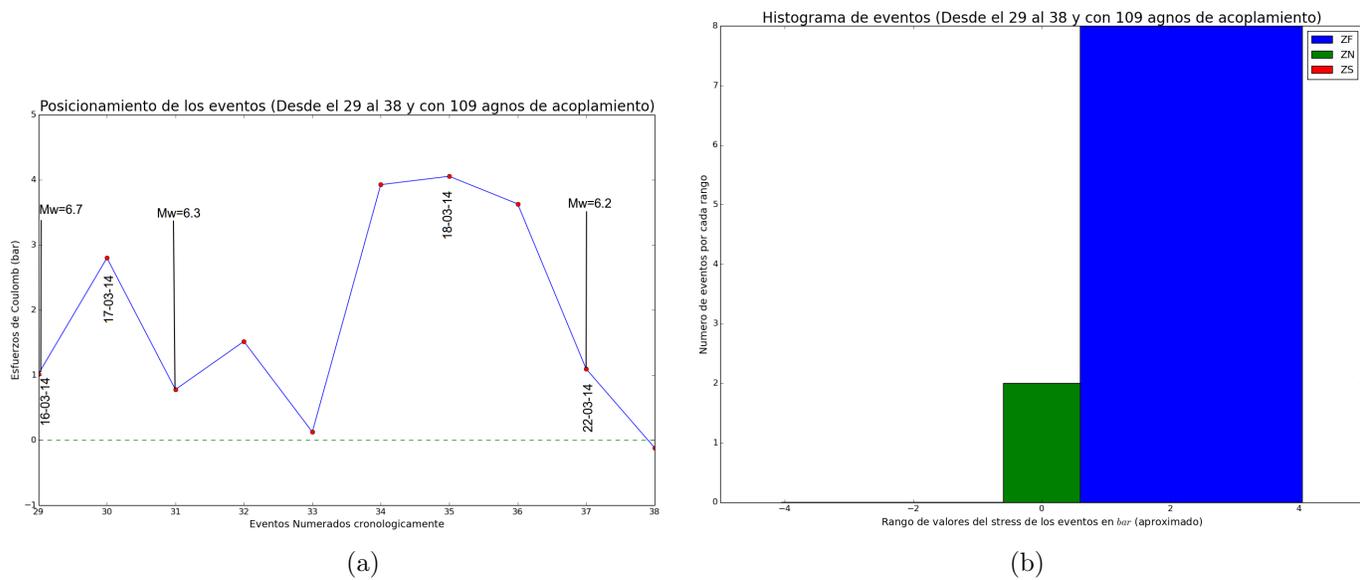


Figura 3.19: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en los hipocentro de los eventos 29 al 38 en el instante previo a su ocurrencia, considerando el intersísmico, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo al considerar el intersísmico

Puede verse a partir de los Cuadros (3.14) y (3.15), que los eventos que estaban en la Zona Favorable en el caso anterior (3.4.1) aumentan bastante su valor de  $CS_e$ . Mientras que, los eventos que se ubicaban en la Zona Neutra (en el caso anteriormente mencionado) (3.4.1) en su mayoría mostraron un aumento en el valor de  $CS_e$  hipocentral, al considerar el  $CS$  producido por el intersísmico.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
38	22-03-14 13:14	-19.821	-70.881	20,1	5.3	-0,120

Cuadro 3.14: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 29 a 38.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
29	16-03-14 21:16	-19.965	-70.814	20,6	6.7	1,016
30	17-03-14 01:34	-19.978	-70.859	38,8	5.1	2,796
31	17-03-14 05:11	-19.928	-70.944	28,3	6.3	0,774
32	17-03-14 08:32	-19.953	-70.700	37,9	5.0	1,514
33	17-03-14 11:12	-19.912	-70.908	32,9	5.0	0,122
34	17-03-14 19:05	-20.045	-70.789	27,3	4.9	3,922
35	18-03-14 14:35	-20.148	-70.983	42,8	5.1	4,050
36	18-03-14 21:26	-19.957	-70.950	39,2	5.8	3,626
37	22-03-14 12:59	-19.836	-71.384	31,8	6.2	1,092

Cuadro 3.15: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 29 a 38 considerando el acoplamiento.

Mientras que hay eventos como el 33, que en el caso anterior, su  $CS_e$  hipocentral tuvo un valor de  $-2,747$  bar, en este caso el  $CS_e$  alcanza los  $0,122$  bar. El cual, si bien, es un valor que lo deja en la Zona Neutra, deja de estar en la Zona de Sombra, por lo que se podría significar que si bien el intersísmico aumenta el  $CS_e$ , este no es lo suficiente como para decir que promovió el evento.

En el caso del evento 31, si bien ahora queda en la Zona favorable, no debe ignorarse que en el caso anterior se encontraba en la Zona de Sombra. Por lo que aunque el intersísmico haya aumentado mucho los esfuerzos en la, es extraño que ocurra un evento así si es que el esfuerzo se reduce mucho debido a la sismicidad anterior.

Otro caso similar es el del evento número 32, el cual, en el caso anterior (3.4.1) tuvo un valor de  $CS_e$  de  $0,413$  bar. Mientras que, al considerar el intersísmico, el valor del  $CS_e$  hipocentral para este evento, es de  $1,514$  bar. Lo que significa que si bien debido al intersísmico la zona se encontraba bajo mucho esfuerzo la sismicidad aportó el esfuerzo necesario para que se rompiera.

En el caso del evento 37 el valor de  $CS_e$  en el caso anterior era de  $-0,019 \text{ bar}$ , el cual es demasiado pequeño para considerarse como un valor realmente influyente, por lo que al considerar el intersísmico en el cálculo de  $CS_e$  su valor sea de  $1,092 \text{ bar}$  no es extraño.

### 3.4.3. Esfuerzos de Coulomb debidos a la sismicidad considerando el intersísmico y el “Terremoto Lento”:

En este caso, al considerar el Evento Lento previo al evento principal, se esperan cambios en algunos valores de  $CS_e$ . Los que deberían ser muy ligeros al principio y conforme avance el tiempo, deberían volverse más significativos.

En este caso, debido a que luego del primer evento, el movimiento lento no alcanza a afectar el valor de  $CS_e$  no habrá *Análisis Observacional*, dado que coincidirá con el del caso recientemente estudiado.

#### Análisis Teórico

Puede verse en la figura(3.20), que todos los hipocentros de los eventos tenían un valor de  $CS_e$  positivo antes de la ocurrencia de estos.

En el Cuadro (3.16), se ve que al principio de la ventana  $CS_e$  no sufre grandes cambios. Aunque, conforme pasa el tiempo, los valores de  $CS_e$  comienzan a diferir de los que se tenían en el *Análisis Teórico* del caso anterior (3.4.2).

El efecto más notorio que se tiene, es que  $CS_e$  disminuye en una pequeña cantidad para la mitad de los hipocentros de los eventos. Sin embargo, para algunos eventos, como lo son el 34 y el 38, se da el caso contrario, dado que, el valor de  $CS_e$  previo en sus hipocentros aumenta de  $3,922 \text{ bar}$  a  $3,938 \text{ bar}$  para el evento 34 y de  $-0,120 \text{ bar}$  a  $0,006 \text{ bar}$  para el evento 38.

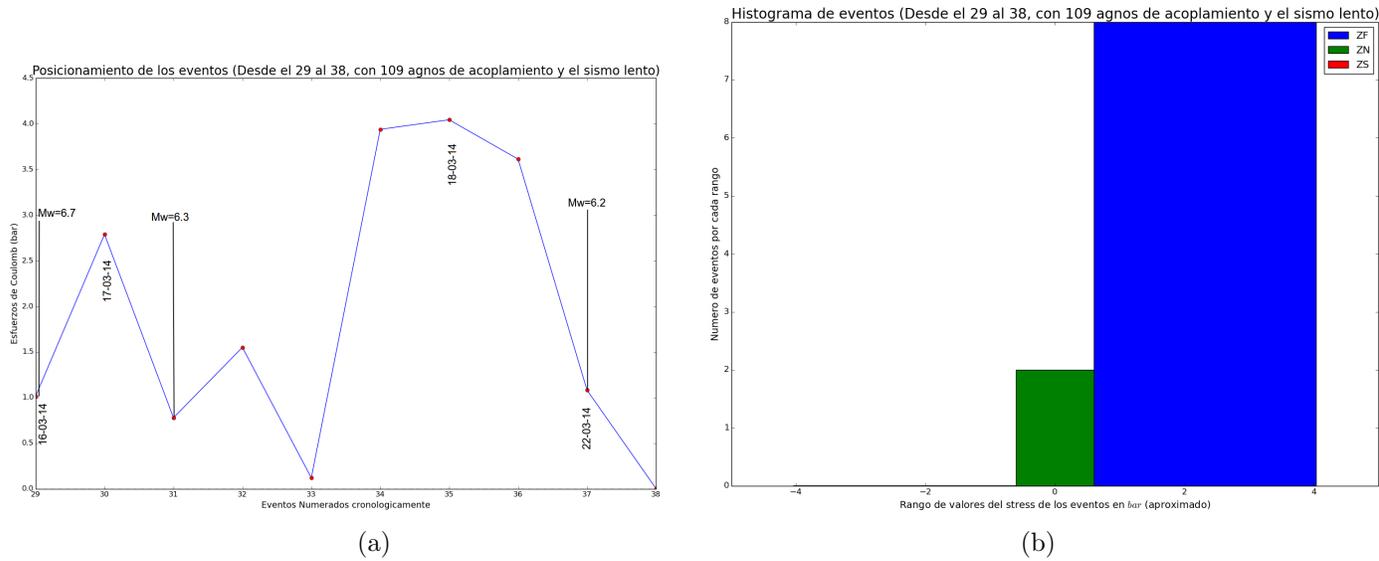


Figura 3.20: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en el hipocentro de los eventos 29 al 38 en el instante previo a su ocurrencia, considerando el intersísmico y el Evento Lento, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo al considerar el intersísmico y el Evento Lento

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
29	16-03-14 21:16	-19.965	-70.814	20,6	6.7	1,016
30	17-03-14 01:34	-19.978	-70.859	38,8	5.1	2,780
31	17-03-14 05:11	-19.928	-70.944	28,3	6.3	0,768
32	17-03-14 08:32	-19.953	-70.700	37,9	5.0	1,507
33	17-03-14 11:12	-19.912	-70.908	32,9	5.0	0,108
34	17-03-14 19:05	-20.045	-70.789	27,3	4.9	3,938
35	18-03-14 14:35	-20.148	-70.983	42,8	5.1	4,040
36	18-03-14 21:26	-19.957	-70.950	39,2	5.8	3,605
37	22-03-14 12:59	-19.836	-71.384	31,8	6.2	1,077
38	22-03-14 13:14	-19.821	-70.881	20,1	5.3	0,006

Cuadro 3.16: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 29 a 38 considerando el acoplamiento y el “Terremoto Lento”.

Es así que, al observar el Cuadro (3.16), vemos que en el 100% de los eventos los hipocentros tenía un  $CS_e > 0$ , con ocho eventos en la Zona Favorable y dos en la Zona Neutra Positiva. Notándose también, que no hay grandes cambios respecto al caso anterior. Esto se debe principalmente, a que al ser esta la primera ventana

influenciada por el Evento Lento, su influencia sobre  $CS_e$  será pequeña, en especial, al inicio de la ventana.

El caso del evento número 31, el cual quedó en la Zona Favorable en el caso anterior, vuelve a ser difícil de analizar, puesto que el Evento Lento habría disminuido el valor de  $CS_e$  en vez de aumentarlo, por lo que este evento un caso atípico, cuya única explicación lógica posible sería que previo al evento del 16 de Marzo ( $6.7 M_W$ ), la zona estaría próxima a romper, no obstante al ocurrir primero el precursor mayor, habría retrasado la ruptura de esa sección. No obstante también puede tratarse de algún error de aproximación de las fallas involucradas.

### 3.4.4. Mecanismos Focales:

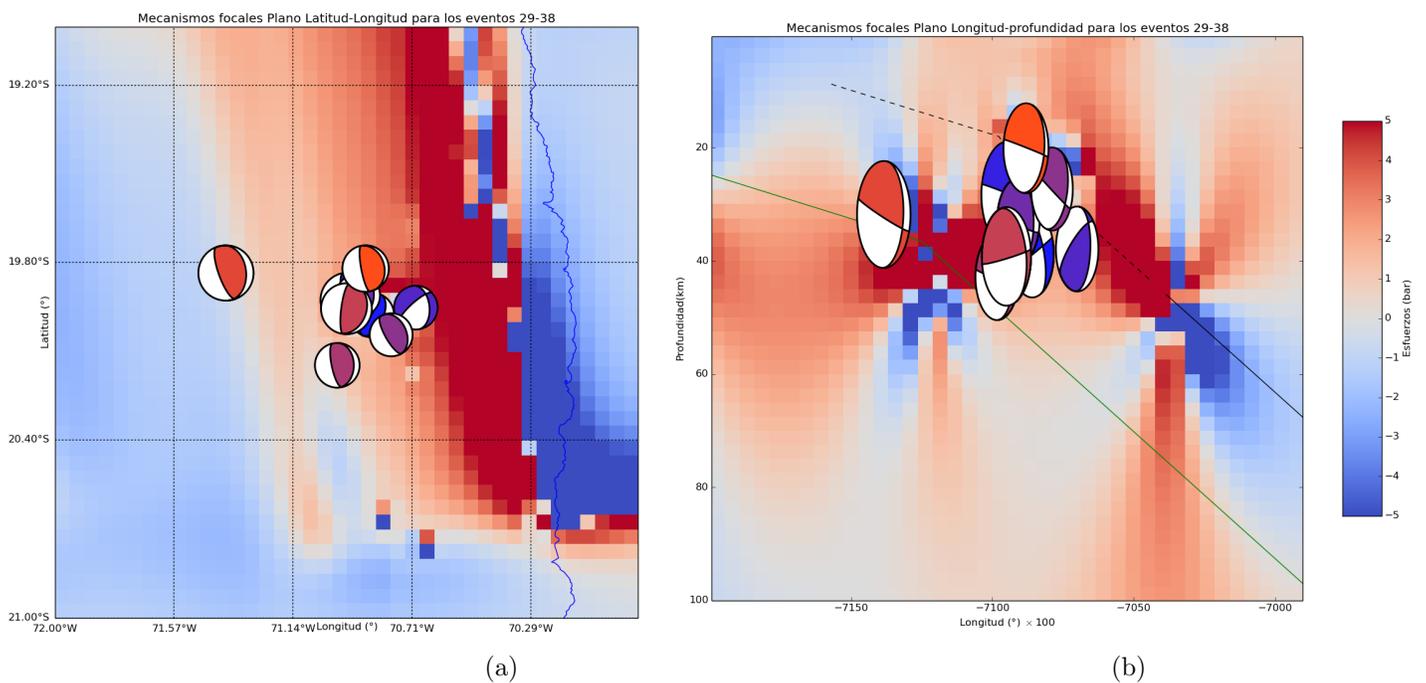


Figura 3.21: Mecanismos focales en el plano Latitud-Longitud (a) y en el plano Longitud-Profundidad (b) para la cuarta ventana de eventos.

Durante esta ventana, la actividad en promedio es de mecanismos inversos, aunque el ángulo de strike varía entre los eventos, diferenciándose de los casos anteriores, donde sus variaciones eran más pequeñas.

Los eventos ocurren con muy poca distancia entre sí, lo que, sumado a la escasa diferencia temporal entre estos, delatan la existencia de un enjambre sísmico. Sin embargo, la diferencia entre los ángulos de strike es un punto a considerar, ya que puede deberse también a la activación de fallas locales.

Existe un evento, cuyo mecanismo focal es de falla transformante normal. Se encuentra a poca profundidad y el hecho de que su hipocentro sea muy cercano al punto donde comienza el acoplamiento (en dirección Este a Oeste), daría a entender que se trate de una falla local.

### 3.4.5. Resumen

Durante esta ventana, se comienza con el enjambre sísmico previo al evento principal. Lo cual, causa cambios en la sismicidad que pueden notarse al ver los tres casos.

Si bien, son muy pocos los eventos que son directamente promovidos por la sismicidad previa, no deja de ser importante el que estos existen. Aunque, puede verse también que el resto de los sismos, son en su mayoría adelantados por la actividad previa (puesto que se encuentran en la Zona Neutra Positiva o su valor de  $CS_e \approx 0$ ) si es que se considera el intersísmico en el cálculo de  $CS_e$ . Puesto que este sería el que aporte la mayor cantidad de esfuerzos y los eventos aportan lo que falta para la ruptura.

Si bien, la inclusión del Evento Lento en el cálculo de  $CS_e$ , mejoró algo los resultados, no los modificó en gran medida. Dado que sólo han pasado a lo más seis días desde el inicio del Evento Lento, por lo que durante toda la primera parte de la ventana, su influencia es escasa. Aunque, este influye más en  $CS_e$  después del evento 37 (ocurrido cuatro días después del último evento previo). Por tanto la Influencia del Evento Lento sobre  $CS_e$ , debería aumentar más durante la próxima ventana.

Finalmente, al considerar los procesos asísmicos, se tiene que hasta ahora, el proceso que tiene lugar correspondería a una migración de la actividad sísmica, puesto que, al observar que la actividad sísmica ocurre mayoritariamente en sitios donde  $CS_e > 0$  y que también, esta se va desplazando hacia el Noroeste, lo cual se irá comprobando en las próximas ventanas.

### 3.5. Quinta Ventana de Eventos (del 39 al 48):

#### 3.5.1. Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad:

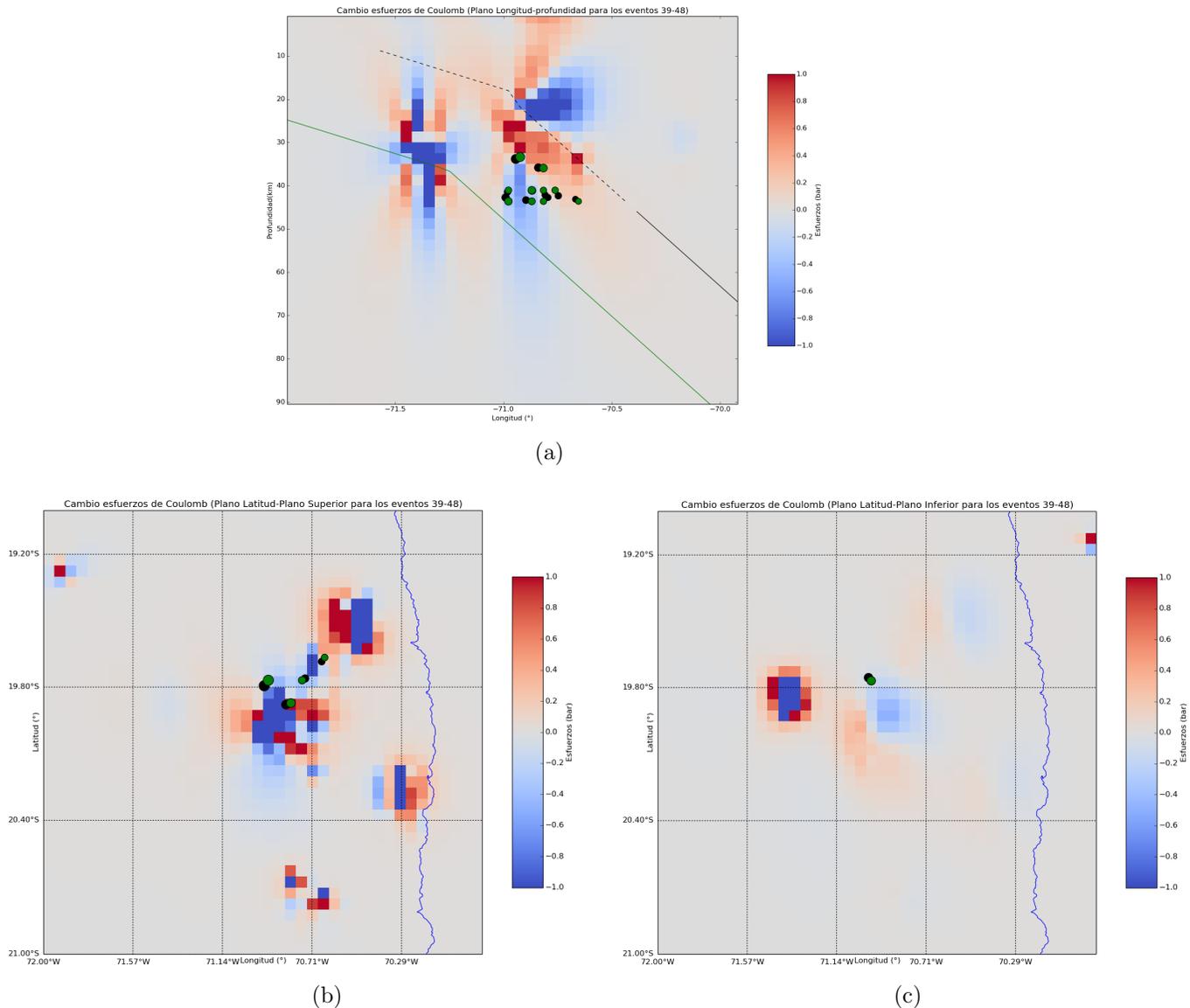


Figura 3.22: (a) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Longitud-Profundidad para los eventos del 1 al 38 con sismicidad adjunta de los eventos 39 al 48, (b) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase superior para los eventos del 1 al 38 con sismicidad adjunta de los eventos 39 al 48, (c) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase inferior para los eventos del 1 al 38 con sismicidad adjunta de los eventos 39 al 48

## Análisis Observacional

En la figura (3.22) se ve que los sismos tienden a ocurrir cada vez más al norte, estando los hipocentros entre los  $-19.5^\circ$  y los  $-19.7^\circ$  de latitud. Acercándose, de esta forma, a la latitud en la que tendrá lugar el evento principal.

Al ver las figuras (3.22b) y (3.22c) tenemos que, al parecer, los eventos ocurrieron mayoritariamente en hipocentros con  $CS_e > 0$ . Sin embargo, la figura (3.22a) pone en duda esta afirmación, pues de acuerdo a esta muchos eventos ocurren en sitios donde  $CS_e < 0$ .

## Análisis Teórico

Se ve en la figura (3.23), que sólo en el 40% de los eventos,  $CS_e > 0$  en sus hipocentros, no estando ninguno de ellos en la Zona Favorable, siendo  $0,497 \text{ bar}$  el máximo valor de  $CS_e$ . Mientras que, hay tres eventos que se encuentran en la Zona de Sombra y el resto se ubica en la Zona Neutra (mayormente en la Zona Neutra Negativa).

Los Cuadros (3.17) y (3.18) muestran una disminución en la magnitud de los eventos respecto de la ventana anterior, siendo también notorio que los eventos se concentran ahora en un rango espacial pequeño, tiendiendo a ocurrir cada vez más hacia el Norte.

En el cuadro (3.17) observamos tres eventos (el 43, 45 y el 47), cuyo  $CS_e$  hipocentral, no solo es negativo, sino que  $CS_e < -0,6 \text{ bar}$ , y por tanto se encuentran en la Zona de Sombra. Estos eventos, tienen en común, además de su cercanía espacial (en el caso de los eventos 45 y 47), el hecho de que ocurren después del evento del 22 de Marzo del 2014 ( $6.3 M_W$ ). Esto es importante, debido a que este ocurre cuatro días luego del último evento mayor a  $4.7 M_W$  en el catálogo ( Véase la *Cuarta Ventana* (3.4)).

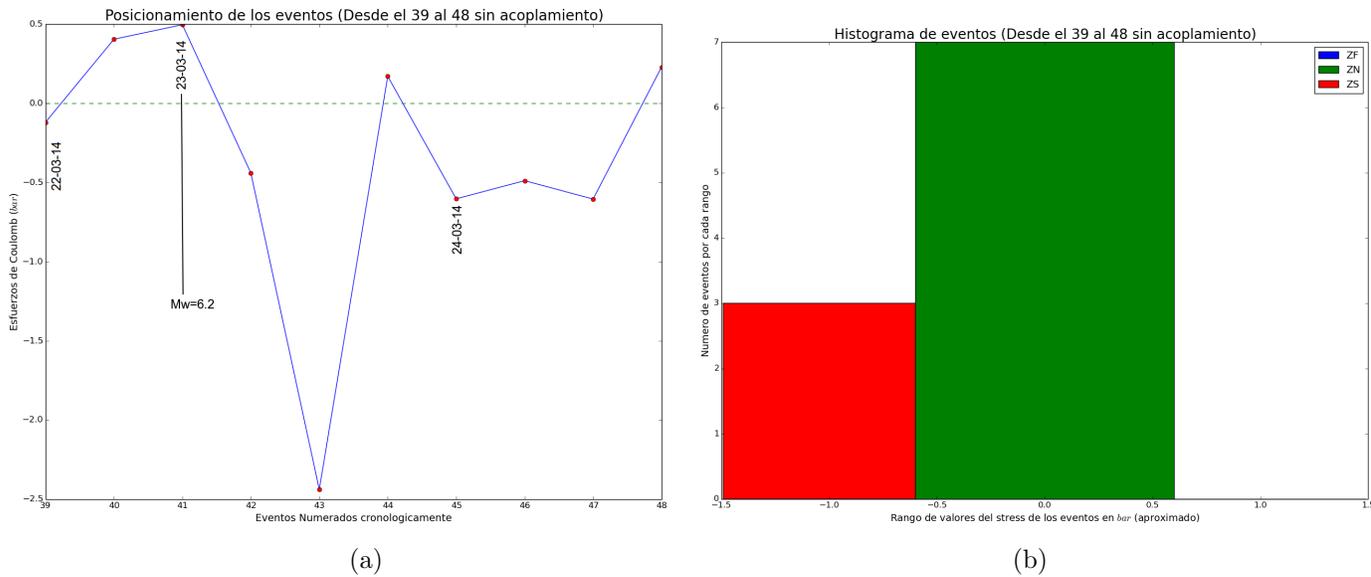


Figura 3.23: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en los hipocentros de los eventos 39 al 48 en el instante previo a su ocurrencia, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
39	22-03-14 13:29	-19.755	-70.990	42,7	5.6	-0,119
42	23-03-14 20:23	-19.844	-70.896	43,3	5.3	-0,439
43	23-03-14 21:17	-19.685	-70.668	43,1	4.8	-2,438
45	24-03-14 11:26	-19.879	-70.839	35,8	5.7	-0,603
46	24-03-14 11:32	-19.796	-70.808	42,1	5.0	-0,117
47	24-03-14 11:40	-19.822	-70.868	41,1	5.6	-0,604

Cuadro 3.17: Sismos cuyo Stress de Coulomb es ntivo ubicados en la ventana de eventos 39 a 48.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
40	22-03-14 22:14	-19.694	-70.981	41,4	5.1	0,315
41	23-03-14 18:19	-19.794	-70.943	33,8	6.2	0,497
44	23-03-14 22:04	-19.761	-70.747	42,3	5.1	0,171
48	24-03-14 12:32	-19.782	-70.795	42,7	5.0	0,243

Cuadro 3.18: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 39 a 48.

El hecho de que no existan eventos en la Zona Favorable, puede deberse nuevamente al efecto de los Deslizamientos Asísmicos sobre  $CS_e$ , es decir, el intersísmico y el “Terremoto Lento”. En el caso del Evento Lento hay que tener en cuenta que en esta ventana han pasado más de seis días desde el evento del 16 de Marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ), lo que significa que el Evento Lento ha alterado aún más el  $CS_e$  a su alrededor, y puede ser una de las causas por las que en esta ventana, hayan tantos eventos en la Zona de Sombra y ninguno en la Zona Favorable.

La principal razón para sospechar que el Evento Lento tiene una influencia de consideración en esta ventana, se debe a que conforme avanza el tiempo, más eventos son localizados en sitios de  $CS_e < 0$ , lo cual puede verse en la figura (3.23a).

Sin embargo, la influencia del intersísmico también parece ser muy importante, dado que algunos eventos (especialmente los primeros), tuvieron hipocentros cercanos entre sí, ubicados donde  $CS_e > 0$ , aunque dado que su valor es inferior a  $0,6 \text{ bar}$ , nuevamente podríamos tener una influencia indirecta de un evento sobre otro.

### 3.5.2. Esfuerzos de Coulomb debidos a la sismicidad considerando el intersísmico:

#### Análisis Observacional

Al considerar el intersísmico en el cálculo de  $CS_e$  y obtener la figura (3.24), notamos un cambio muy notorio respecto al caso anterior (3.5.1).

En la figura (3.24b), si tienen algunos eventos ubicados en el límite entre la Zona Favorable y la Zona de Sombra. Mas no es el caso, ya que en la figura (3.24a), se ve que realmente, los eventos ocurrieron a una mayor profundidad que la utilizada en la figura (3.24b). A esta mayor profundidad  $CS_e > 0$ , pero no puede clasificarse como parte de la Zona Neutra o la Zona Favorable, debido a que de acuerdo al mapa de colores, en esa zona los valores de  $CS_e$  son difíciles de clasificar.

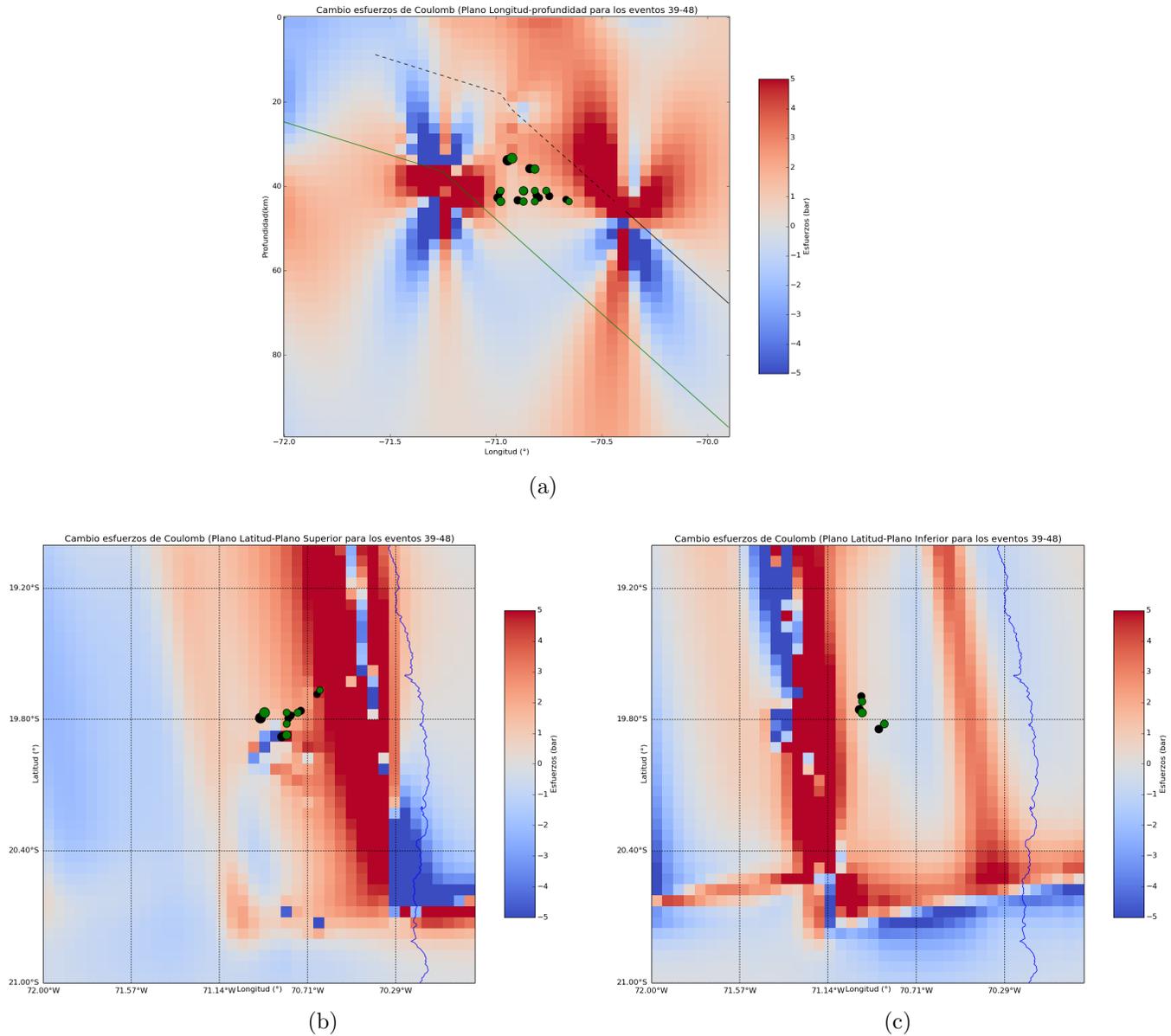


Figura 3.24: (a) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Longitud-Profundidad para los eventos del 1 al 38 con sismicidad adjunta de los eventos 39 al 48, considerando un intersísmico de 109 años, (b) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase superior para los eventos del 1 al 38 con sismicidad adjunta de los eventos 39 al 48, considerando un intersísmico de 109 años, (c) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase inferior para los eventos del 1 al 38 con sismicidad adjunta de los eventos 39 al 48, considerando un intersísmico de 109 años

Puede notarse que al igual que en la cuarta ventana la Interfase Inferior sería la que más aumentaría el valor de  $CS_e$  en la zona donde ocurren los eventos.

### Análisis Teórico

Se ve en la figura (3.25) que hay un 80 % de eventos ubicados en sitios donde previamente  $CS_e > 0$  mientras el 20 % restante se localizan en sitios donde  $CS_e$  es negativo.

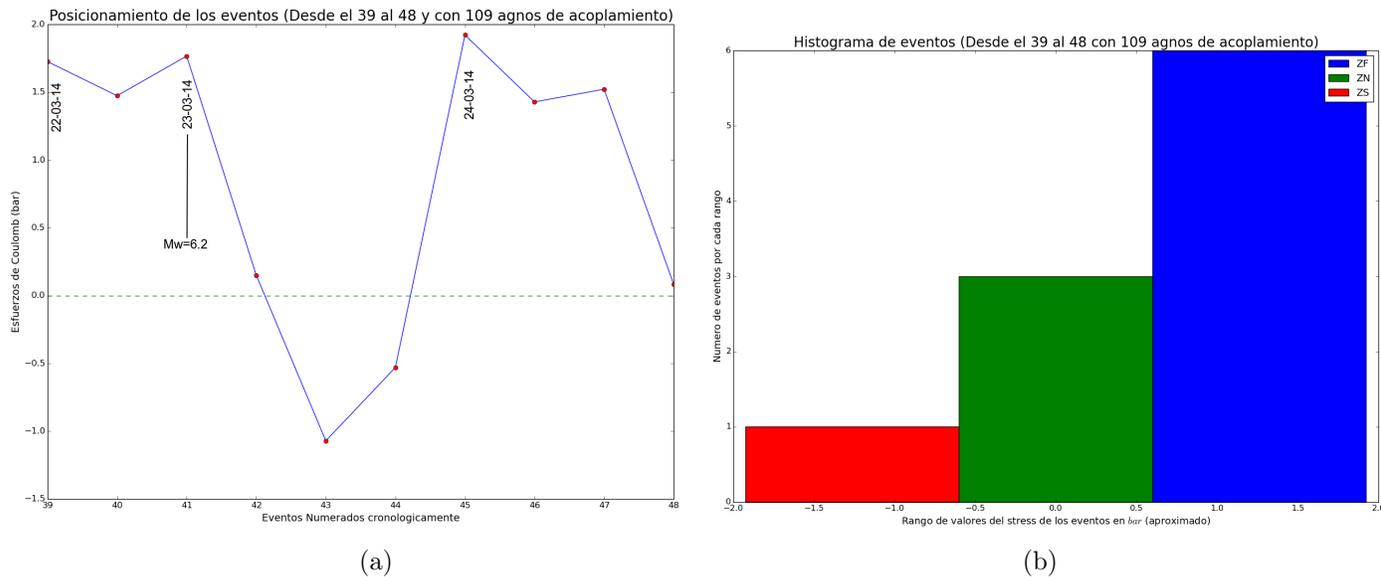


Figura 3.25: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en los hipocentros de los eventos 39 al 48 en el instante previo a su ocurrencia, considerando el intersísmico, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo al considerar el intersísmico

En los Cuadros (3.19) y (3.20) se ve que, de los eventos cuyos hipocentros presentan valores de  $CS_e > 0$ , muchos se encuentran en la Zona Favorable, sólo uno se ocurre en la Zona de Sombra, siendo el otro ubicado en la Zona Neutra (pues  $CS_e = -0,529 \text{ bar}$  en el hipocentro del evento número 44, notar que este evento tenía un valor de  $CS_e = 0,171 \text{ bar}$  en el caso anterior).

De los Cuadros(3.19) y (3.20), se puede ver que, al considerar la influencia del Intersísmico en el cálculo de  $CS_e$ , los valores de este para los eventos posteriores son mucho más cercanos a lo teóricamente esperado. Habiendo muchos eventos ubicados en la Zona Favorable y sólo un evento en la Zona de Sombra. Lo cual, nos dice, que aún en esta ventana los esfuerzos debidos al intersísmico son muy importantes, siendo notorio que los eventos parecen relacionarse entre sí. Aunque esta relación es relativamente indirecta.

Aunque el  $CS_e$  debido al intersísmico hace que los resultados muestren que hubo una migración sísmica, hay razones para sospechar que el Evento Lento influye bastante en la sismicidad. Entre las que están.

- La existencia de un evento en la Zona de Sombra aún al considerar el intersísmico en el cálculo de  $CS_e$ , lo cual no debería de suceder lejos de los extremos de la falla.
- Aunque al inicio de la ventana, la sismicidad previa parecía tener una influencia relativamente directa en la ocurrencia del evento siguiente, esta se vuelve prácticamente inexistente (en algunos casos contraria) conforme avanza la ventana. Siendo que en este periodo de tiempo, y al estar en un enjambre sísmico, los eventos se suceden con muy poca separación tanto temporal como espacial, por lo que estos eventos no deberían mostrarse como casos aislados.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
43	23-03-14 21:17	-19.685	-70.668	43,1	4.8	-1,070
44	23-03-14 22:04	-19.761	-70.747	42,3	5.1	-0,529

Cuadro 3.19: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 39 a 48 considerando el acoplamiento.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
39	22-03-14 13:29	-19.755	-70.990	42,7	5.6	1,726
40	22-03-14 22:14	-19.694	-70.981	41,4	5.1	1,474
41	23-03-14 18:19	-19.794	-70.943	33,8	6.2	1,767
42	23-03-14 20:23	-19.844	-70.896	43,3	5.3	0,151
45	24-03-14 11:26	-19.879	-70.839	35,8	5.7	1,923
46	24-03-14 11:32	-19.796	-70.808	42,1	5.0	1,429
47	24-03-14 11:40	-19.822	-70.868	41,1	5.6	1,523
48	24-03-14 12:32	-19.782	-70.795	42,7	5.0	0,084

Cuadro 3.20: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 39 a 48 considerando el acoplamiento.

### 3.5.3. Esfuerzos de Coulomb debidos a la sismicidad considerando el intersísmico y el “Terremoto Lento”:

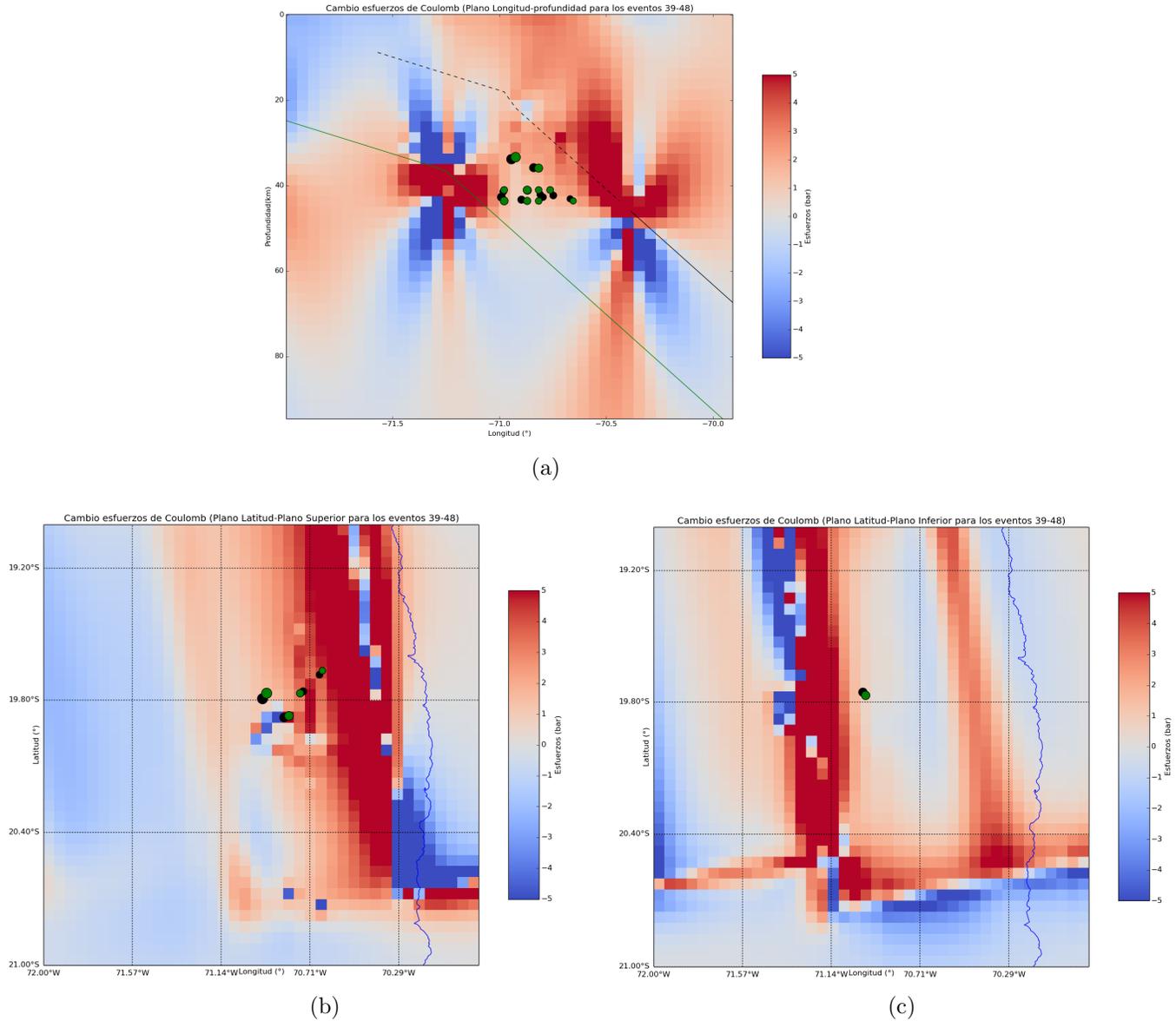


Figura 3.26: (a) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Longitud-Profundidad para los eventos del 1 al 38 con sismicidad adjunta de los eventos 39 al 48, considerando un intersísmico de 109 años y el Evento Lento, (b) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase superior para los eventos del 1 al 38 con sismicidad adjunta de los eventos 39 al 48, considerando un intersísmico de 109 años y el Evento Lento, (c) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase inferior para los eventos del 1 al 38 con sismicidad adjunta de los eventos 39 al 48, considerando un intersísmico de 109 años y el Evento Lento

### Análisis Observacional

En la figura (3.26) vemos, que varios eventos son localizados sitios donde  $CS_e > 0$ , notándose muy similar al caso anterior (3.5.2). Sin embargo, al observar con más detalle las figuras (3.26a) y (3.26b) notamos que hay algunas diferencias, al compararlas con las figuras (3.24a) y (3.24b).

Se ve que, según lo mostrado al comparar las figuras (3.26) y (3.24), varios de los eventos ocurren en lugares donde  $CS_e$  es mayor que en el caso anterior (3.5.2). No obstante, la figura (3.26) no puede decirnos cuanto influye el Evento Lento sobre  $CS_e$  en un valor exacto, principalmente porque el Evento Lento sigue su curso con el transcurso de los días y también porque hay un evento de magnitud superior a 6.0  $M_W$ .

### Análisis Teórico

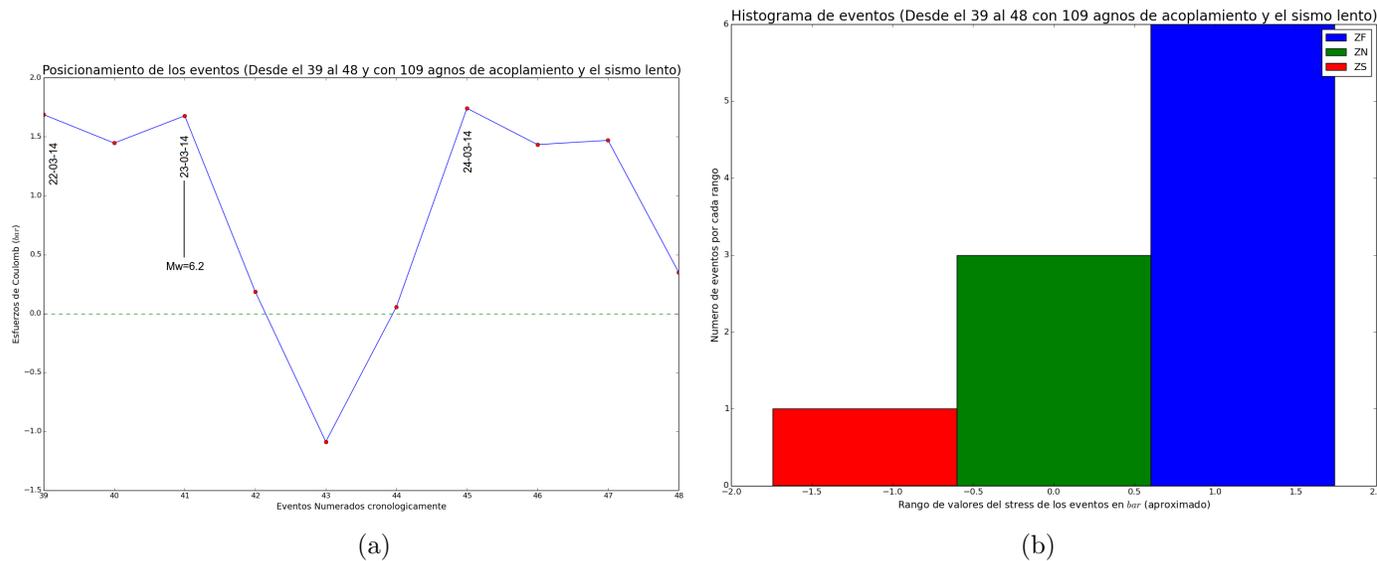


Figura 3.27: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en los hipocentros de los eventos 39 al 48 en el instante previo a su ocurrencia, considerando el intersísmico y el Evento Lento, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo al considerar el intersísmico y el Evento Lento

Se ve en la figura (3.27) que a simple vista, parecen no haber cambios considerables respecto al caso anterior (3.5.2). Aunque, al observar con el apoyo de los Cuadros (3.21) y (3.22), es notorio que los efectos del Evento Lento tienen impor-

tancia e influyen de manera significativa en  $CS_e$  para algunos eventos.

Al observar los Cuadros (3.21) y (3.22), notamos que la influencia del “Terremoto Lento” en  $CS_e$  deja como consecuencia, que un 70% de los eventos en la Zona favorable, un evento en la Zona de Sombra y cinco en la Zona Neutra (mayormente positiva).

Puede verse también en los Cuadros (3.21) y (3.22) que  $CS_e$  aumenta para algunos sismos y disminuye en otros respecto de sus valores en el caso anterior (3.5.2), siendo las disminuciones de un valor pequeño. No obstante, las reducciones de  $CS_e$  sí son significativas para el caso del evento 45, 46 y 47, para los que  $CS_e$  disminuye en 0,1 *bar* aproximadamente.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
43	23-03-14 21:17	-19.685	-70.668	43,1	4.8	-1,088

Cuadro 3.21: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 39 a 48 considerando el acoplamiento y el “Terremoto Lento”.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
39	22-03-14 13:29	-19.755	-70.990	42,7	5.6	1,688
40	22-03-14 22:14	-19.694	-70.981	41,4	5.1	1,447
41	23-03-14 18:19	-19.794	-70.943	33,8	6.2	1,678
42	23-03-14 20:23	-19.844	-70.896	43,3	5.3	0,185
44	23-03-14 22:04	-19.761	-70.747	42,3	5.1	0,057
45	24-03-14 11:26	-19.879	-70.839	35,8	5.7	1,742
46	24-03-14 11:32	-19.796	-70.808	42,1	5.0	1,434
47	24-03-14 11:40	-19.822	-70.868	41,1	5.6	1,470
48	24-03-14 12:32	-19.782	-70.795	42,7	5.0	0,351

Cuadro 3.22: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 39 a 48 considerando el acoplamiento y el “Terremoto Lento”.

En los casos en que el Evento lento aumenta el  $CS_e$ , este es perceptible, aunque solo ocurre en los eventos, 42 ,44, 47 y 48, es de aproximadamente de 0,1 *bar*. Para

el evento 42  $CS_e$  pasa de tener un valor de 0,151 *bar* a tener un valor de 0,185 *bar*, lo cual si bien sigue dentro del rango de valores de la Zona de Sombra, este valor se acerca bastante más al límite superior de esta.

En el caso del evento 44  $CS_e$  aumenta desde  $-0,529$  *bar* a 0,057 *bar* y considerando que en el primer caso de esta ventana el  $CS_e = 0,171$  para este evento, tenemos que de haber un error en la aproximación, el Evento Lento aporta un valor de  $CS_e = 0,586$  *bar* al evento 44.

### 3.5.4. Mecanismos Focales:

En esta ventana, puede verse que los eventos son representados por mecanismos focales muy similares entre sí, casi todos de carácter inverso con algunas pequeñas diferencias en los ángulos  $\phi_f$ ,  $\delta_p$  y  $\lambda_d$ .

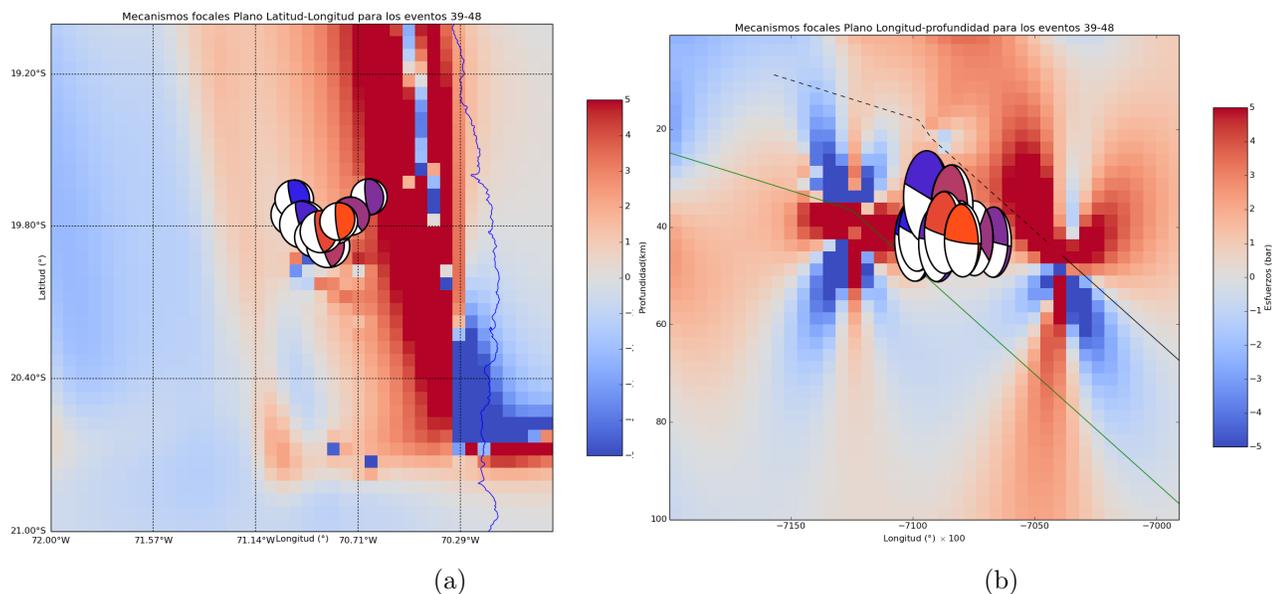


Figura 3.28: Mecanismos focales en el plano Latitud-Longitud (a) y en el plano Longitud-Profundidad (b) para la quinta ventana de eventos.

Se nota en la figura (3.28b), que durante esta ventana, los eventos ocurren predominantemente entre las interfases y no en el límite entre las placas Sudamericana y Nazca, como sería de esperar. No obstante, llama la atención que los sismos sean en su mayoría de mecanismo inverso a pesar de que en algunos casos se encuentren

muy cerca de la Interfase Inferior.

La ocurrencia de estos eventos, puede deberse a que Evento Lento aumenta la cantidad de  $CS_e$  sobre la zona acoplada. Esto hace que la sección de la placa de Nazca que colinda con la zona acoplada, comience a fracturarse internamente, ya que la esfuerzo ejercido en la Interfase Superior haría que sección superior de la placa de Nazca se mueva a menor velocidad que la parte inferior de esta, ubicada en la Interfase Inferior.

Esta fracturas, se caracterizan porque aunque ambos lados se muevan en igual dirección, la parte superior (al desplazarse a menor velocidad) se desliza como una falla inversa respecto a la parte inferior. Lo cual, resulta en los eventos inversos observados. En otras palabras, se trata de un caso en que, la velocidad de deslizamiento aumentaría con la profundidad, en la zona comprendida entre los límites superior e inferior de la placa de Nazca.

Existe un evento, cuyo mecanismo focal no es inverso sino oblicuo predominantemente normal, este quizás se deba a cortes producidos por rupturas internas en la placa de Nazca, las que debido a la interacción con la placa sudamericana no se mueven en direcciones uniformes dado que la convergencia entre las placas no es perfecta.

### 3.5.5. Resumen

En esta ventana, la influencia que tiene la actividad sísmica sobre  $CS_e$  se reduce, en parte debido a la disminución de las magnitudes de los eventos, respecto a la ventana anterior. Aunque, como se ha demostrado, la principal razón de esta pérdida de influencia, es que son los  $CS_e$  debidos a Procesos asísmicos, los que aumentan en mayor medida el  $CS_e$  en la zona. De estos, el más importante sigue siendo el Intersísmico, aunque el “Terremoto Lento” toma importancia en esta ventana, pues al considerarlo en el cálculo de  $CS_e$ , los eventos en cuyo hipocentro  $CS_e < 0$ , la magnitud de  $CS_e$  se hace más cercanas a 0 *bar*. Mientras que, en el caso de los eventos en cuyo hipocentro  $CS_e > 0$ , si bien en algunos hipocentros reduce ligeramente el valor de  $CS_e$ , en otros lo aumenta considerablemente.

Si bien se obtienen resultados en su mayoría muy acordes a la teoría, hay dos eventos en cuyos hipocentros  $CS_e < 0$ , sin importar el que se considere el  $CS_e$  debi-

do a ambas fuentes asísmicas. Esto, puede deberse a que, quizás se hayan cometido algunos errores al aproximar la subducción o la falla del “Terremoto Lento”, dado que, en el caso de este último, no se contaba con la profundidad a la que el evento tuvo lugar, siendo la aproximación de esta una posible fuente de error.

A pesar de estos dos eventos con  $CS_e$  hipocentral negativo, se muestra que, hasta ahora la migración existió, puesto que los eventos ocurren más al Norte que en la ventana anterior con muchos de esos eventos en la Zona Favorable, así como hay también, eventos cada vez más profundos, llegando a ocurrir sismos muy cerca de la Interfase Inferior.

Es posible que la actividad entre las interfases, puede deberse al “Terremoto Lento” en curso, pues este hace que la placa Sudamericana se mueva hacia el Oeste y al estar esta placa acoplada con la placa de Nazca podría hacer que esta también se fracture, debido al esfuerzo ejercido entre ambas placas.

## 3.6. Sexta Ventana de Eventos (del 49 al 54):

### 3.6.1. Esfuerzos de Coulomb debidos Únicamente a la sismicidad:

#### Análisis Observacional

En la figura (3.29) vemos que la mayoría de los eventos se concentran en torno a los  $-19.6^\circ$  de Latitud, en lugares con un valor positivo de  $CS_e$ .

En la figura (3.29a) se ve, que la actividad s’ísmica ocurre aproximadamente, en la corteza de la placa de Nazca, lo cual sería una continuación de lo ocurrido en la *Quinta Ventana* (3.5.1).

La figura (3.29b) muestra que, si bien, el evento principal tiene lugar en una zona donde  $CS_e < 0$ , este es demasiado bajo como para poder tenerse en consideración. No obstante, el área circundante a este sí presenta una carga positiva importante de  $CS_e$ , lo cual es de mucha relevancia en el caso de Mega-Eventos. Dado que, en teoría, la deformación debería ocurrir preferentemente en lugares donde  $CS_e$  es mayor, que son más propensos a romperse.

### Análisis Teórico

La figura (3.30) muestra, que aunque la mitad de los eventos se encuentran en sitios donde  $CS_e > 0$ , existe un evento cuyo hipocentro presenta un valor de  $CS_e$  aproximado de  $-7 \text{ bar}$ . Es decir, está en la Zona de Sombra, mientras que los eventos ubicados donde  $CS_e > 0$ , ocurren donde  $0 < CS_e < 1 \text{ bar}$ .

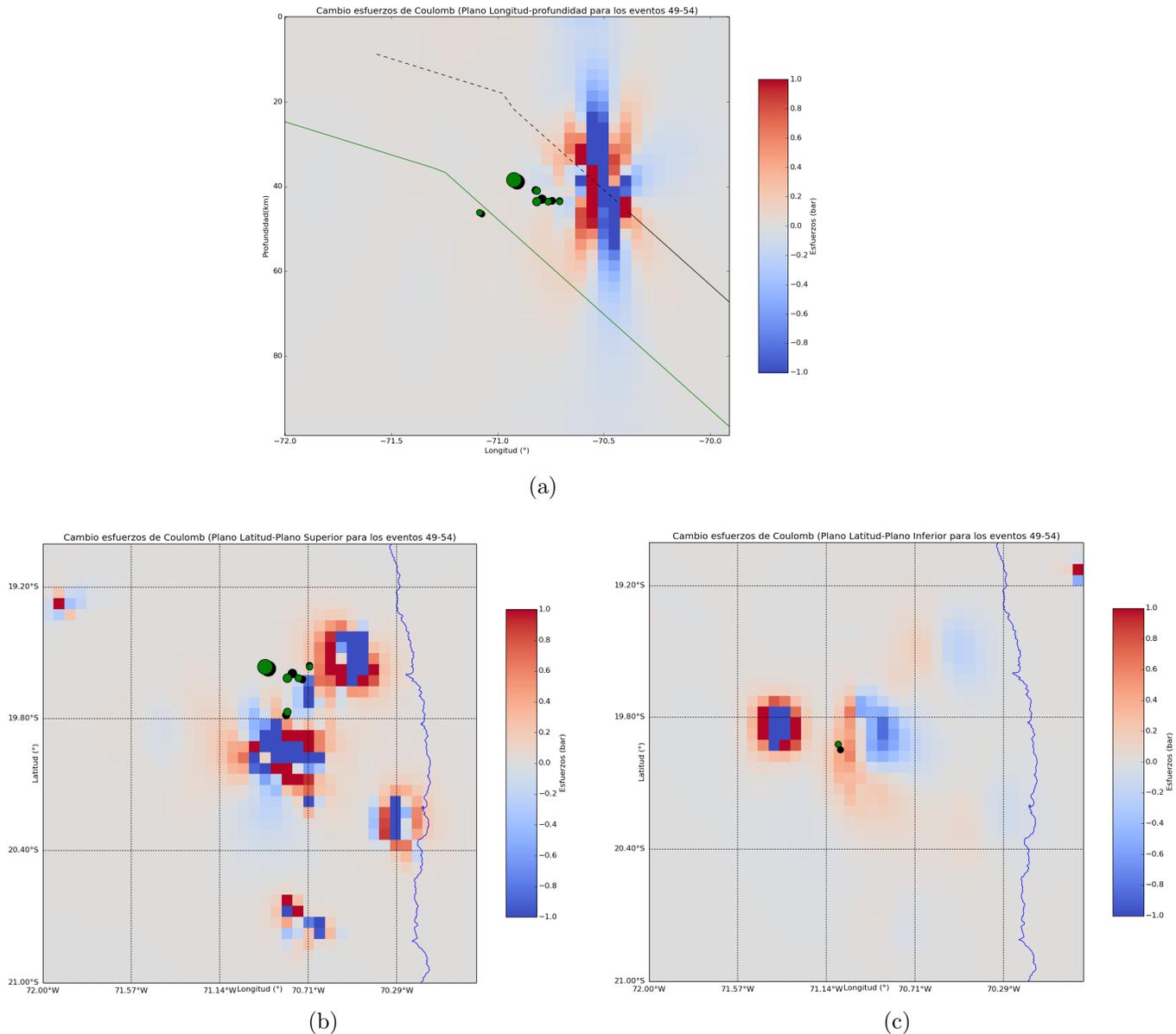


Figura 3.29: (a) Esfuerzos de Coulomb en el plano Longitud-Profundidad para los eventos del 1 al 48 con sismicidad adjunta de los eventos 49 al 54, (b) Esfuerzos de Coulomb en el plano Latitud-Interfase superior para los eventos del 1 al 48 con sismicidad adjunta de los eventos 49 al 54, (c) Esfuerzos de Coulomb en el plano Latitud-Interfase inferior para los eventos del 1 al 48 con sismicidad adjunta de los eventos 49 al 54

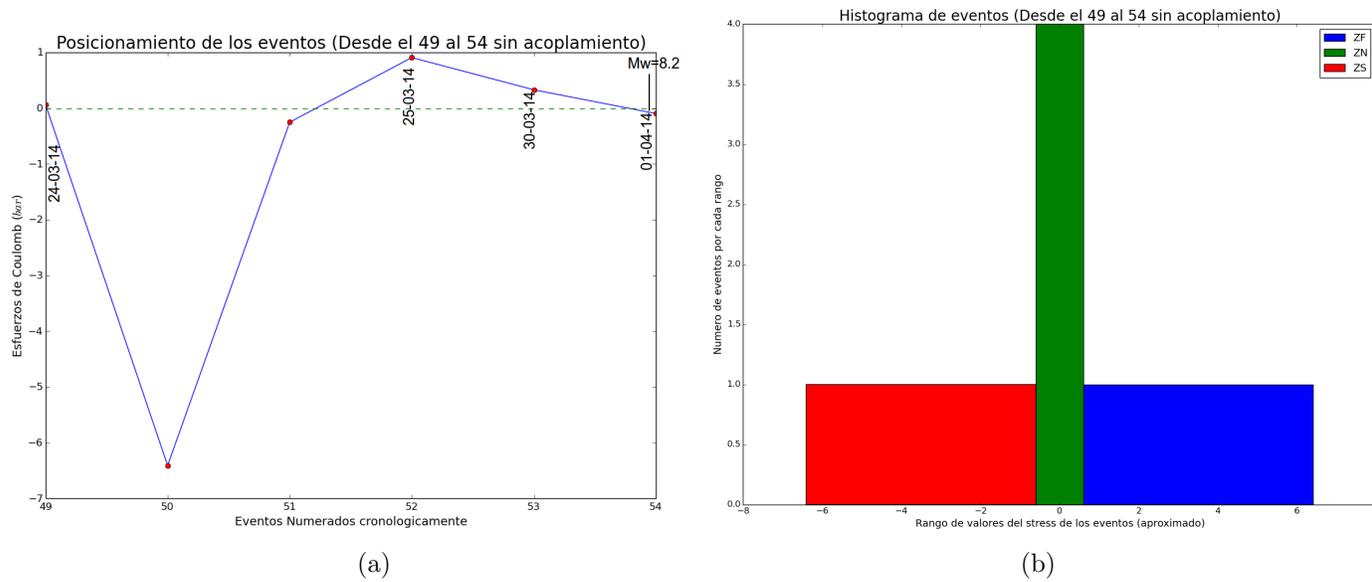


Figura 3.30: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en el hipocentro de los eventos 49 al 54 en el instante previo a su ocurrencia, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo

De acuerdo la figura (3.30), hay un evento en la Zona de Sombra, cuatro en la Zona Neutra y un evento en la Zona Favorable.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
50	24-03-2014 18:43	-19.621	-70.743	43,4	5.0	-6,408
51	24-03-2014 23:35	-19.558	-70.708	43,4	4.7	-0,250
54	01-04-2014 23:46	-19.572	-70.908	38,9	8.2	-0,033

Cuadro 3.23: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 49 a 54.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
49	24-03-2014 15:45	-19.594	-70.791	43,0	5.7	0,064
52	25-03-2014 00:15	-19.784	-70.821	40,9	5.2	0,909
53	30-03-2014 02:44	-19.948	-71.074	46,5	4.6	0,330

Cuadro 3.24: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 49 a 54.

De los Cuadros (3.23) y (3.24) se ve que, los eventos ubicados en sitios de  $CS_e < 0$ ,

tienen sus hipocentros muy cercanos entre sí. Siendo esto una posible causa para el valor de  $CS_e$  del evento 50. Ya que debido a la cercanía entre estos eventos y a que el primer evento ubicado donde  $CS_e < 0$ , es de una magnitud lo bastante alta como para que su zona de ruptura sea visible en la grilla, pero lo bastante baja como para que sea sensible a errores debido a que su ruptura es de apenas un pixel. Lo que causa que la aproximación del hipocentro del evento posterior, pueda estar en un sitio de  $CS_e < 0$ . No obstante, este error sólo afectaría a eventos cuya magnitud sea cercana a los  $5.7 M_W$ .

El hecho de que los eventos ocurridos se ubiquen en su mayoría en la Zona Neutra, algunos de ellos en su sección más cercana a  $0 \text{ bar}$ , lleva a que sea necesario el observar las influencias del  $CS_e$  debido a los procesos asísmicos.

### 3.6.2. Esfuerzos de Coulomb debidos a la sismicidad considerando el intersísmico:

#### Análisis Observacional

En la figura (3.31) puede verse, que los eventos se localizan predominantemente en sitios donde previamente  $CS_e > 0$ , especialmente entre las Interfases Superior e Inferior, donde  $CS_e$  es particularmente alto. Sin embargo el evento principal estaría en un sitio donde el valor de  $CS_e$  es menor que en sus alrededores.

#### Análisis Teórico

Puede verse en la figura (3.32), que los eventos se ubican casi en su totalidad en la Zona Favorable, con las excepciones de los evento 50, que al igual que en caso anterior (3.6.1) está en la Zona de Sombra, siendo este el único evento en que  $CS_e < 0$  y el evento principal, que se encuentra en la Zona Neutra Positiva.

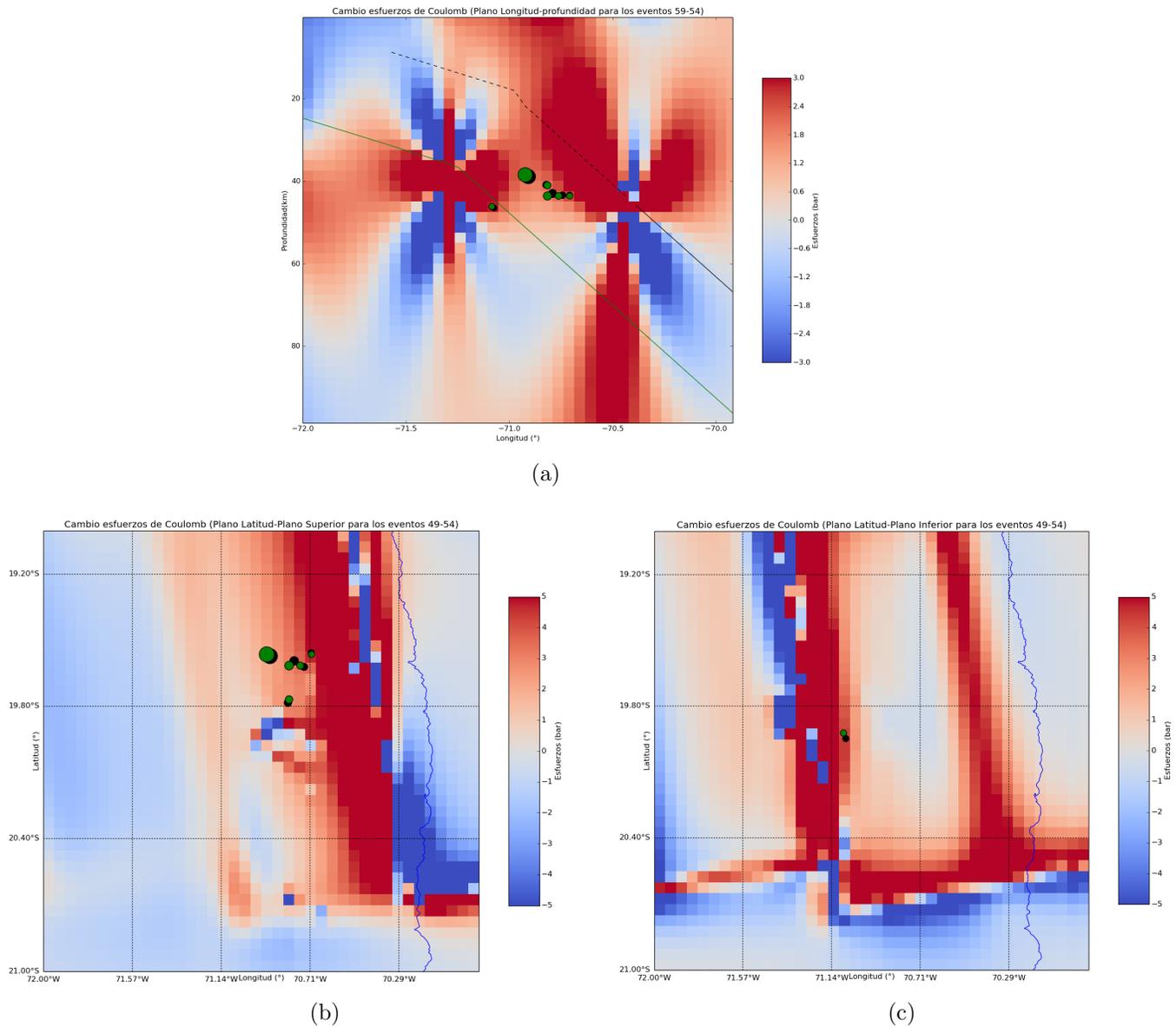


Figura 3.31: (a) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Longitud-Profundidad para los eventos del 1 al 48 con sismicidad adjunta de los eventos 49 al 54, considerando un intersísmico de 109 años, (b) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase superior para los eventos del 1 al 48 con sismicidad adjunta de los eventos 49 al 54, considerando un intersísmico de 109 años, (c) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase inferior para los eventos del 1 al 48 con sismicidad adjunta de los eventos 49 al 54, considerando un intersísmico de 109 años

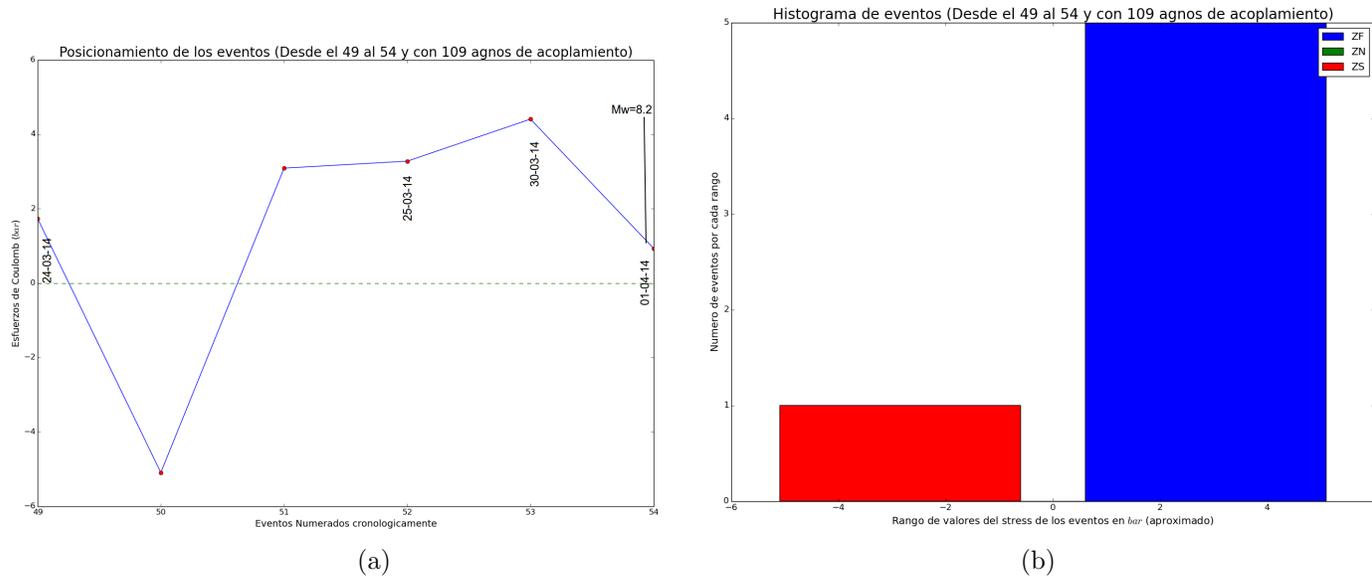


Figura 3.32: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en los hipocentros de los eventos 49 al 54 en el instante previo a su ocurrencia, considerando el intersísmico, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo al considerar el intersísmico

Como puede verse en el Cuadro (3.25), el hipocentro del evento 50, tiene un valor de  $CS_e \ll -1 \text{ bar}$ .

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
50	24-03-2014 18:43	-19.621	-70.743	43,4	5.0	-5,093

Cuadro 3.25: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 49 a 54.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
49	24-03-2014 15:45	-19.594	-70.791	43,0	5.7	1,733
51	24-03-2014 23:35	-19.558	-70.708	43,4	4.7	3,089
52	25-03-2014 00:15	-19.784	-70.821	40,9	5.2	3,278
53	30-03-2014 02:44	-19.948	-71.074	46,5	4.6	4,408
54	01-04-2014 23:46	-19.572	-70.908	38,9	8.2	0,929

Cuadro 3.26: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 49 a 54.

De acuerdo con el Cuadro (3.26), los eventos ubicados en la Zona Favorable, tienen un valor de  $CS_e$  que oscila entre los 0,929 *bar* y los 4,408 *bar*. Lo cual, nuevamente dice que, si bien los eventos en esta ventana influyen los unos sobre los otros, su relación directa aunque existente, no corresponde simplemente, a una relación causa-consecuencia entre un evento y su evento posterior. Sino más bien, corresponde a una combinación de la influencia que tienen los eventos sobre otro posterior con la acumulación de  $CS_e$  producto del intersísmico. Aunque, hasta que no se considere los  $CS_e$  debidos al Evento Lento, esta información estará incompleta.

El hecho de que el valor previo de  $CS_e$  en el hipocentro del evento 50, sea negativo y de valor absoluto mucho mayor al resto de los eventos, aún al considerar el intersísmico, hace sospechar aún más de que estos valores puedan tratarse de un error debido a la combinación de la magnitud del evento (y por ende de su deformación) y la aproximación del hipocentro del siguiente evento. Sin embargo, debemos observar el caso donde se incluye el  $CS_e$  producto del “Terremoto Lento” para poder confirmar o refutar esta suposición.

### 3.6.3. Esfuerzos de Coulomb debidos a la sismicidad considerando el intersísmico y el “Terremoto Lento”:

#### Análisis Observacional

En la figura (3.33) se nota que los eventos tendrían su hipocentro en sitios donde  $CS_e > 0$ . También se nota que la influencia del Evento Lento sobre  $CS_e$ , es mayor que en la *Quinta Ventana*, puesto que en esta, se aprecia mejor la diferencia en los mapas de  $CS_e$ , en este caso representados en las figuras (3.33) y (3.31).

A pesar de las diferencias entre las figuras (3.33) y (3.31), en ambas se aprecia que los eventos ocurren en sitios donde  $CS_e > 0$ , habiendo únicamente diferencias en las magnitudes de  $CS_e$ .

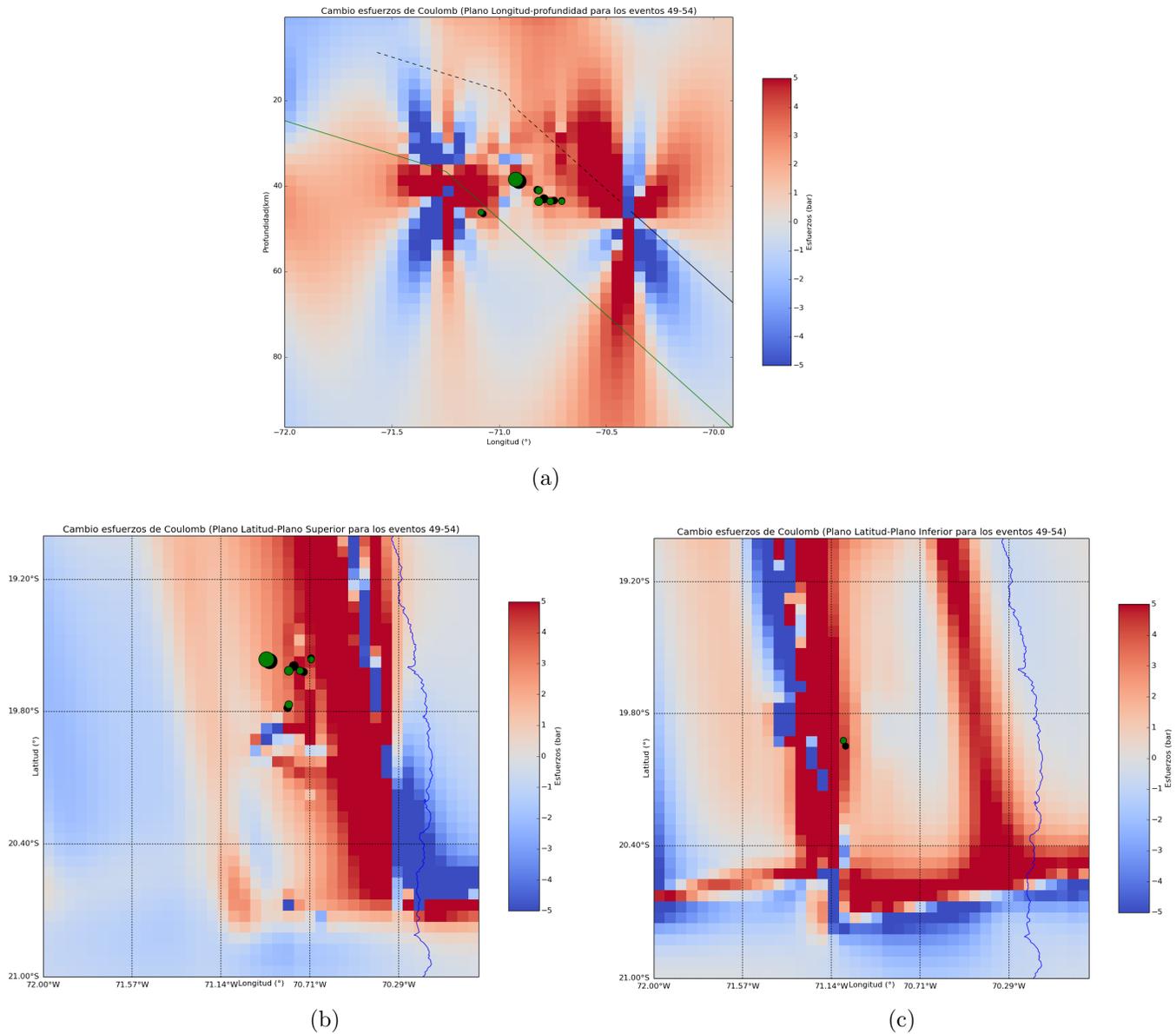


Figura 3.33: (a) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Longitud-Profundidad para los eventos del 1 al 48 con sismicidad adjunta de los eventos 49 al 54, considerando un intersismo de 109 años y el Evento Lento, (b) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase superior para los eventos del 1 al 48 con sismicidad adjunta de los eventos 49 al 54, considerando un intersismo de 109 años y el Evento Lento, (c) Esfuerzos de Coulomb obtenidos en el plano Latitud-Interfase inferior para los eventos del 1 al 48 con sismicidad adjunta de los eventos 49 al 54, considerando un intersismo de 109 años y el Evento Lento

### Análisis Teórico

Se ve en la figura (3.34) que el  $CS_e$  de los eventos, cambia ligeramente al considerar el Evento Lento. Sin embargo, estos no son muy notorios, pues se necesita

de los Cuadros (3.27), (3.25) (3.26) y (3.28) para notar las diferencias las diferencias entre estos.

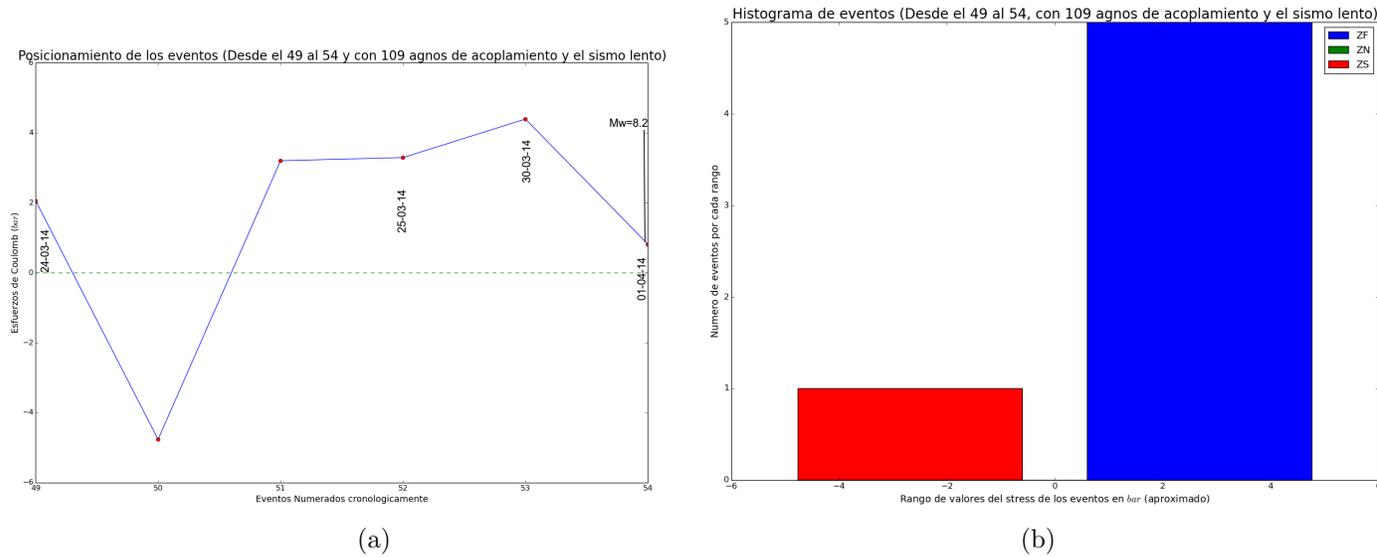


Figura 3.34: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en el hipocentro de los eventos 49 al 54 en el instante previo a su ocurrencia, considerando el intersísmico y el Evento Lento, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros de  $CS_e$  positivo vs eventos en hipocentros de  $CS_e$  negativo al considerar el intersísmico y el Evento Lento

En el Cuadro (3.27), se observa que, el evento 50 tiene un valor hipocentral de  $CS_e$  superior respecto al caso estudiado previamente (3.6.2). No obstante, este sigue siendo el único evento localizado en la Zona de Sombra.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
50	24-03-2014 18:43	-19.621	-70.743	43,4	5.0	-4,763

Cuadro 3.27: Sismos cuyo Stress de Coulomb es negativo ubicados en la ventana de eventos 49 a 54 considerando el acoplamiento y el “Terremoto Lento”.

Ev N <sup>o</sup>	Fecha	Latitud	Longitud	Prof (km)	Magnitud ( $M_W$ )	$CS_e$ (bar)
49	24-03-2014 15:45	-19.594	-70.791	43,0	5.7	2,062
51	24-03-2014 23:35	-19.558	-70.708	43,4	4.7	3,204
52	25-03-2014 00:15	-19.784	-70.821	40,9	5.2	3,295
53	30-03-2014 02:44	-19.948	-71.074	46,5	4.6	4,396
54	01-04-2014 23:46	-19.572	-70.908	38,9	8.2	0,884

Cuadro 3.28: Sismos cuyo Stress de Coulomb es positivo ubicados en la ventana de eventos 49 a 54 considerando el acoplamiento y el “Terremoto Lento”.

Al observar el Cuadro (3.28), tenemos que en los eventos 49, 50 y el 51, hay un aumento en el valor de  $CS_e$  respecto del caso previo (3.6.2). Mientras que para los eventos 52, 53 y 54, observamos una disminución en los valores de  $CS_e$ , siendo pequeña para el evento 53 (de 4,408 bar a 4,396 bar) y algo más significativa para el evento principal (de 0,929 bar a 0,884 bar).

El caso del evento 50 que sigue en la Zona de Sombra, prácticamente confirma que esos valores de  $CS_e$  sean erróneos, sin embargo se profundizará acerca de este evento en el *Resumen* (3.6.5).

El hecho de que el evento principal ocurra en una Zona donde  $CS_e$  no tiene un valor realmente alto sin importar el caso, hace que nos cuestionemos ¿Es que el método es realmente funcional? Lo que se responde al observar que alrededor del evento principal  $CS_e \geq 1$  y que además estos sectores de alto valor de  $CS_e$  son aproximadamente los mismos que en S.Ruiz et.al 2014 [11] que sufrieron una mayor deformación (véase la figura (3.35)), notándose que para los casos de Eventos de magnitud superior a 8.0  $M_W$ , debido al tamaño de la deformación, resulta más importante considerar el  $CS_e$  de los alrededores del hipocentro que el del hipocentro mismo puesto que este último no necesariamente será el punto de mayor deformación.

Puede verse en la figura (3.35) que la actividad sísmica habría sido determinante especialmente para la delimitación de la futura área de ruptura, que las zonas que rompieron fueron principalmente aquellas con un alto valor de  $CS_e$  y que las zonas donde el deslizamiento cosísmico es máximo corresponde muy bien con las zonas donde la sismicidad tuvo su mayor importancia (véase las figuras (3.35a) y (3.35b)).

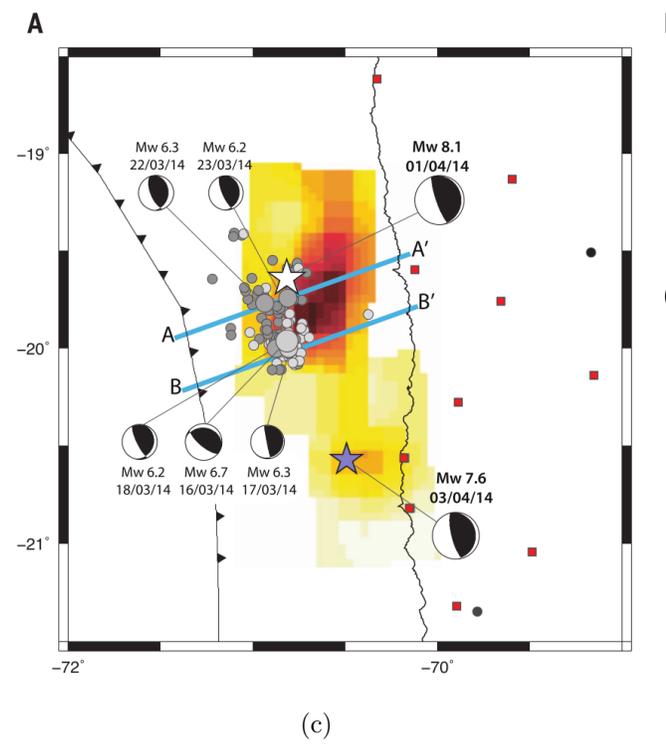
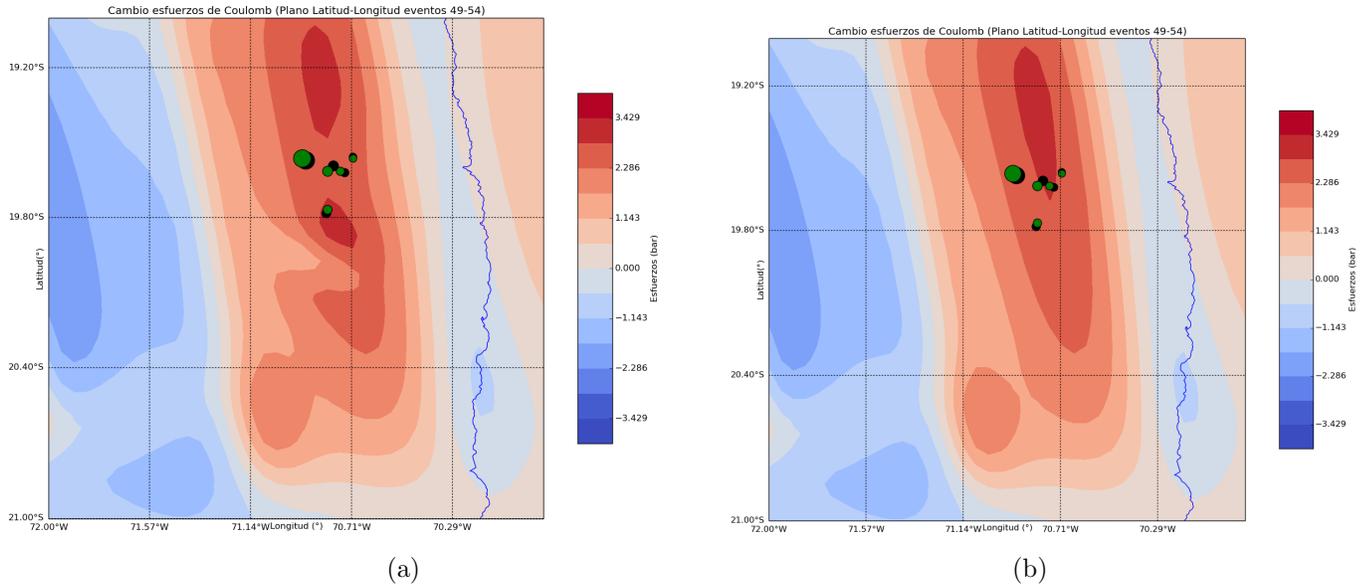


Figura 3.35: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb obtenido por todas las fuentes estudiadas en el plano latitud-longitud, (b) Valor de los Esfuerzos de Coulomb debido al intersísmico en el plano latitud-longitud, (c) Deformación cosísmica obtenida por S.Ruiz et.al 2014 [11]

Puede verse que hay diferencias entre los esfuerzos hacia el norte del hipocentro del evento principal con el deslizamiento en la misma zona, esto puede deberse a que no se considera el cambio de  $\phi_f$  que ocurre hacia el norte de los  $-19^\circ$  de latitud

mostrado en la figura(3.35c).

### 3.6.4. Mecanismos Focales:

Puede observarse en la figura (3.36), que la actividad sísmica se encuentra concentrada en sitios muy cercanos entre sí, lo que hace difícil identificar todos los mecanismos focales de la ventana. Sin embargo, se trata de mayormente eventos inversos con algunos oblicuos (predominantemente inversos), sin mucha diferencia en cuanto al ángulo de manteo ( $\delta_p$ ), aunque los ángulos ( $\lambda_d$  y  $\phi_f$ ) varían más.

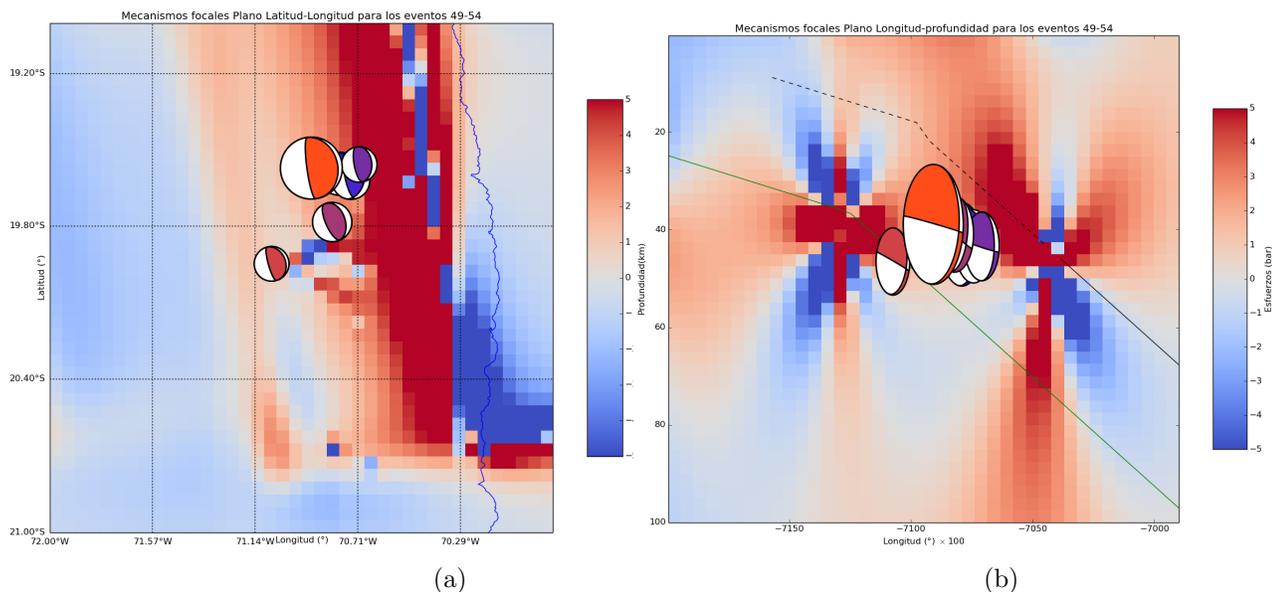


Figura 3.36: Mecanismos focales en el plano Latitud-Longitud (a) y en el plano Longitud-Profundidad (b) para la sexta ventana de eventos.

### 3.6.5. Resumen

Se ve en esta ventana, que los esfuerzos producidos únicamente por los eventos sísmicos son importantes, dado que, al menos uno de ellos se ubica en la Zona Favorable, lo que si bien no puede decirse que los sismos promueven directamente otro, sí influyen en la ocurrencia de estos, aunque de manera más indirecta.

Al considerar la influencia del Intersísmico y el Evento Lento en el cálculo de  $CS_e$ , es claro que hay una gran mayoría de eventos ubicados en la Zona Favorable, lo cual nos dice que hay una relación entre los eventos de carácter mixto. Es decir, gracias

a los eventos asísmicos el valor de  $CS_e$  previo a los eventos es grande, mientras que al irse sucediendo los eventos, tienden a aumentar el valor de  $CS_e$  lo bastante como para que la superficie rompa.

El caso del evento número 50 es bastante particular, debido no sólo a su ubicación en la Zona de Sombra, sino que, su valor hipocentral de  $CS_e$  es menor a  $-5 \text{ bar}$ , aún al considerar los los eventos sísmicos en el cálculo de  $CS_e$ . Sin embargo, al ver el valor de  $CS_e$  previo al primer evento de la ventana en la figura (3.37a), se tiene que este se localizaba en la Zona Favorable, mientras que en la figura (3.37b), vemos que luego del evento 49, en el futuro hipocentro del evento 50  $CS_e < 0$ .

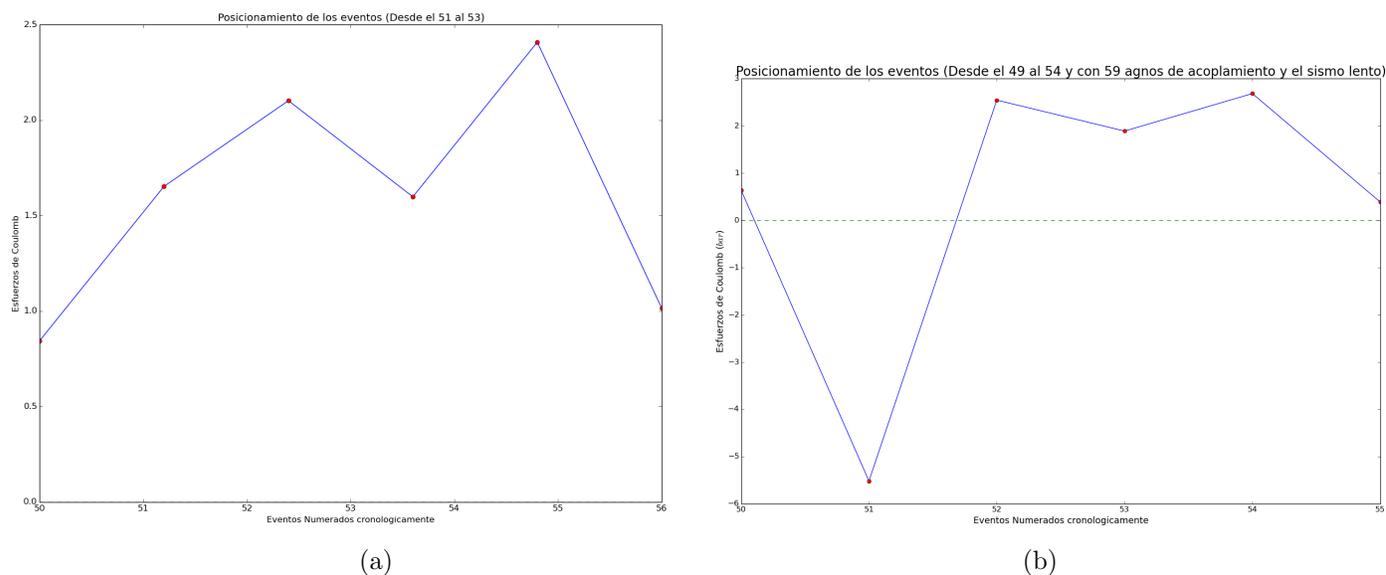


Figura 3.37: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en el hipocentro de los eventos 49 al 54 previo al evento 49 y considerando los deslizamientos asísmicos, (b) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en el hipocentro de los eventos 49 al 54 previo a cada evento y considerando los deslizamientos asísmicos

Aunque en esta ventana (al igual que en todas) la influencia del  $CS_e$  debido al intersísmico es la más importante, el Evento Lento también lo es, lo que se refleja en los valores del  $CS_e$  para varios eventos. No obstante, los cambios en  $CS_e$  debidos al Evento Lento, son de mucho menor magnitud que los provocados por el intersísmico.

Finalmente, lo dicho en el párrafo anterior, significa también que si se considera los procesos asísmicos en el cálculo de  $CS_e$ , el MCEC puede utilizarse en márgenes de subducción, dado que estos aportarían el esfuerzo faltante para explicar la ocurrencia de varios eventos que de otra forma ocurrirían en la Zona Neutra.

---

# Capítulo 4

## Discusión

El uso del MCEC para el periodo previo a un Mega Evento no es muy común, menos para zonas de subducción. Sin embargo, como hemos visto en la sección de *Resultados* (3), el MCEC puede ser utilizado para verificar la simicidad previa a un Mega Evento, si se toma en consideración que la sismicidad no es la única fuente de cambio para  $CS_e$ .

El MCEC es utilizado mayormente para verificar si un evento de magnitud lo bastante grande ( $5.8 M_W$  o mayor) promueve o retarda la ocurrencia de un evento posterior, por lo que suele utilizarse mucho para analizar la interacción entre eventos cercanos, los que se pueden encontrar en sistemas de fallas independientes pero cercanas. Como por ejemplo, un caso en que el primer evento se ubica en un sistema de límite de placas del tipo cizalle y el segundo en una falla inversa secundaria.

Sin embargo, no se utiliza frecuentemente en márgenes de subducción, la única situación en la que se utiliza el MCEC en un margen de subducción, corresponde a cuando, luego de un Mega Evento, se analiza si las replicas de este ocurrirían en zonas donde  $CS_e > 0$  o en lugares de  $CS_e < 0$ .

Al utilizarse el MCEC suele considerarse únicamente el  $CS_e$  debido a eventos sísmicos, por lo que su uso para el periodo previo a un Mega Evento de subducción puede llevar a la obtención de muchos eventos en la Zona Neutra (Positiva mayormente o con  $CS_e$  cercano a 0 *bar*). Esto lo vimos en el Capítulo (3), en los casos en los que se calculó el  $CS_e$  debido únicamente a la actividad sísmica.

Aunque, como ha visto, al considerar los esfuerzos debidos al intersísmico, muchos eventos son ubicados en sitios de  $CS_e > 1$  *bar*. No obstante, previo al evento del 16 de Marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ), se notan diferencias en los tipos de esfuerzos que promueven o inhiben los eventos con respecto al periodo posterior a este.

Previo al evento del 16 de Marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ), la actividad sísmica es mayormente consecuencia del esfuerzo debido al intersísmico, que al ocurrir durante más de 100 años, hacen que la zona acumule una gran cantidad de esfuerzos.

En el periodo mencionado en el párrafo anterior, no hay eventos promovidos por la sismicidad anterior, lo cual se comprueba en que, al no considerar el intersísmico, todos los eventos ocurridos durante este periodo de tiempo se ubican en la Zona

Neutra, con valores de  $CS_e$  muy cercanos a 0 *bar*.

Mientras que, luego de ocurrido el evento del 16 de Marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ), hay eventos que aún al no considerar el intersísmico ni el Evento Lento se ubican en la Zona Favorable, lo que nos dice que durante este periodo de tiempo, hubo eventos que fueron promovidos por la sismicidad previa. En otros casos los eventos ubicados en la Zona Neutra Positiva sugieren por su valor de  $CS_e$  que aunque la sismicidad no sea la única fuente de esfuerzos presente, los eventos podrían ser promovidos al considerar el intersísmico y el Evento Lento en la obtención de  $CS_e$ , lo cual sucede. Aunque es notorio que el intersísmico es lo que más aporta en esfuerzos, el Evento Lento adquiere importancia progresivamente en la ocurrencia de los eventos posteriores al evento del 16 de Marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ).

Si bien durante el enjambre sísmico los eventos no parecen tener un aporte dominante en términos de  $CS_e$ , al observar la figura (3.35) se tiene que la principal influencia de la sismicidad en cuanto al cambio de los esfuerzos de Coulomb, no sería en el aporte de esfuerzos al hipocentro, sino más bien influiría de manera importante en el área de ruptura del evento principal. Esto se ve en que en la figura (3.35a), la zona en la que  $CS_e$  es máximo es diferente a la de la figura (3.35b), (que muestra los esfuerzos debidos únicamente al intersísmico). Mostrando que la influencia de los eventos sí fue importante a la hora de promover el evento principal, especialmente en su delimitación de ruptura y aumentándose notoriamente el  $CS_e$  donde el deslizamiento cosísmico alcanzó sus máximos. Lo que también pudo ser una razón por la que la zona que se fracturó fue mucho más pequeña de lo podría haberse esperado, dada la gran área de silencio sísmico existente desde 1877 (véase la figura(1.2)).

En la figura (3.35) se puede apreciar también que hacia los  $-19^\circ$  de latitud, las zonas donde  $CS_e$  es más alto no coincide con totalmente con la zona de mayor deslizamiento cosísmico, esto puede deberse a que en este trabajo no se tomó en consideración el cambio en la dirección de la subducción que hay a partir de esa latitud (véase figura(3.35c)).

En consecuencia, al considerar ambos procesos asísmicos en el cálculo del  $CS_e$ , los resultados apuntan hacia la existencia de una migración de la actividad sísmica, la cual constó de eventos que ocurrían mientras el Evento Lento aumentaba más el valor de  $CS_e$  y promovía nuevos eventos.

Al ocurrir estos eventos, aumentaban el  $CS_e$  en el área cercana a sus hipocentros, en los cuales solían ocurrir nuevos eventos sísmicos y, al estar  $CS_e$  mayormente acumulado hacia el Norte, los eventos fueron sucediéndose progresivamente cada vez más al Norte, los que además irían configurando lo que sería el área de la futura deformación.

Un dato importante es que, como se vió en los *Análisis Observacionales* de cada caso en que se considera el intersísmico en el cálculo de  $CS_e$ , mucha de la actividad sísmica inversa ocurre debajo del margen de subducción. Esto se puede explicar al considerar la existencia de una Interfase Inferior como se supuso al inicio de la sección de *Resultados*, dado que la Interfase Inferior aumenta mucho el valor de  $CS_e$  en dicha zona propiciando eventos inversos y promovería mucha de la actividad sísmica ocurrida.

## Resultados de los esfuerzos de Coulomb:

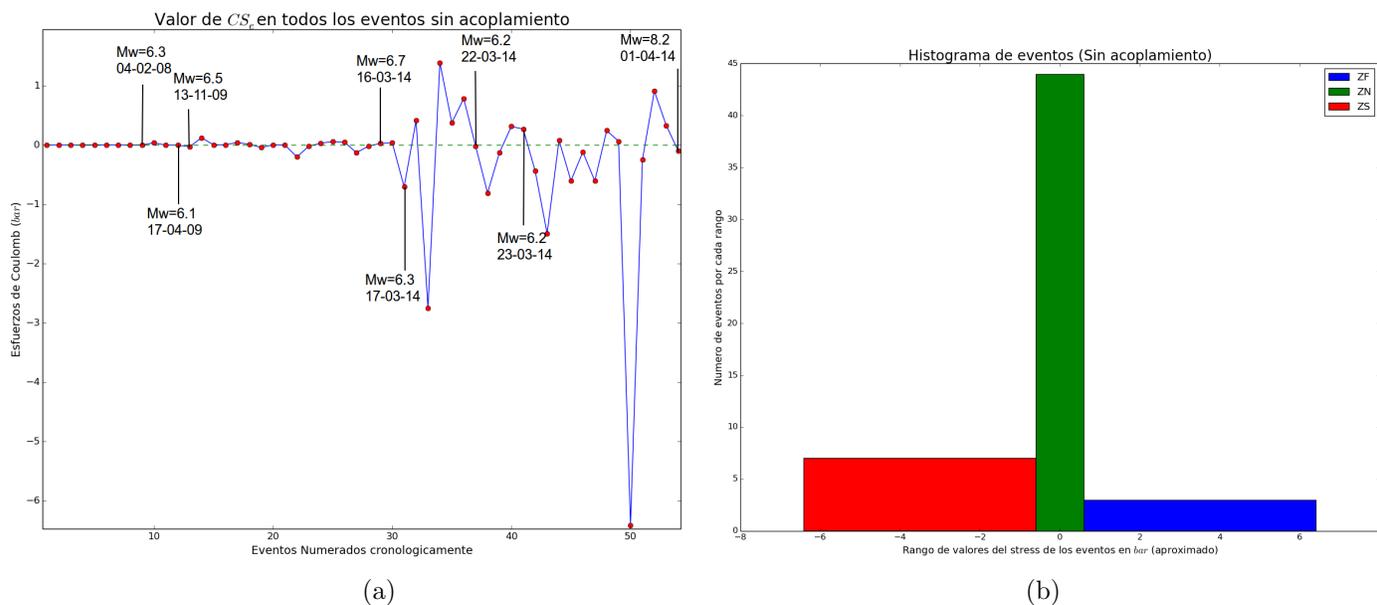


Figura 4.1: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb (Eventos 1 al 10) en el hipocentro de los eventos 1 al 10, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros positivos vs eventos en hipocentros negativos

Se ve que al considerar sólo la sismicidad para el cálculo de  $CS_e$ , los datos indicarían que la sismicidad no tiene interrelación en muchos casos, o tiene una muy

débil (véase la figura (4.1) para visualizar).

Sólo puede verse una mayor influencia de la sismicidad sobre  $CS_e$  a partir del evento 29, que es donde ocurren todos los eventos localizados en la Zona Favorable, ya que anterior a este evento, la magnitud de  $CS_e \approx 0$  para la mayoría de los eventos. No obstante, no sólo suelen ocurrir más eventos cuyos hipocentros están en la Zona de Sombra que eventos ubicados en la Zona Favorable, sino que también,  $|CS_e|$  en los hipocentros de los eventos en la Zona de Sombra es mucho mayor que el  $|CS_e|$  de los localizados en la Zona Favorable.

A pesar de que hay más eventos localizados en la Zona de Sombra que en la Zona Favorable (7 en la Zona de Sombra y 3 en la Zona Favorable), la mayor cantidad de los eventos son localizados en la Zona Neutra, llegando a un número de 44 eventos localizados en sitios donde  $-0,6 < CS_t < 0,6 \text{ bar}$ . Los que no sólo ocurren previo al evento del 16 de Marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ), sino que ocurre también después de este.

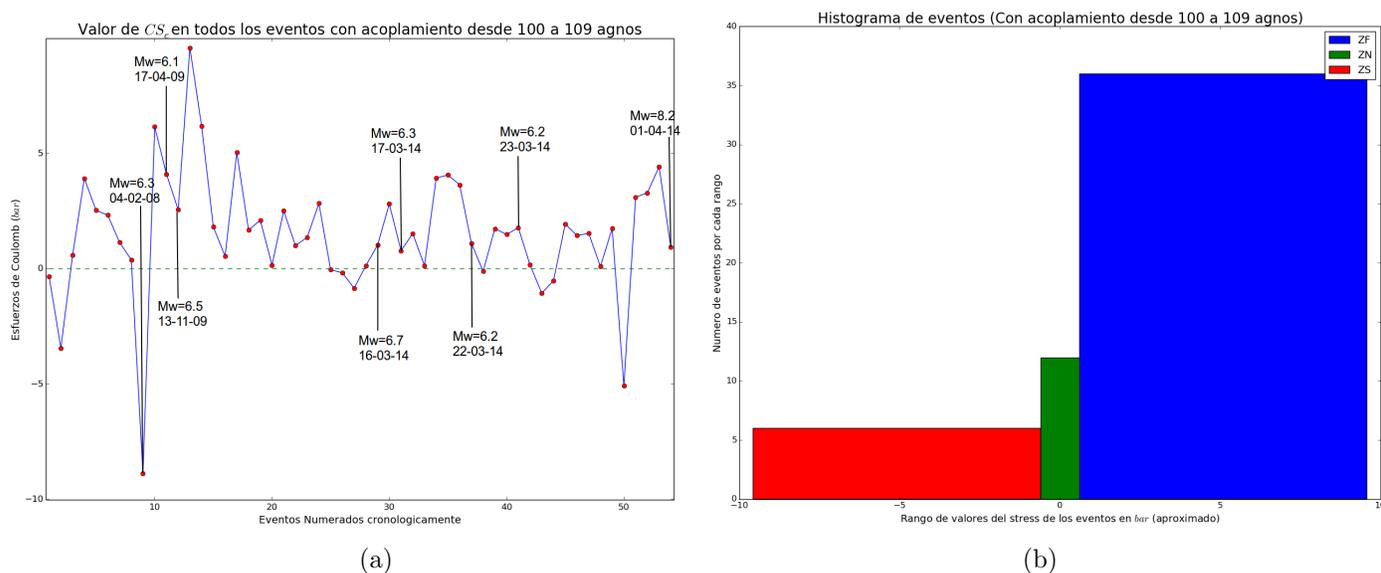


Figura 4.2: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en el hipocentro de los eventos Incluyendo 100 años de intersísmico, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros positivos vs eventos en hipocentros negativos

La gran cantidad de eventos ocurridos en lo que sería la Zona Neutra (considerando que luego del evento del 16 de Marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ )  $CS_e > 0,1$  para muchos eventos), es lo que nos dice que para que esos eventos tuvieran lugar, debió ocurrir un fenómeno, que no se tuvo en consideración al sólo usar la actividad sísmica para

calcular  $CS_e$ . Lo que, sumado a lo reportado por S.Ruiz et.al 2014 [11], (el que la zona de estudio tenía un acoplamiento muy alto y se evidenció la ocurrencia del Evento Lento), muestra que el considerar el cambio en  $CS_e$  debido únicamente a la simicidad, se ignorarán procesos importantes previos a un Mega Evento de subducción. En los que ocurren también deslizamientos muy lentos, no registrados como sismos y que también cargarán y/o liberarán esfuerzos.

Es así como al aproximar la subducción y con eso agregar los esfuerzos producido del intersísmico, se obtienen valores de  $CS_e$  más cercanos a lo esperado, con 6 eventos en la Zona de Sombra, 12 en la Zona Neutra y 36 en la Zona Favorable, los que además, permiten decir que sí hubo una migración de la actividad sísmica, al ubicarse la mayoría de los eventos en zonas donde  $CS_e > 0,6 \text{ bar}$ , lo cual se ve en la figura (4.2).

Si bien, se ve en la figura (4.2) que se tienen resultados muy satisfactorios para la mayoría de los eventos, al considerar el  $CS_e$  debido al Evento Lento observado por S.Ruiz et.al 2014 [11] estos son aún más cercanos a lo esperado (véase la figura (4.3)).

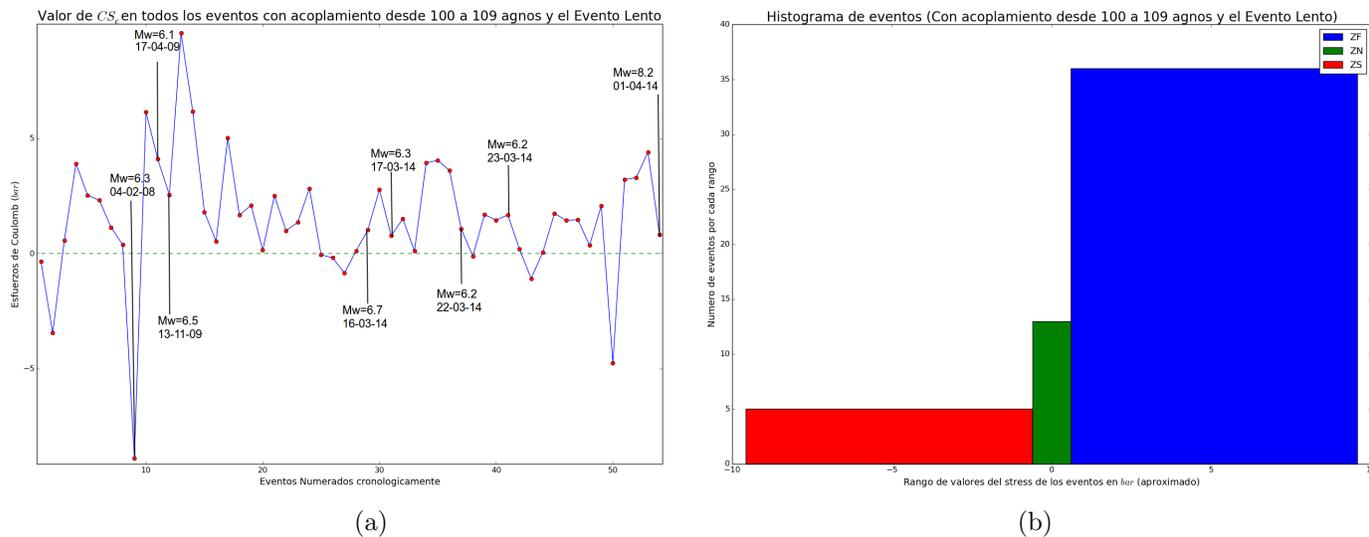


Figura 4.3: (a) Valor de los Esfuerzos de Coulomb en el hipocentro de los eventos 1 al 54 con 100 años de intersísmico y el evento Lento, (b) Concentración cantidad de eventos en hipocentros positivos vs eventos en hipocentros negativos

## Influencia dominante del Intersísmico

De lo obtenido anteriormente puede aparecer la interrogante ¿Son realmente importantes los esfuerzos debidos a la actividad sísmica dada la gran influencia que tendría el Intersísmico? Para responder esto se comparan los valores de  $CS_e$  en dos casos, los que son representados en la figura (4.4)

- Al considerar únicamente el Intersísmico
- Al considerar la simicidad, el Intersísmico y el Evento Lento

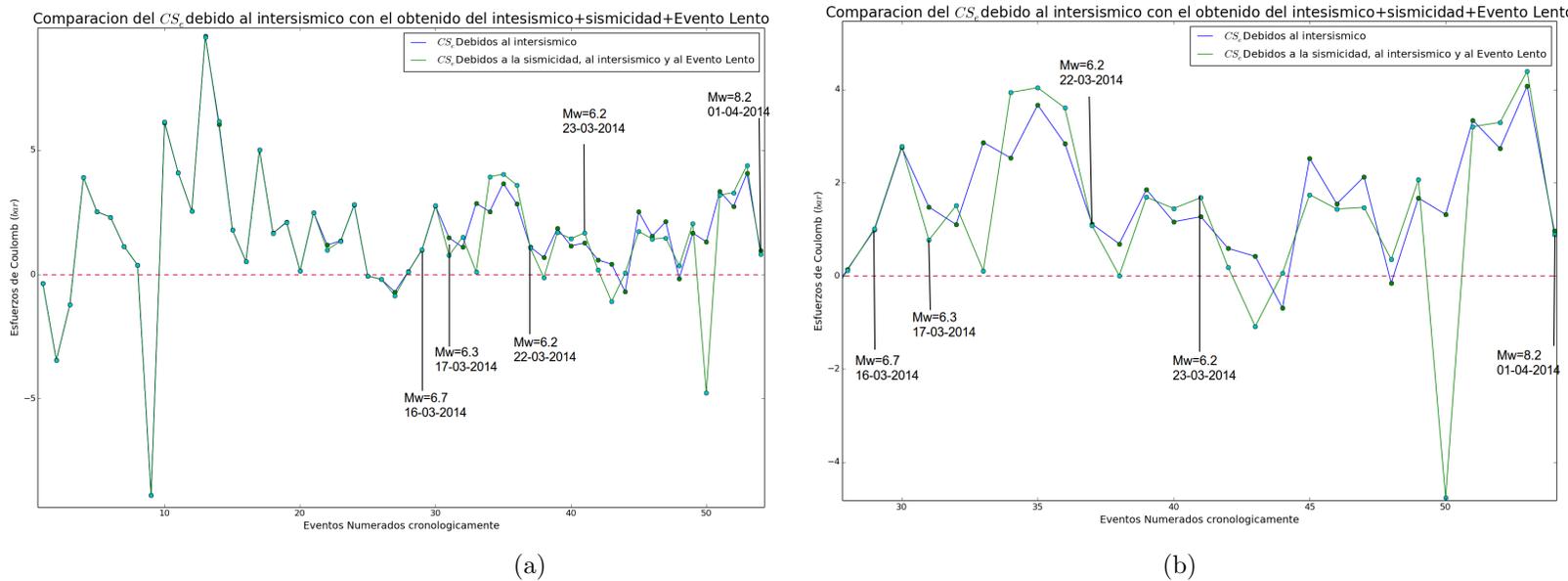


Figura 4.4: Comparación entre los esfuerzos de Coulomb obtenidos únicamente por el intersísmico y aquellos obtenidos al considerar también la sismicidad y el Evento Lento junto con las fechas y magnitudes de los eventos de  $M_w \geq 6,0$  ocurridos después del 16 de marzo del 2014, (a) para toda la serie de tiempo y (b) para el enjambre

En la figura (4.4) se observa que en el periodo previo al evento del 16 de marzo de 2014 ( $6.7 M_W$ ) el Intersísmico puede considerarse como la única fuente de esfuerzos del sistema, ya que en comparación los eventos aportan una cantidad ínfima de  $CS_e$ , siendo otra evidencia que la actividad registrada en este periodo de tiempo sería predominantemente consecuencia del Intersísmico.

Sin embargo al observar la figura (4.4), particularmente la figura (4.4b) se tiene que luego del evento del 16 de marzo del 2014 ( $6.7 M_W$ ) Aunque el  $CS_e$  debido al Intersísmico es la fuente de esfuerzos más importante, los eventos y el Evento Lento

cambian el valor de  $CS_e$  lo bastante como para que sus influencias tengan que ser consideradas y dan a entender que la actividad no es simplemente consecuencia del Intersísmico sino que las otras fuentes de esfuerzos son también importantes en el análisis.

Es de notar que aún al considerar el intersísmico y el Evento Lento hay eventos ubicados en la Zona de Sombra y/o en la Zona Neutra, esto puede deberse a diversos motivos, entre los que están.

- **Efecto la aproximación de la geometría:** Esto ocurre porque como se ve en la figura (2.5) el ángulo de inclinación de la subducción no es constante y aumenta suavemente hacia el Este. Mientras que, en la figura (2.7), al aproximar la subducción asumimos una pendientes específicas, lo cual causa que quizás el patrón de esfuerzos cerca de los bordes sea algo distinto.
- **Considerar que al sur de la Zona de Alto Acoplamiento no hay deslizamiento:** Esto puede causar errores en especial en el valor previo de  $CS_e$  en los eventos ubicados cerca del límite de esta, dado que tanto la Interfase Superior como la Interfase Inferior, se mueven al sur de la Zona de Alto Acoplamiento.
- **Errores en los ángulos  $\phi_f$ ,  $\delta_p$  y  $\lambda_d$  receptores:** En Wang et.al 2014 [4] descubrieron que una diferencia en alguno de estos ángulos (no sólo en la subducción sino en las fallas receptoras) puede causar errores de consideración, siendo especialmente alto en el caso de un error en  $\delta_p$ , donde el error en el cálculo de  $CS_e$  llega a ser de más del 50% (siendo el error de entre un 6,25% y un 9,28% para  $\phi_f$  y entre un 9,77% y un 34,92% para  $\lambda_d$ ). Sin embargo, en los dos catálogos utilizados  $\delta_p$  varía muy poco o es prácticamente el mismo, salvo en contadas excepciones. En el caso de  $\lambda_d$  y  $\phi_f$  las diferencias existen en casi todos los eventos, pero en su mayoría son pequeñas.

---

# Capítulo 5

## Conclusiones

Se encuentra evidencia de que hay una migración de la actividad sísmica a partir de lo obtenido en el Capítulo (3), dado que, al calcular  $CS_e$  tomando en cuenta tanto el intersísmico como el Evento Lento reportado en S.Ruiz et.al 2014 [11] la mayor parte de los eventos se suceden en sitios donde  $CS_e > 1 \text{ bar}$ .

Se muestra al calcular  $CS_e$ , utilizando sólo la sismicidad en el periodo previo a un Mega Evento de subducción, los eventos predominantemente ocurrirán en sitios donde  $CS_e$  es positivo, aunque muchos eventos se encuentran en la Zona Neutra Positiva, dando la impresión que el MCEC no aporta información convincente estos casos. Sin embargo, como se ha observado, esto ocurriría porque se ignoran los esfuerzos debidos al intersísmico, dándose un caso en el que, aunque los eventos aporten una cantidad de esfuerzos baja, probablemente esta sea suficiente como para que una zona previamente cargada de esfuerzos se fracture. No obstante los mayores efectos de la sismicidad habrían sido mayormente (de acuerdo a lo obtenido) de delimitar el área de ruptura, haciendo que las áreas fracturadas sean aquellas con un valor muy alto de  $CS_e$ .

Al considerar el intersísmico dentro del cálculo de  $CS_e$  (aún mediante una aproximación sencilla), se muestra que este tiene mucha importancia en la obtención de  $CS_e$ . De donde una cantidad importante de esfuerzos se acumularían entre la Interfase Inferior y la Interfase Superior.

El efecto del Evento Lento tiene importancia sobre  $CS_e$ , especialmente los últimos días antes del evento principal, principalmente el aumentando los valores de  $CS_e$  en la zona aledaña a la que sería deformada durante el evento principal, sacando en parte a algunos eventos de la Zona Neutra.

Finalmente, en este estudio se muestra que el MCEC podría ser utilizable para la sismicidad previa a un Mega Evento de subducción si se tiene en cuenta los esfuerzos debidos al intersísmico, cosa que no suele hacerse. En este caso, al considerar el modelo *Slab-Pull*, el  $CS_e$  resultante daría indicios del porqué de la sismicidad debajo del margen de las placas. Esto usando un modelo sencillo, por lo que quizás, al considerar una aproximación más precisa de la zona de subducción, se obtengan resultados más concluyentes, aumentando así el alcance de este método para el estudio de los sismos y sus consecuencias.

---

## Capítulo 6

### Anexo: Demostración

**Dem** ( $\sigma_n$  y  $\tau$ ). Para obtener los valores de los esfuerzos en las componentes de cizalle y normal se utilizan los vectores unitarios  $\hat{n}$  y  $\hat{d}$ .

$$\tau = (\hat{n} \cdot \underline{\underline{\sigma}}) \cdot \hat{d} \quad (6.1)$$

$$\sigma_n = (\hat{n} \cdot \underline{\underline{\sigma}}) \cdot \hat{n} \quad (6.2)$$

Donde  $\underline{\underline{\sigma}} = \sigma_{ij}$ , mientras que  $\hat{n}$  y  $\hat{d}$  son definidos por.

$$\hat{d} = \begin{pmatrix} \cos \lambda_d \cos \phi_f + \sin \lambda_d \cos \delta_p \sin \phi_f \\ \cos \lambda_d \sin \phi_f - \sin \lambda_d \cos \delta_p \cos \phi_f \\ \sin \lambda_d \sin \delta_p \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

y

$$\hat{n} = \begin{pmatrix} -\sin \delta_p \sin \phi_f \\ \sin \delta_p \cos \phi_f \\ \cos \delta_p \end{pmatrix} \quad (6.4)$$

Con lo cual se reescriben las Ecuaciones (6.1) y (6.2) de manera que podamos obtener cada una de sus componentes, como vemos a continuación.

$$\tau = \sum (\hat{n}_i \sigma_{ij}) \hat{d}_j \quad \text{con } i, j = 1, 2, 3 \quad (6.5)$$

$$\sigma_n = \sum (\hat{n}_i \sigma_{ij}) \hat{n}_j \quad \text{con } i, j = 1, 2, 3 \quad (6.6)$$

### 1. Obtención de $\tau$ :

- **Componente  $i = 1$  y  $j = 1$ :**

Empezamos obteniendo las componentes de  $\tau$  correspondientes a  $i = 1$  y a  $j = 1$  en la Ecuación (6.5), lo cual quiere decir que se reemplaza el primer término de la (6.4) obteniéndose así .

$$(\hat{n}_1 \sigma_{11}) \hat{d}_1 = (-\sin \delta_p \sin \phi_f \sigma_{11}) (\cos \lambda_d \cos \phi_f + \sin \lambda_d \cos \delta_p \sin \phi_f)$$

De lo cual queda.

$$(\hat{n}_1\sigma_{11})\hat{d}_1 = \cos \lambda_d(-\sin \delta_p \sin \phi_f \cos \phi_f \sigma_{11}) + \sin \lambda_d(-\sin \delta_p \cos \delta_p \sin^2 \phi_f \sigma_{11}) \quad (\# \#)$$

Los términos subrayados en (# #) corresponden con la primera de las siguientes identidades trigonométricas, representada en la (6.7).

$$\sin(2\alpha) = 2 \sin \alpha \cos \alpha \quad (6.7)$$

$$\cos(2\alpha) = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha \quad (6.8)$$

Finalmente, al reemplazar (6.7) en (# #), tenemos.

$$\boxed{(\hat{n}_1\sigma_{11})\hat{d}_1 = \cos \lambda_d \left( -\frac{1}{2} \sin \delta_p \sin 2\phi_f \sigma_{11} \right) + \sin \lambda_d \left( -\frac{1}{2} \sin 2\delta_p \sin^2 \phi_f \sigma_{11} \right)} \quad (6.9)$$

- **Componente  $i = 1$  y  $j = 2$ :**

Comenzamos reemplazando el segundo componente de  $\hat{d}$  en (#).

$$(\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{d}_2 = (-\sin \delta_p \sin \phi_f \sigma_{12})(\cos \lambda_d \sin \phi_f - \sin \lambda_d \cos \delta_p \cos \phi_f \sigma_{12})$$

Reagrupando y multiplicando obtenemos.

$$(\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{d}_2 = \cos \lambda_d(-\sin \delta_p \sin^2 \phi_f \sigma_{12}) + \sin \lambda_d(\sin \delta_p \cos \delta_p \sin \phi_f \cos \phi_f \sigma_{12}) \quad (\# \# \#)$$

Ahora utilizamos la identidad (6.7) en los términos subrayados de (# # #)

$$(\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{d}_2 = \cos \lambda_d(-\sin \delta_p \sin^2 \phi_f \sigma_{12}) + \sin \lambda_d \left( \frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \frac{1}{2} \sin(2\phi_f) \sigma_{12} \right)$$

Finalmente al simplificar tenemos la expresión.

$$\boxed{(\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{d}_2 = \cos \lambda_d(-\sin \delta_p \sin^2 \phi_f \sigma_{12}) + \sin \lambda_d \left( \frac{1}{4} \sin(2\delta_p) \sin(2\phi_f) \sigma_{12} \right)} \quad (6.10)$$

- **Componente  $i = 1$  y  $j = 3$ :**

Notamos que este caso es más corto debido a que  $\hat{d}_3$  tiene menos términos que los anteriores.

$$(\hat{n}_1\sigma_{13})\hat{d}_3 = (-\sin \delta_p \sin \phi_f \sigma_{13})(\sin \lambda_d \sin \delta_p)$$

Lo que al multiplicar nos da la expresión para  $\tau(i = 1, j = 3)$ .

$$\boxed{(\hat{n}_1\sigma_{13})\hat{d}_3 = -\sin \lambda_d \sin \phi_f \sin^2 \delta_p \sigma_{13}} \quad (6.11)$$

Con la *Ecuación (6.11)* terminamos las componentes en las que  $i = 1$ , por lo que ahora pasamos a las componentes en que  $i = 2$ .

- **Componente  $i = 2$  y  $j = 1$ .**

Partimos de la expresión

$$(\hat{n}_2\sigma_{21})\hat{d}_1 = (\sin \delta_p \cos \phi_f \sigma_{21})(\cos \lambda_d \cos \phi_f + \sin \lambda_d \cos \delta_p \sin \phi_f)$$

Al multiplicar y reagrupar tenemos.

$$(\hat{n}_2\sigma_{21})\hat{d}_1 = \cos \lambda_d(\sin \delta_p \cos^2 \phi_f \sigma_{21}) + \sin \lambda_d(\sin \delta_p \cos \delta_p \sin \phi_f \cos \phi_f \sigma_{21}) \quad (*)$$

Ahora aplicamos la identidad trigonométrica (6.7) en los términos subrayados en la expresión (\*), obteniéndose así.

$$(\hat{n}_2\sigma_{21})\hat{d}_1 = \cos \lambda_d (\sin \delta_p \cos^2 \phi_f \sigma_{21}) + \sin \lambda_d \left( \frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \frac{1}{2} \sin(2\phi_f) \sigma_{21} \right)$$

Lo que al multiplicar nos da la expresión (6.12).

$$\boxed{(\hat{n}_2\sigma_{21})\hat{d}_1 = \cos \lambda_d (\sin \delta_p \cos^2 \phi_f \sigma_{21}) + \sin \lambda_d \left( \frac{1}{4} \sin(2\delta_p) \sin(2\phi_f) \sigma_{21} \right)} \quad (6.12)$$

- **Componente  $i = 2$  y  $j = 2$ :**

$$(\hat{n}_2\sigma_{22})\hat{d}_2 = (\sin \delta_p \cos \phi_f \sigma_{22})(\cos \lambda_d \sin \phi_f - \sin \lambda_d \cos \delta_p \cos \phi_f)$$

Luego, al multiplicar y reagrupar.

$$(\hat{n}_2\sigma_{22})\hat{d}_2 = \cos \lambda_d (\sin \delta_p \sin \phi_f \cos \phi_f) + \sin \lambda_d (-\sin \delta_p \cos \delta_p \cos^2 \phi_f) \quad (**)$$

Aplicando la identidad trigonométrica expresada en (6.7) para los elementos subrayados en (\*\*), se tiene finalmente.

$$\boxed{(\hat{n}_2\sigma_{22})\hat{d}_2 = \cos \lambda_d \left( \sin \delta_p \frac{1}{2} \sin(2\phi_f) \right) + \sin \lambda_d \left( -\frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \cos^2 \phi_f \right)} \quad (6.13)$$

- **Componente  $i = 2$  y  $j = 3$ :**

$$(\hat{n}_2\sigma_{23})\hat{d}_3 = (\sin \delta_p \cos \phi_f \sigma_{23})(\sin \lambda_d \sin \delta_p)$$

Multiplicamos para obtener así.

$$\boxed{(\hat{n}_2\sigma_{23})\hat{d}_3 = \sin \lambda (\sin^2 \delta_p \cos \phi_f \sigma_{23})} \quad (6.14)$$

Con la Ecuación (6.14) hemos obtenido todas las componentes  $\tau(i = 2, j)$ , por lo que obtendremos ahora las componentes de  $(\hat{n}_3\sigma_{3j})\hat{d}_j$ , es decir aquellas en las que  $i = 3$ .

- **Componente  $i = 3$  y  $j = 1$ :**

$$(\hat{n}_3\sigma_{31})\hat{d}_1 = (\cos \delta_p\sigma_{31})(\cos \lambda_d \cos \phi_f + \sin \lambda_d \cos \delta_p \sin \phi_f)$$

Multiplicamos para obtener la expresión (6.15)

$$\boxed{(\hat{n}_3\sigma_{31})\hat{d}_1 = \cos \lambda_d(\cos \delta_p \cos \phi_f\sigma_{31}) + \sin \lambda_d(\cos^2 \delta_p \sin \phi_f\sigma_{31})} \quad (6.15)$$

- **Componente  $i = 3$  y  $j = 2$ :**

$$(\hat{n}_3\sigma_{32})\hat{d}_2 = (\cos \delta_p\sigma_{32})(\cos \lambda_d \sin \phi_f - \sin \lambda_d \cos \delta_p \cos \phi_f)$$

Al multiplicar se obtiene la Ecuación (6.16)

$$\boxed{(\hat{n}_3\sigma_{32})\hat{d}_2 = \cos \lambda_d(\sin \phi_f \cos \delta_p\sigma_{32}) + \sin \lambda_d(-\cos^2 \delta_p \cos \phi_f\sigma_{32})} \quad (6.16)$$

- **Componente  $i = 3$  y  $j = 3$ :**

$$(\hat{n}_3\sigma_{33})\hat{d}_3 = (\cos \delta_p\sigma_{33})(\sin \lambda_d \sin \delta_p)$$

Al multiplicar obtenemos la expresión (\*\*\*)

$$(\hat{n}_3\sigma_{33})\hat{d}_3 = \sin \lambda_d \underline{\sin \delta_p} \cos \delta_p \sigma_{33} \quad (***)$$

Ahora, al utilizar la identidad (6.7) en los términos subrayados de (\*\*\*), obtenemos la expresión (6.17).

$$\boxed{(\hat{n}_3\sigma_{33})\hat{d}_3 = \sin \lambda_d \frac{1}{2} \sin(2\delta_p)\sigma_{33}} \quad (6.17)$$

Teniendo así obtenidas, todas las componentes de  $\tau$  y dado que nuestro medio

es un Sólido de Poisson, se aumirá que  $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ ,  $\sigma_{13} = \sigma_{31}$  y  $\sigma_{23} = \sigma_{32}$ . Así, al sumar las expresiones (6.10) con (6.12), (6.11) con (6.15) y (6.17) con (6.16), sucesivamente se tiene.

• **Suma de  $(\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{d}_2$  con  $(\hat{n}_2\sigma_{21})\hat{d}_1$**

$$\begin{aligned} (\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{d}_2 + (\hat{n}_2\sigma_{12})\hat{d}_1 &= \cos \lambda_d (-\sin \delta_p \sin^2 \phi_f \sigma_{12}) + \sin \lambda_d \left( \frac{1}{4} \sin(2\delta_p) \sin(2\phi_f) \sigma_{12} \right) \\ &\quad + \cos \lambda_d (\sin \delta_p \cos^2 \phi_f \sigma_{21}) + \sin \lambda_d \left( \frac{1}{4} \sin(2\delta_p) \sin(2\phi_f) \sigma_{21} \right) \end{aligned}$$

Al sumar se obtiene

$$(\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{d}_2 + (\hat{n}_2\sigma_{12})\hat{d}_1 = \cos \lambda_d (-\sin \delta_p \sin^2 \phi_f \cos^2 \phi_f \sigma_{12}) + \sin \lambda_d \left( 2 \frac{1}{4} \sin(2\delta_p) \sin(2\phi_f) \sigma_{12} \right) \quad (\star)$$

Se ve que los elementos subrayados de  $(\star)$  corresponden a partes de la identidad trigonométrica mostrada en (6.8), por lo que al reemplazar se obtiene.

$$\boxed{(\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{d}_2 + (\hat{n}_2\sigma_{12})\hat{d}_1 = \cos \lambda_d (\sin \delta_p \cos(2\phi_f) \sigma_{12}) + \sin \lambda_d \left( \frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \sin(2\phi_f) \sigma_{12} \right)} \quad (6.18)$$

• **Suma de  $(\hat{n}_1\sigma_{13})\hat{d}_3$  con  $(\hat{n}_3\sigma_{31})\hat{d}_1$ :**

$$\begin{aligned} (\hat{n}_1\sigma_{13})\hat{d}_3 + (\hat{n}_3\sigma_{13})\hat{d}_1 &= (\sin \lambda_d \sin \phi_f \underline{(-\sin^2 \delta_p)} \sigma_{13}) + \cos \lambda_d (\cos \delta_p \cos \phi_f \sigma_{13}) \\ &\quad + \sin \lambda_d (\underline{\cos^2 \delta_p} \sin \phi_f \sigma_{13}) \end{aligned}$$

Al sumar se obtiene.

$$(\hat{n}_1\sigma_{13})\hat{d}_3 + (\hat{n}_3\sigma_{13})\hat{d}_1 = \sin \lambda_d \left( \sin \phi_f \underline{((- \sin^2 \delta_p) + \cos^2 \delta_p)} \sigma_{13} \right) + \cos \lambda_d (\cos \delta_p \cos \phi_f \sigma_{13}) \quad (\star\star)$$

Utilizando (6.8) en los términos subrayados de  $(\star\star)$ , se tiene.

$$\boxed{(\hat{n}_1\sigma_{13})\hat{d}_3 + (\hat{n}_3\sigma_{13})\hat{d}_1 = \sin \lambda_d (\sin \phi_f \cos(2\delta_p) \sigma_{13}) + \cos \lambda_d (\cos \delta_p \cos \phi_f \sigma_{13})} \quad (6.19)$$

- **Suma de  $(\hat{n}_2\sigma_{23})\hat{d}_3$  con  $(\hat{n}_3\sigma_{32})\hat{d}_2$ :**

Tenemos

$$\begin{aligned} (\hat{n}_2\sigma_{23})\hat{d}_3 + (\hat{n}_3\sigma_{32})\hat{d}_2 &= \sin \lambda (\sin^2 \delta_p \cos \phi_f \sigma_{23}) + \cos \lambda_d (\sin \phi_f \cos \delta_p \sigma_{23}) \\ &\quad + \sin \lambda_d (-\cos^2 \delta_p \cos \phi_f \sigma_{23}) \end{aligned} \quad (6.20)$$

Al sumar tenemos.

$$(\hat{n}_2\sigma_{23})\hat{d}_3 + (\hat{n}_3\sigma_{32})\hat{d}_2 = \sin \lambda_d \left( \underbrace{(-\cos^2 \delta_p + \sin^2 \delta_p)}_{(\star\star\star)} \cos \phi_f \sigma_{23} \right) + \cos \lambda_d (\sin \phi_f \cos \delta_p \sigma_{32})$$

Aplicamos la identidad (6.8) en los términos subrayados de  $(\star\star\star)$ , de donde se tiene.

$$\boxed{(\hat{n}_2\sigma_{23})\hat{d}_3 + (\hat{n}_3\sigma_{32})\hat{d}_2 = \sin \lambda_d (-\cos(2\delta_p) \cos \phi_f \sigma_{23}) + \cos \lambda_d (\sin \phi_f \cos \delta_p \sigma_{32})} \quad (6.21)$$

Ahora al sumar (6.9), (6.18), (6.19), (6.13) y (6.21) separando los términos en torno a  $\sin \lambda_d$  y a  $\cos \lambda_d$ , se obtiene.

$$\begin{aligned} \tau &= \left\{ -\frac{1}{2} \sin^2 \phi_f \sin(2\delta_p) \sigma_{11} + \frac{1}{2} \sin(2\phi_f) \sin(2\delta_p) \sigma_{12} + \sin \phi_f \cos(2\delta_p) \sigma_{13} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \cos^2 \phi_f \sin(2\delta_p) \sigma_{22} - \cos \phi_f \cos(2\delta_p) \sigma_{23} + \frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \sigma_{33} \right\} \sin \lambda_d \\ &\quad + \left\{ -\frac{1}{2} \sin(2\phi_f) \sin \delta_p \sigma_{11} + \cos(2\phi_f) \sin \delta_p \sigma_{12} + \cos \phi_f \cos \delta_p \sigma_{13} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2} \sin(2\phi_f) \sin \delta_p \sigma_{22} + \sin \phi_f \cos \delta_p \sigma_{23} \right\} \cos \lambda_d \end{aligned}$$

La que es en efecto la *Ecuación* (2.4), terminando la demostración de la expresión para  $\tau$

## 2. Obtención de $\sigma_n$ :

- **Componente  $i = 1$  y  $j = 1$ :**

Para comenzar se reemplazan los términos  $i = 1$  y  $j = 1$  de la *Ecuación* (6.4) en (6.6)

$$(\hat{n}_1\sigma_{11})\hat{n}_1 = (-\sin\delta_p \sin\phi_f\sigma_{11})(-\sin\delta_p \sin\phi_f)$$

Al multiplicar se obtiene la expresión (6.22)

$$\boxed{(\hat{n}_1\sigma_{11})\hat{n}_1 = \sin^2\delta_p \sin^2\phi_f\sigma_{11}} \quad (6.22)$$

- **Componente  $i = 1$  y  $j = 2$ :**

Se plantea de manera similar a la componente anterior.

$$(\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{n}_2 = (-\sin\delta_p \sin\phi_f\sigma_{12})(\sin\delta_p \cos\phi_f)$$

Multiplicando tenemos.

$$(\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{n}_2 = -\sin^2\delta_p \sin\phi_f \cos\phi_f \sigma_{12} \quad (\dagger)$$

Utilizamos la identidad trigonométrica (6.7) en  $(\dagger)$ , teniendo así.

$$\boxed{(\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{n}_2 = -\frac{1}{2}\sin^2\delta_p \sin(2\phi_f)\sigma_{12}} \quad (6.23)$$

- **Componente  $i = 1$  y  $j = 3$ :**

$$(\hat{n}_1\sigma_{13})\hat{n}_3 = (-\sin\delta_p \sin\phi_f\sigma_{13})(\cos\delta_p) \quad (\dagger\dagger)$$

Utilizamos la identidad trigonométrica (6.7) en  $(\dagger\dagger)$

$$\boxed{(\hat{n}_1\sigma_{13})\hat{n}_3 = -\frac{1}{2}\sin(2\delta_p) \sin\phi_f\sigma_{13}} \quad (6.24)$$

Terminando así, con las componentes del grupo  $(\hat{n}_1\sigma_{1j})\hat{n}_j$ .

- **Componente  $i = 2$  y  $j = 1$**

$$(\hat{n}_2\sigma_{21})\hat{n}_1 = (\sin \delta_p \cos \phi_f \sigma_{21})(-\sin \delta_p \sin \phi_f)$$

Al multiplicar tenemos.

$$(\hat{n}_2\sigma_{21})\hat{n}_1 = -\sin^2 \delta_p \sin \phi_f \cos \phi_f \sigma_{21} \quad (\dagger \dagger \dagger)$$

Utilizando la identidad trigonométrica (6.7) en  $(\dagger \dagger \dagger)$  tenemos.

$$\boxed{(\hat{n}_2\sigma_{21})\hat{n}_1 = -\frac{1}{2} \sin^2 \delta_p \sin(2\phi_f) \sigma_{21}} \quad (6.25)$$

- **Componente  $i = 2$  y  $j = 2$ :**

$$(\hat{n}_2\sigma_{22})\hat{n}_2 = (\sin \delta_p \cos \phi_f \sigma_{22})(\sin \delta_p \cos \phi_f)$$

Al multiplicar tenemos

$$\boxed{(\hat{n}_2\sigma_{22})\hat{n}_2 = \sin^2 \delta_p \cos^2 \phi_f \sigma_{22}} \quad (6.26)$$

- **Componente  $i = 2$  y  $j = 3$ :**

$$(\hat{n}_2\sigma_{23})\hat{n}_3 = (\underline{\sin \delta_p \cos \phi_f \sigma_{23}})(\underline{\cos \delta_p}) \quad (\dagger \dagger \dagger \dagger)$$

Reordenando los términos subrayados de  $(\dagger \dagger \dagger \dagger)$  y utilizando en estos la identidad (6.7) tenemos.

$$\boxed{(\hat{n}_2\sigma_{23})\hat{n}_3 = \frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \cos \phi_f \sigma_{23}} \quad (6.27)$$

Teniendo así todas las componentes del grupo  $(\hat{n}_2\sigma_{2j})\hat{n}_j$ .

- **Componente  $i = 3$  y  $j = 1$ :**

$$(\hat{n}_3\sigma_{31})\hat{n}_1 = (\underline{\cos \delta_p}\sigma_{31})(-\underline{\sin \delta_p} \sin \phi_f) \quad (\dagger \dagger \dagger \dagger \dagger)$$

Reordenando los términos subrayados de  $(\dagger \dagger \dagger \dagger \dagger)$  y utilizando en estos la identidad (6.7) tenemos.

$$\boxed{(\hat{n}_3\sigma_{31})\hat{n}_1 = -\frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \sin \phi_f \sigma_{31}} \quad (6.28)$$

- **Componente  $i = 3$  y  $j = 2$ :**

$$(\hat{n}_3\sigma_{32})\hat{n}_2 = (\underline{\cos \delta_p}\sigma_{32})(\underline{\sin \delta_p} \cos \phi_f) \quad (\dagger \dagger \dagger \dagger \dagger)$$

Reordenando los términos subrayados de  $(\dagger \dagger \dagger \dagger \dagger)$  y utilizando en estos la identidad (6.7) tenemos.

$$\boxed{(\hat{n}_3\sigma_{32})\hat{n}_2 = \frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \cos \phi_f \sigma_{32}} \quad (6.29)$$

- **Componente  $i = 3$  y  $j = 3$ :**

$$(\hat{n}_3\sigma_{33})\hat{n}_3 = (\cos \delta_p\sigma_{33})(\cos \delta_p)$$

Lo que al multiplicar queda en la expresión (6.30)

$$\boxed{(\hat{n}_3\sigma_{33})\hat{n}_3 = \cos^2 \delta_p \sigma_{33}} \quad (6.30)$$

Con lo que tendríamos obtenidos todos las componentes de  $\sigma_n$

A continuación se debe obtener la expresión general para  $\sigma_n$ , lo que se hace

sumando sus componentes de la forma.

$$\begin{aligned}\sigma_n = & (\hat{n}_1\sigma_{11})\hat{n}_1 + (\hat{n}_1\sigma_{12})\hat{n}_2 + (\hat{n}_1\sigma_{13})\hat{n}_3 + (\hat{n}_2\sigma_{21})\hat{n}_1 + (\hat{n}_2\sigma_{22})\hat{n}_2 + (\hat{n}_2\sigma_{23})\hat{n}_3 \\ & + (\hat{n}_3\sigma_{31})\hat{n}_1 + (\hat{n}_3\sigma_{32})\hat{n}_2 + (\hat{n}_3\sigma_{33})\hat{n}_3\end{aligned}$$

Teniendo también en cuenta, que al estar considerando un sólido de Poisson ( $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ ), las expresiones (6.23), (6.25), (6.24), (6.28), (6.27) y (6.29), serán sumados, teniéndose así.

$$\begin{aligned}\sigma_n = & \sin^2 \delta_p \sin^2 \phi_f \sigma_{11} - 2\frac{1}{2} \sin^2 \delta_p \sin(2\phi_f) \sigma_{12} - 2\frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \sin \phi_f \sigma_{13} \\ & + \sin^2 \delta_p \cos^2 \phi_f \sigma_{22} + 2\frac{1}{2} \sin(2\delta_p) \cos \phi_f \sigma_{23} + \cos^2 \delta_p \sigma_{33}\end{aligned}$$

Los que al multiplicarse resultan en

$$\begin{aligned}\sigma_n = & \sin^2 \delta_p \sin^2 \phi_f \sigma_{11} - \sin^2 \delta_p \sin(2\phi_f) \sigma_{12} - \sin(2\delta_p) \sin \phi_f \sigma_{13} \\ & + \sin^2 \delta_p \cos^2 \phi_f \sigma_{22} + \sin(2\delta_p) \cos \phi_f \sigma_{23} + \cos^2 \delta_p \sigma_{33}\end{aligned}$$

La que corresponde a la *Ecuación* (2.3), quedando así demostrada la expresión para  $\sigma_n$ .

□

---

# Bibliografía

- [1] Donald, L., Wells & Kevin, J., Coppersmith 1994. *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **Vol 84** pp. 974-1002, August 1994.
- [2] C., Nostro, L., Chiaraluce, M., Cocco, D., Baumont & O., Scotti 2005. *Coulomb stress changes caused by repeated normal faulting earthquakes during the 1997 Umbria-Marche (central Italy) seismic sequence*, *J. Geophys. Res.*, **110**(B05S20), doi:10.1029/2004JB003386.
- [3] Donald Turcotte & Gerald Schubert: *Geodynamics, Second Edition*
- [4] Wang, J., C. Xu, J. T. Freymueller, Z. Li, & W. Shen (2014). *Sensitivity of Coulomb stress change to the parameters of the Coulomb failure model: A case study using the 2008 M w 7.9 Wenchuan earthquake*, *J. Geophys. Res.Solid Earth*, **119**, (3371–3392), doi:10.1002/2012JB009860.
- [5] Bernd Schurr, G'unter Asch, Sebastian Hainzl, Jonathan Bedford, Andreas Hoechner, Mauro Palo, Rongjiang Wang, Marcos Moreno, Mitja Bartsch, Yong Zhang, Onno Oncken, Frederik Tilmann, Torsten Dahm, Pia Victor, Sergio Barrientos & Jean-Pierre Vilotte. *Gradual unlocking of plate boundary controlled initiation of the 2014 Iquique earthquake*, *Nature Letters*, **512**, doi:10.1038/nature13681.
- [6] W., Bloch, J., Kummerow, P., Salazar, P., Wigger & S.A., Shapiro *High-resolution image of the North Chilean subduction zone: seismicity, reflectivity and fluids*, *Geophys J. Int*, **197**(1744-1749), doi:10.1093/gji/ggu084.
- [7] Jian Lin., Ross S. Stein *Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults*, *J. Geophys. Res.*, **109**,B02303, doi:10.1029/2003JB002607.

- [8] Catalán, N., *Habilitación Profesional 2012: Geometría de la Zona de Falla Liquiñe-Ofqui, y su relación con la geometría de la subducción de Nazca bajo Sudamérica en el sur de Chile.*
- [9] Yoshimitsu Okada *Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space*, *Bulletin of the Seismological Society of America.*, **82**, N<sup>o</sup> 2, pp 1018-1040, April 1992
- [10] S. Ruiz, M., Metois, R., Grandin, E., Rivera, S., Leon, S., Cararo, A., Fuenzalida, M., Vallee, F., Leyton, J., Ruiz, C., Vigny, R., Madariaga & J., Campos *Los terremotos de Iquique 2014*, XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015
- [11] S. Ruiz, M. Metois, R. Grandin, A. Fuenzalida, J. Ruiz, F. Leyton, C. Vigny, R. Madariaga & J. Campos *Intense foreshocks and a slow slip event preceded the 2014 Iquique  $M_W$  8.1 earthquake*, *Science* **345**, 1165 (2014), doi:10.1126/science.1256074.
- [12] I.Korrat & R. Madariaga (1986). *Rupture of the Valparaiso (Chile) gap from 1971 to 1985*, *Laboratoire de Sismologie, Institut de Physique du Globe de Paris and UER Sciences Physiques de la Terre, Universite Paris VII, France.*
- [13] Michael R. Brudzinski, Clifford H. Thurber, Bradley R. Hacker & E. Robert Engdahl . *Global Prevalence of Double Benioff Zones*, *Science* **316**, 1472 (2007), doi:10.1126/science.1139204.
- [14] Mogi, K. *Source locations of elastic shocks in the fracturing process in rocks*, *Bull. Earthquake Res. Inst. Univ. Tokyo*, **46**, 1103 – 1125. (1968)
- [15] Wu, Y.-H., C.-C. Chen, and J. B. Rundle (2008), *Detecting precursory earthquake migration patterns using the pattern informatics method*, *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L19304, doi:10.1029/2008GL035215.
- [16] L.L. Romashkova, *Global-scale analysis of seismic activity prior to 2004 Sumatra-Andaman mega-earthquake*, *Tectonophysics* **470** (2009), doi:10.1016/j.tecto.2009.02.011.