

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Ciencias de la Tierra
con orientación en Sismología**

**Estimación de la deformación cortical del norte de Baja California a
partir del modelado de bloques elásticos**

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Alejandra Zamora Maciel

Ensenada, Baja California, México

2021

Tesis defendida por

Alejandra Zamora Maciel

y aprobada por el siguiente Comité

Dr. Carlos Eduardo Reinoza Gómez
Director de tesis

Dr. Javier Alejandro González Ortega

Dr. Nicolas Rascle



Dr. Javier Alejandro González Ortega
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Alejandra Zamora Maciel © 2021

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra sin el permiso formal y explícito del autor y director de la tesis

Resumen de la tesis que presenta Alejandra Zamora Maciel como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Sismología.

Estimación de la deformación cortical del norte de Baja California a partir del modelado de bloques elásticos

Resumen aprobado por:

Dr. Carlos Eduardo Reinoza Gómez

Director de tesis

Mediante el enfoque de modelo de bloques y utilizando velocidades geodésicas como datos de entrada, se estudiaron los efectos del sismo El Mayor-Cucapah Mw 7.2, en las fallas principales del norte de Baja California y del sur de California. A través de esta metodología se dividió el área de estudio en bloques, los cuales para fines del modelado, se representan por medio de polígonos que tienen como límites las fallas activas. Por medio del modelado de bloques elásticos se obtienen valores de rotación, deformación interna y acumulación de deformación intersísmica: tasas de deslizamiento, tasas de déficit de deslizamiento y valor de bloqueo. Para esto, se analizaron velocidades geodésicas para los periodos antes del sismo (1993-2010) y después a este (2013-2019). Debido a que la configuración de bloques tectónicos no tiene reglas definidas, primeramente se realizó un análisis previo por medio de deformación infinitesimal que permitiera caracterizar el área de estudio en términos de traslación, rotación y tensores de deformación. Con ayuda de este análisis y la distribución de las fallas principales, se dividió el norte de Baja California y el sur de California en cinco bloques tectónicos, y mediante técnicas estadísticas se eligió el mejor modelo que represente la zona de estudio. Los resultados muestran que los valores de rotación no sufrieron alteraciones debido al sismo, sin embargo en la deformación interna de los bloques se pueden observar cambios en las magnitudes y orientaciones en los ejes de deformación principales (extensión y/o compresión). Por su parte, las tasas de deslizamiento para ambos periodos, son mayores para las fallas Cerro Prieto e Imperial (32-35 mm/a), con respecto al resto de las fallas, donde se obtuvieron velocidades entre 1 y 12 mm/a. Para cuantificar la acumulación de la deformación, la tasa de déficit y el valor de bloqueo indican variaciones entre ambos periodos para las fallas Laguna Salada, Sierra Juarez y Cerro Prieto. Los resultados de este trabajo sugieren que el sismo tuvo efectos en las fallas cercanas al epicentro.

Palabras clave: Baja California, modelo de bloques, velocidades geodésicas

Abstract of the thesis presented by Alejandra Zamora Maciel as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Science with orientation in Seismology.

Estimation of crust deformation of northern Baja California using elastic block modeling

Abstract approved by:

Dr. Carlos Eduardo Reinoza Gómez
Thesis Director

Using the block modeling approach and employing geodetic velocities as input data, we study the El Mayor-Cucapah Mw 7.2 earthquake's effects on the northern Baja California and southern California's main faults. This methodology divides into blocks or polygons the area of study, using as limits the main faults. We want to obtain rotations values, intern deformation, and interseismic deformation accumulation (slip rate, deficit slip rate, and ϕ values) through this approach. We search for geodetic velocity covering 1993-2010 (before the seism) and 2013-2019 (after the seism). Because the blocks' construct does not follow any rule, we perform a preliminary analysis using infinitesimal deformation, this allows us to characterize the study area in terms of translation, rotation, and strain-rate. We apply statistical tests to choose the best model for northern Baja California and Southern California. The results show that the rotational values were not affected by the seism. However, the intern deformation shows variations in magnitudes and orientations on the extension and/or compression components. The interseismic deformation accumulation in terms of slip rate shows that the Imperial and Cerro Prieto faults have between 32-35 mm/yr, while the rest of the faults have between 1 and 12 mm/yr. We identify that Laguna Salada, Sierra Juarez, and Cerro Prieto faults show variations between the before and after periods through the deficit slip rate and the ϕ value, which indicates deformation accumulation. Through the results obtained, it is possible to indicate the influence of the El Mayor-Cucapah earthquake on the near faults to the epicenter.

Keywords: Baja California, block model, geodetic velocities

Dedicatoria

A Roberto Zamora y

Dora Luz Maciel

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por darme la oportunidad de completar mis estudios de maestría y permitirme crecer académica y profesionalmente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría. Número de becario: 897125.

Un agradecimiento muy especial a mi director de tesis Dr. Carlos Reinoza, por todo su tiempo, guía, dedicación y paciencia.

A mi comité de tesis Dr. Alejandro González y Dr. Nicolas Rascle, por cada pregunta y observaciones que me ayudaron a crecer y ser mejor.

A todos los profesores, por todo el conocimiento que me brindaron.

A mi familia por todo su apoyo siempre.

A mis viejos amigos y los nuevos, gracias por su apoyo, las nuevas historias y anécdotas.

A Erick García, por tu apoyo y ser mi compañero de aventuras.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español	ii
Resumen en inglés	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
Capítulo 1. Introducción	
1.1. Introducción y antecedentes	1
1.2. Justificación	2
1.3. Hipótesis	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
Capítulo 2. Área de estudio	
2.1. Marco tectónico	7
2.2. Características de las fallas del norte de Baja California	7
2.2.1. Falla Imperial y Cerro Prieto	7
2.2.2. Sistema de fallas Laguna Salada	8
2.2.3. Fallas Sierra Juárez y San Pedro Martír	8
2.2.4. Falla Agua Blanca	9
2.2.5. Sistema de fallas San Miguel-Vallecitos	9
Capítulo 3. Metodología	
3.1. Recopilación de datos	10
3.1.1. Información de las fallas del norte de Baja California	10
3.1.2. Velocidades geodésicas	11
3.1.2.1. Centro de Terremotos del sur de California	13
3.1.2.2. Red Geodésica del Noroeste de México	18
3.1.2.3. Red de las Américas	23
3.2. Modelado de velocidades geodésicas	27
3.2.1. Deformación infinitesimal a partir de polígonos triangulares	27
3.2.2. Modelo de bloques	31
3.2.2.1. Rotación de una placa	33
3.2.2.2. Bloqueo de una falla y deformación intersísmica	34
Capítulo 4. Análisis de deformación infinitesimal	
4.1. Triangulación sobre el área de estudio	36
4.2. Resultados del cálculo de deformación infinitesimal	39

Tabla de contenido (continuación)

4.2.1.	Traslación	39
4.2.2.	Rotación	41
4.2.3.	Tensores de deformación	44
4.3.	Discusión	47
Capítulo 5.	Modelación de la deformación del norte de Baja California	
5.1.	Datos empleados para el modelo de bloques	50
5.2.	Selección del mejor modelo	50
5.2.1.	Intervalo de confianza para la media de las velocidades geodésicas	51
5.2.2.	Estimación de chi-cuadrada	52
5.2.3.	Prueba de estadística F	54
5.3.	Modelo de bloques: antes y después del sismo El Mayor-Cucapah	55
5.3.1.	Campo de velocidades	55
5.3.2.	Tensores de deformación	59
5.3.3.	Rotación	61
5.3.4.	Acumulación de deformación	63
5.3.4.1.	Tasa de deslizamiento	63
5.3.4.2.	Déficit de tasa de deslizamiento y acoplamiento de las fallas	65
5.4.	Estimación del momento sísmico	67
5.5.	Discusión	68
Capítulo 6.	Conclusiones y recomendaciones	
Literatura citada		74

Lista de figuras

Figura	Página
1. Fallas activas del norte de Baja California y el sur de California. Localización de las fallas de acuerdo con las bases de datos de la Red Sísmica del CICESE y el Catálogo de fallas y pliegues cuaternarios del Servicio geológico de Estados Unidos.	4
2. Sismicidad histórica del norte de Baja California y el sur de California. Sismos de magnitud 5 y 7 desde 1891 al 2015. Mecanismos focales obtenidos del Catálogo Harvard CMT.	5
3. Mapa de sismicidad en el norte de Baja California, de acuerdo con el catálogo del USGS de 1934 a noviembre del 2020, se registraron 1525 sismos entre magnitud 4 y 7.	6
4. Distribución de las estaciones temporales y el catálogo SCEC para el período 1993-2010. En cuadrados de color naranja las estaciones del catálogo SCEC, mientras que los triángulos de color azul representan las estaciones temporales.	11
5. Vectores de velocidad de las estaciones empleadas para el periodo 1993-2010. En color rosa las velocidades de las estaciones del catálogo SCEC. En color azul las velocidades de las estaciones temporales.	12
6. Estaciones GNSS del período 2013-2019 de las redes de REGNOM y NOTA. En triángulos de color azul las estaciones de REGNOM, en rombos de color rojo las estaciones de NOTA.	12
7. Vectores de velocidad de las estaciones empleadas para el periodo 2013-2019. En color rojo las velocidades de las estaciones de NOTA. En color azul las velocidades de las estaciones de REGNOM.	13
8. Vector de traslación resultante de un área delimitada por tres estaciones GPS.	28
9. Esquema donde se ejemplifica la rotación que experimenta un área sobre la superficie terrestre y es calculada mediante la velocidad de tres estaciones GPS.	28
10. Representación de las cinco posibles resultados en una elipse de deformación y su respectiva representación en un mapa por medio de tensores.	30
11. Representación esquemática del modelo de bloques. Las líneas rojas indican las fallas y los puntos verdes los nodos que conforman las fallas.	32
12. Representación de una falla por medio de nodos para el programa TDEFNODE.	32
13. Esquema de la superficie de la Tierra donde se muestran dos placas tectónicas (A y B), donde su movimiento relativo puede ser descrito mediante una rotación (${}_B ROT_A$) alrededor de un polo de Euler (PE) el cual no necesariamente tiene que coincidir con el polo de rotación de la Tierra (PN: polo Norte). Los círculos rojos representan las trayectorias que seguirían diversos puntos de la placa A en su movimiento relativo con respecto a la placa B. Tomada de Alfaro <i>et al.</i> (2013).	33
14. Triangulación propuesta en el norte de Baja California de acuerdo con la distribución de las estaciones geodésicas temporales y las fallas principales.	37
15. Vectores de velocidad de las estaciones temporales a utilizar para el análisis de deformación infinitesimal. Marco de referencia ITRF 2008.	37

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
16. Vectores de traslación del arreglo triangular realizado en el norte de Baja California. La magnitud del vector corresponde a la velocidad promedio de las tres estaciones GPS en mm/a, en el marco de referencia ITRF 2008.	40
17. Rotación general del norte de Baja California, la escala representa una rotación de $10^\circ/\text{Ma}$. Se aprecia que hacia el noreste se tienen valores superiores a $10^\circ/\text{Ma}$. El abanico de color amarillo representa el sentido de rotación horaria, mientras que el de color naranja representa rotación antihoraria,	41
18. Rotación del norte de Baja California: (a) representa la rotación sobre el área de Mexicali (triángulos 1-5) y (b) la rotación para los arreglos triangulares del 6 al 19. El abanico de color amarillo representa el sentido de rotación horaria, mientras que el de color naranja representa rotación antihoraria, el color azul indica la incertidumbre del valor de rotación.	43
19. Representación de los tensores de deformación sobre la triangulación realizada en el norte de Baja California.	45
20. Tensores de deformación sobre el norte de Baja California, de acuerdo a los cálculos realizados predomina la componente de extensión.	46
21. Diferentes configuraciones para las estaciones RLOV, CIC1 y FILO. El inciso a) corresponde a la configuración original utilizada en la Figura 17 y Fig 18(b).	48
22. Agrupación en regiones de los tensores de deformación para el norte de Baja California, de acuerdo a su orientación y sentido de extensión o contracción.	49
23. Distintas configuraciones de los bloques tectónicos. Las líneas rojas representan las fallas y las líneas negras las pseudofallas.	53
24. Velocidades empleadas para los periodos: a) 1993-2010 y b) 2013-2019. Vectores en color verde representan las velocidades empleadas en el modelo. Vectores de color azul, velocidades excluidas de SCEC y NOTA. Vectores en color rojo, velocidades excluidas de REGNOM y temporales.	56
25. Campo de velocidades intersísmico para los periodo: a) 1993-2010 y b) 2013-2019. Velocidades con respecto a la placa Norteamérica.	58
26. Tensores de deformación de los cinco bloques tectónicos estudiados con TDEFNODE para antes y después del sismo de El Mayor-Cucapah.	60
27. Rotación de los bloques para los periodos 1993-2010 (antes del sismo) y 2013-2019 (después del sismo). El abanico de color gris representa la incertidumbre del valor de rotación. El abanico de color azul representa el valor de rotación.	62
28. Tasas de deslizamiento para las fallas del norte de Baja California y el sur de California para los periodos 1993-2010 y 2013-2019.	64

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
29. Déficit de tasa de deslizamiento y valor de acoplamiento para las fallas del norte de Baja California y sur de California para el periodo 1993-2010 (anterior al sismo).	66
30. Déficit de tasa de deslizamiento y valor de acoplamiento para las fallas del norte de Baja California y sur de California para el periodo 2013-2019 (posterior al sismo).	67

Lista de tablas

Tabla	Página
1. Velocidades del catálogo de SCEC para el área de estudio. Nota: Las velocidades y los errores asociados están en mm/a.	14
2. Velocidades de estaciones temporales para el período 1993.1-2010.1. Nota: Las velocidades y errores asociados están en mm/a.	20
3. Velocidades de las estaciones de REGNOM para el periodo 2013-2019. Nota: Las velocidades y errores asociados a están en mm/a.	21
4. Velocidad de las estaciones empleadas de la red NOTA, estas se encuentran referidas a norteamérica estable. Nota: Las velocidades y los errores asociados a están en mm/a.	23
5. Velocidades de las estaciones usadas para el análisis preliminar. Las velocidades se encuentran en el marco de referencia ITRF 2008 y con respecto a la placa Norteamérica, así como el periodo de datos.	38
6. Velocidades de traslación para los arreglos triangulares en el norte de Baja California.	40
7. Resultados de rotación para la triangulación sobre el norte de Baja California.	42
8. Resultado de los tensores de deformación del norte de Baja California calculados a partir del arreglo de triangulación.	45
9. Configuración de los bloques tectónicos de acuerdo a las fallas y al estudio preliminar.	49
10. Intervalos de confianza al 95 % para las velocidades GPS, en los periodos antes y después del sismo El Mayor-Cucapah del 2010.	52
11. Características de los modelos realizados: grados de libertad, número de datos y de parámetros.	53
12. Selección del mejor modelo de acuerdo a la prueba de la estadística F para el periodo 1993-2010.	54
13. Valores de NRMS y WRMS de acuerdo al número de observaciones por bloque y periodo.	57
14. Valores de los tensores de deformación para los períodos 1993-2010 y 2013-2019. . . .	59
15. Valores de rotación de los bloques para ambos períodos.	61
16. Tasas de deslizamiento para las fallas del norte de Baja California y el sur de California para los periodos 1993-2010 y 2013-2019.	64
17. Déficit en la tasa de deslizamiento y grado de acoplamiento (bloqueo) para las fallas del norte de Baja California y el sur de California, para antes (1993-2010) y después (2013-2019) del sismo del El Mayor-Cucapah.	65
18. Momento sísmico anual, acumulado y magnitud momento para las fallas Cerro prieto, Imperial y San Miguel.	68
19. Comparación de las tasas de deslizamiento de las fallas del norte de Baja California y el sur de California entre los resultados obtenidos en este trabajo de tesis y los reportado por diversos autores.	70

20.	Comparación de momento sísmico acumulado y magnitud momento en las fallas Cerro prieto, Imperial y San Miguel.	71
-----	--	----

Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción y antecedentes

Una parte importante para comprender la mecánica de los límites de placas, es medir los movimientos que tienen lugar a lo largo de ellos. Con el desarrollo de técnicas de medición precisas, en especial de los métodos de la geodesia espacial, y más notablemente del Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System - GPS), ha hecho posible la obtención de datos para la estimación de tasas de deformación durante años y décadas, además de poder estimar la deformación acumulada y liberada antes, durante y después de los terremotos. Los datos geodésicos se han vuelto cruciales para nuestra comprensión de la tectónica de placas, procesos sísmicos así como estimar el peligro de los terremotos (Shen *et al.*, 2011; Zeng y Shen, 2014).

El desarrollo del Sistema de Posicionamiento Global, y su posterior implementación en estudios científicos relacionados a las Ciencias de la Tierra, en las décadas de los ochenta y noventa, permitió un avance sustancial en la generación de conocimiento relacionado con la deformación de la corteza (Murray-Moraleda, 2009). Principalmente en el reconocimiento y la exploración detallada de los procesos dinámicos que ocurren en zonas de límites de placas, así como donde ocurre deformación intraplaca (Bürgmann y Thatcher, 2013).

A partir de las técnicas de medición geodésicas, se ha proporcionado un medio para el estudio de la deformación intersísmica, con la cual se puede determinar la dinámica de los límites de placas y fallas activas, a través de la determinación de tasas de deformación (*strain-rate*), tasas de deslizamiento y rotación. Una forma de estudiar la deformación intersísmica es por medio del modelo de bloques, este enfoque divide el área de interés en polígonos, los cuales están delimitados por las fallas activas presentes. Este método emplea velocidades geodésicas para determinar la deformación interna de cada polígono o bloque, su rotación, así como la acumulación de deformación intersísmica de las fallas.

El modelo de bloques ha sido empleado en diversas zonas donde se produce interacción de placas tectónicas, tales como zonas de subducción como Sumatra (Prawirodirdjo *et al.*, 1997), Nueva Zelanda (Wallace *et al.*, 2004), Chile (Klein *et al.*, 2018), Centroamérica (Ellis *et al.*, 2019), y la zona de Cascadia (McCaffrey, 2013); además de zonas con límites transformantes como el sur de California, Estados Unidos (McCaffrey, 2005; Meade y Hager, 2005).

Particularmente en el norte de Baja California, se han realizado diversos trabajos implementando la metodología del modelo de bloques a partir de velocidades geodésicas. Bennett *et al.* (1996), calculó tasas de

deslizamiento para las fallas activas del norte de Baja California y el sur de California, mediante este trabajo pudo determinar que las fallas Cerro Prieto e Imperial acumulan el 86 % del movimiento entre las placas Norteamérica y Pacífico. Dixon *et al.* (2002), concentra su estudio en el sistema de fallas San Miguel-Vallecitos y la falla Agua blanca, estimando tasas de deslizamiento entre 4-8 mm/a para este conjunto de fallas. Por su parte McCaffrey (2005), a través de la incorporación de datos geodésicos, sismológicos y geológicos, propone un modelo de bloques para la región del noroeste de Estados Unidos y el norte de Baja California. A través de dichos bloques, se caracteriza la deformación activa de esta región, sobresaliendo el algoritmo matemático que permite la formación y análisis de los bloques. Por último, en un trabajo más reciente, Wetmore *et al.* (2019) construye un modelo de bloques para determinar la tasa de deslizamiento de la falla Agua blanca. Wetmore y colaboradores concluyen que entre la falla Agua blanca y San Miguel-Vallecitos se acumula entre 6-7mm/a de movimiento relativo.

El 4 de abril del 2010, ocurre el sismo El Mayor-Cucapah de Mw 7.2 cercano a la ciudad de Mexicali, evidenciando la compleja red de fallas presente en el norte de Baja California, además, derivado de este sismo se activaron fallas hasta el momento desconocidas como la falla Indiviso (Hauksson *et al.*, 2011; González-Ortega *et al.*, 2014). Es por ello que a través del modelo de bloques es posible estudiar el efecto que produjo este sismo en términos de deformación en la zona de estudio y en las fallas presentes.

En este trabajo de tesis, por medio de datos geodésicos y empleando el enfoque de modelo de bloques, se analizarán los periodos intersísmicos 1993-2010 (antes del sismo) y 2013-2019 (después del sismo), de los cuales se caracterizará el norte de Baja California en términos de rotación, deformación interna de los bloques y acumulación de deformación. Por medio de este análisis se podrá determinar la influencia del sismo de El Mayor-Cucapah en las fallas del norte de Baja California.

1.2 Justificación

Este trabajo se enfocará en la parte norte de Baja California, para el cual se construirá un modelo de bloques usando principalmente como datos de entrada las estaciones de monitoreo continuo y por campaña de la Red Geodésica del Noroeste de México (REGNOM). Esto permitirá obtener un modelo de bloques para los periodos intersísmicos de 1993-2010 y 2013-2019, este último con mayor número de datos, con respecto a los trabajos realizados previamente. Con ello, este trabajo contribuirá a la obtención de un modelo que refleje la cinemática actual del norte de Baja California, además de tener una mejor resolución de los procesos tectónicos y un panorama general de lo que acontece en las zonas de fallas del norte de Baja California.

1.3 Hipótesis

El sismo El Mayor-Cucapah interrumpió el ciclo intersísmico en las fallas del norte de Baja California, modificando sus tasas de deslizamiento. A través de la configuración del bloques, permitirá comparar los periodos 1993-2010 y 2013-2019, estableciendo semejanzas y diferencias entre ambos periodos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Generar un modelo de bloques para los periodos intersísmicos 1993-2010 y 2013-2019 para el norte de Baja California empleando datos geodésicos y sismológicos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Recopilar datos geodésicos y sismológicos de las fallas encontradas en la región norte de Baja California.
- Verificar de forma preliminar la deformación empleando el método de arreglos triangulares.
- Construir un modelo de bloques elástico para el norte de Baja California.
- Calcular las tasas de deslizamiento para las fallas activas de la región y la deformación de los bloques tectónicos.

Capítulo 2. Área de estudio

La interacción entre la placa Norteamérica y Pacífico da como resultado un complejo régimen tectónico, el cual afecta particularmente el norte de Baja California (en el lado mexicano) y el sur de California (en el lado estadounidense). Dicho límite entre placas genera una secuencia de fallas transcurrentes y centros de dispersión desde el Golfo de California hasta la depresión Salton, derivando en sistemas de fallas en su mayoría de tipo lateral derecho, así como en sismicidad para el norte de Baja California y California (Frez y González, 1991).

De acuerdo con Suárez-Vidal *et al.* (1991), la actividad sismotectónica del norte Baja California (Figura 1) se puede clasificar en tres grupos; el primer grupo, ubicado hacia el noreste, concentra las fallas ubicadas en el área de Mexicali y el Valle Imperial, estas fallas son Imperial, Cerro Prieto y el sistema de fallas Laguna Salada; el segundo grupo, en la parte central, se conforma por las fallas San Pedro Martír y Sierra Juárez, estas fallas están relacionadas con el Escarpe principal del Golfo; por último, en el tercer grupo se encuentran aquellas fallas que cortan o cruzan la península como la falla Agua blanca así como el sistema San Miguel-Vallecitos.

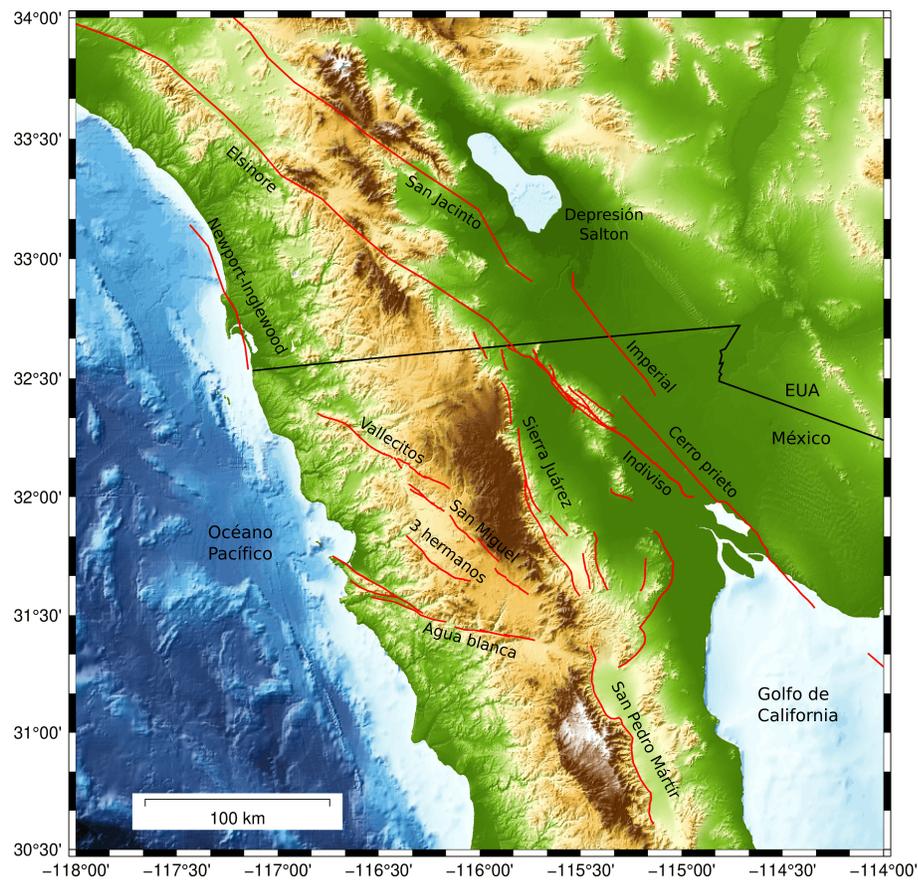


Figura 1. Fallas activas del norte de Baja California y el sur de California. Localización de las fallas de acuerdo con las bases de datos de la Red Sísmica del CICESE y el Catálogo de fallas y pliegues cuaternarios del Servicio geológico de Estados Unidos.

La sismicidad en la región es mayor hacia el noreste de la zona de estudio, donde se ubican las fallas del primer grupo descrito anteriormente. De acuerdo con la Figura 2, que muestra la sismicidad histórica del norte de Baja California y el sur de California (Felzer y Cao, 2008; Hutton *et al.*, 2010; González-Ortega *et al.*, 2018), los sismos de mayor magnitud ocurren cerca de la interacción entre las placas Pacífico y Norteamérica, en específico en las fallas que cruzan el Valle de Mexicali y el Valle Imperial. De acuerdo con los mecanismos focales del catálogo Harvard CMT (Ekström *et al.*, 2012), el área de estudio se caracteriza por la ocurrencia de sismos con componentes transformantes.

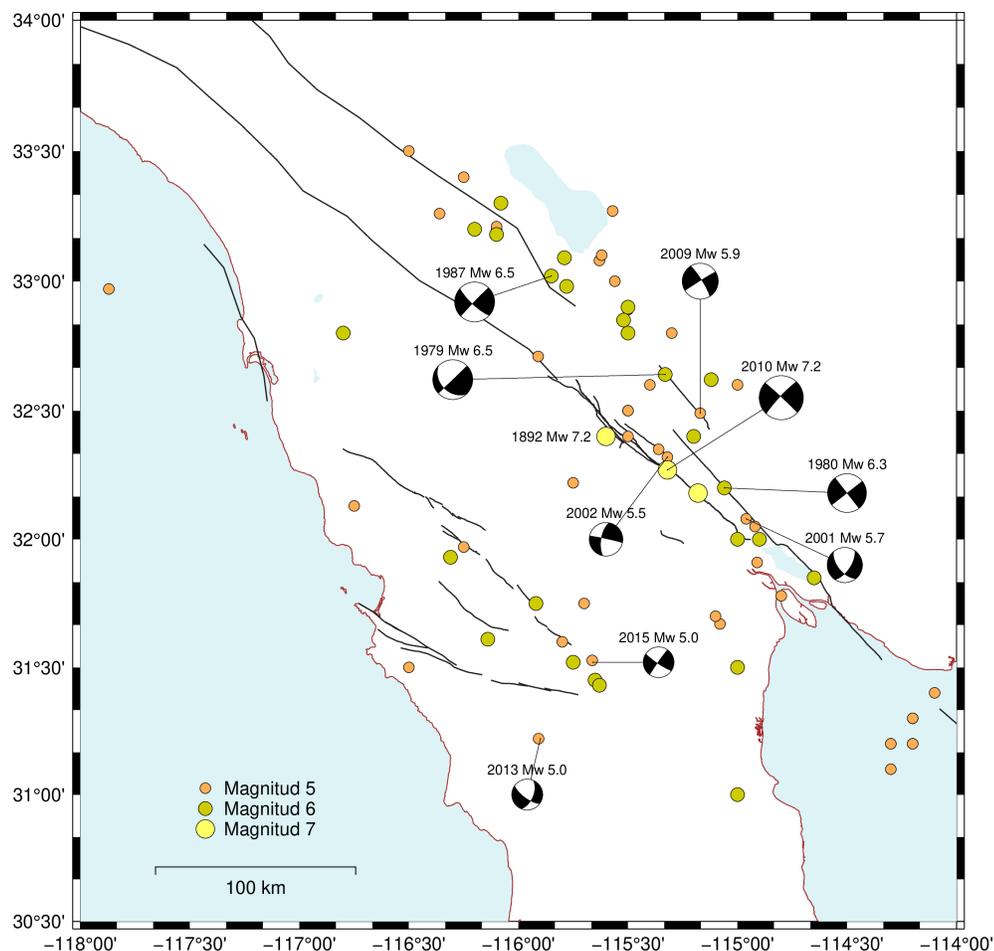


Figura 2. Sismicidad histórica del norte de Baja California y el sur de California. Sismos de magnitud 5 y 7 desde 1891 al 2015. Mecanismos focales obtenidos del Catálogo Harvard CMT.

De acuerdo con el catálogo instrumental del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), desde 1934 (inicio del catálogo) hasta noviembre del 2020 se registraron más de 1500 sismos entre magnitud 4 y 7 (USGS, 2020). Se observa que la sismicidad se concentra en la zona de Mexicali y el Valle Imperial, donde en 1934 ocurrió el primer sismo de magnitud 7 en registrarse, mientras que el 4 de abril del 2010, ocurre el sismo de Mw 7.2, conocido como el sismo de El Mayor-Cucapah, haciendo referencia a la zona donde se encuentran las fallas que activaron dicho suceso (Fletcher *et al.*, 2014).

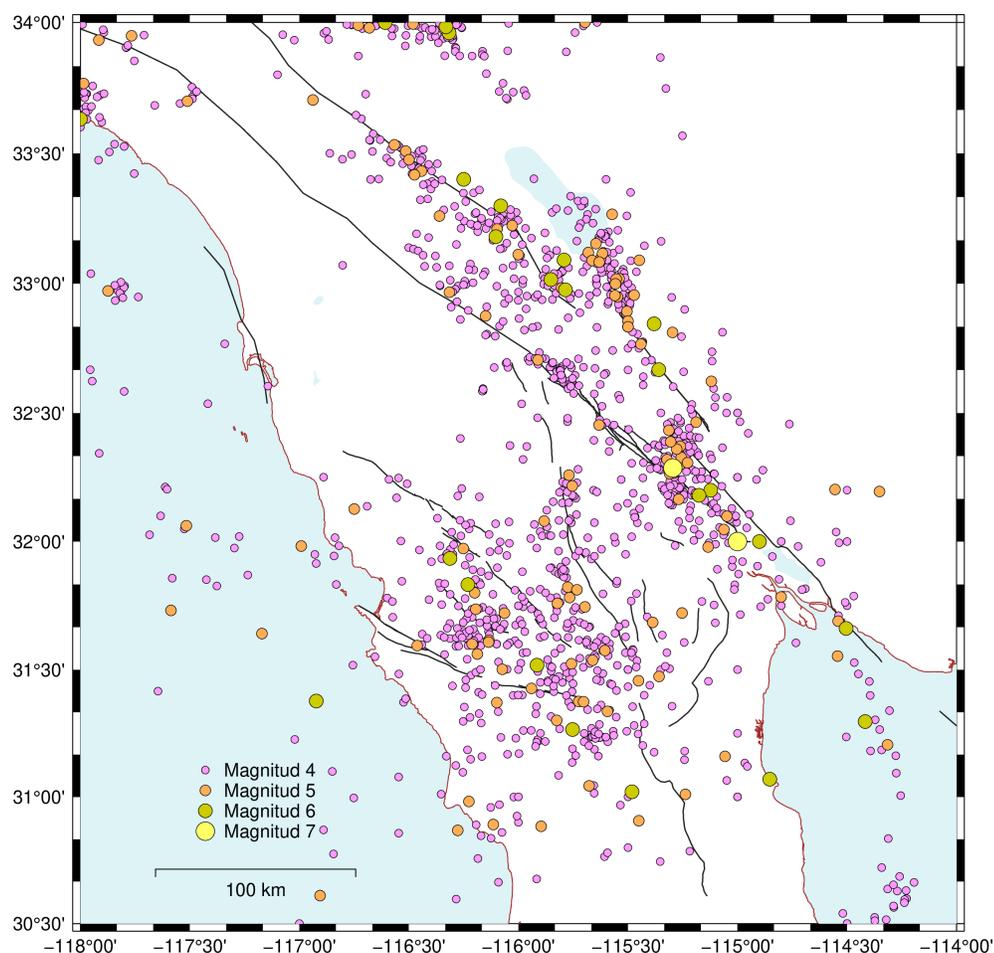


Figura 3. Mapa de sismicidad en el norte de Baja California, de acuerdo con el catálogo del USGS de 1934 a noviembre del 2020, se registraron 1525 sismos entre magnitud 4 y 7.

Otro hecho relevante en la sismicidad del norte de Baja California es el enjambre sísmico ocurrido entre 1954 y 1956, este fenómeno tuvo lugar en el sistema de fallas San Miguel-Vallecitos (Frez *et al.*, 2000). Durante este período se registraron seis sismos de $M_L \geq 6$, el sismo de mayor magnitud registrado fue de 6.8 (Tracy *et al.*, 1976). Un fenómeno similar tuvo lugar el 17 de agosto del 2020, de acuerdo con el reporte sismológico de RESNOM, se produjo un sismo de magnitud 5.1 en el área del sistema de fallas San Miguel-Vallecitos, antes del sismo principal se registró un sismo premonitor de 4.7 y dos semanas después del evento sísmico, RESNOM registró alrededor de 200 réplicas (González-Huizar y Fletcher, 2020).

Como se puede observar, el norte de Baja California presenta una alta actividad sísmica, sin embargo, dentro del conjunto de fallas presentes resalta la falla Agua Blanca. A diferencia de las fallas anteriormente descritas, Agua blanca resalta por su falta de sismicidad, de acuerdo con el catálogo instrumental, se observa actividad cerca de la falla más no se tiene evidencia que dichos sismos sean producto de su movimiento. Sin embargo se considera que la falla Agua blanca es una estructura que transfiere el movimiento del límite

entre la placa Pacífico y Norteamérica a los rangos peninsulares del norte de Baja California (Gold *et al.*, 2020).

2.1 Marco tectónico

De acuerdo con Axen y Fletcher (1998), el movimiento relativo entre la placa Norteamérica y Pacífico se distribuye a través de tres dominios: el primero, es el dominio San Andrés, el cual se extiende desde el punto triple de Mendocino hasta el norte de las sierras Transversas; el segundo dominio es el *big bend*, este se extiende desde las sierras Transversas hasta el delta del Colorado y el alto golfo de California; por último el dominio del golfo de California, el cual inicia en la desembocadura del delta del Colorado hasta la dorsal Alarcón en la boca del golfo (Fletcher y Spelz, 2009; Cambrón Rosas, 2017).

La zona de estudio de este trabajo de tesis, se ubica dentro del dominio *big bend*, el cual debe su nombre a un segmento de la falla San Andrés donde esta se dobla y cambia a un rumbo noroeste a sureste. Se caracteriza por ser un dominio de transición, donde la cizalla transpresiva del dominio San Andrés cambia a cizalla transtensiva en el golfo de California. La distribución de la deformación está caracterizada por fallas dextrales con compresión norte-sur y rotación horaria (Axen y Fletcher, 1998; Cambrón Rosas, 2017).

Las fallas Imperial, Cerro Prieto y el sistema de fallas Laguna Salada, representan la región sur del *big bend*, el cual transfiere aproximadamente el 90% de la cizalla producto del movimiento relativo entre las placas Norteamérica y Pacífico. Mientras que el sistema de fallas de San Miguel-Vallecitos y Agua blanca conforman el límite sur del *big bend*, que en conjunto acomodan aproximadamente el 10% de la cizalla restante y transfieren la cizalla a las fallas del borde continental (Hernández Flores, 2015; Velázquez Zaguilan, 2020).

2.2 Características de las fallas del norte de Baja California

2.2.1 Falla Imperial y Cerro Prieto

La falla Cerro Prieto se extiende desde la cuenca Wagner en la parte norte del golfo de California hasta el volcán Cerro Prieto. Esta falla es de tipo lateral derecho y tiene una orientación hacia el noroeste. A la falla Cerro prieto se le asocian los sismos de 1852, 1975 y 1981 de magnitud entre 6 y 7, el de 1934 de magnitud 7.1, el sismo El golfo de 1966 de magnitud 6.3 y el temblor Victoria en 1980 de magnitud 6.1.

Mientras tanto la falla Imperial se ubica a 13 km al este de la falla Cerro Prieto, y se extiende por el valle Imperial en Estados Unidos por aproximadamente 70 km, esta falla conecta las cuencas Cerro Prieto y Brawley (Suárez-Vidal *et al.*, 2008).

La actividad sísmica en esta zona esta dominada por enjambres que ocurren en el parte sur de la falla Imperial y en el norte de la falla Cerro Prieto, lugar donde estas dos fallas se sobreponen y dan origen al centro de dispersión de Cerro Prieto, sin embargo los sismos de mayor magnitud ocurren lejos de esta zona de sobreposición (Frez y González, 1991). En este sistema de falla se concentra el aproximadamente el 84 % del movimiento relativo entre las placas Norteamérica y Pacífico (Velázquez Zaguilan, 2020).

2.2.2 Sistema de fallas Laguna Salada

La falla Laguna Salada y la falla de bajo ángulo Cañada David controlan la cuenca Laguna Salada. En la parte norte de la cuenca se encuentra la falla Laguna Salada, tiene una extensión aproximada de 57 km y un rumbo de 135°N , tiene echado hacia el oeste y su buzamiento varía entre $60\text{-}75^{\circ}$. En la parte sur de la cuenca, se encuentra la falla de bajo ángulo Cañada David, esta falla tiene una traza curvilínea y se extiende entre 55 y 60 km, se denomina de bajo ángulo ya que esta falla tiene un buzamiento menos a 20° (Fletcher y Spelz, 2009; Hernández Flores, 2015).

La falla Borrego es la primera falla al este de la falla Laguna Salada, se extiende por 27 km con un rumbo promedio de 310°N y buza hacia el noreste. En su extremo norte la falla se bifurca en dos ramas, la primera sigue en dirección a la Laguna Salada y es una falla de bajo ángulo denominada Paso Inferior, la otra rama continua hacia el norte y sigue siendo la falla Borrego.

La falla Pescadores es la falla mejor expuesta en superficie y sin embargo es la más inaccesible. Tiene una longitud aproximada de 25 km y mantiene un rumbo de 330°N . La falla Cucapah define el margen este de la sierra Cucapah, se extiende por 27 km aproximadamente con un rumbo promedio NO-SE. Por último la falla Cañon Rojo, la cual es una falla normal con orientación norte-sur, forma una intersección en forma de T con el segmento sur de la falla Laguna Salada y presenta un importante desplazamiento vertical.

2.2.3 Fallas Sierra Juárez y San Pedro Martír

En el norte de Baja California, las fallas Sierra Juárez y San Pedro Martír definen el Escarpe Principal del Golfo, el cual marca el límite entre la depresión tectónica del rift del Golfo de California y la corteza

continental que no ha sido afectada por la extensión en Baja California. El escarpe de San Pedro Mártir (el cual contiene a la falla San Pedro Mártir) es el bloque de piso de un sistema de falla normal con deslizamiento al este, mientras que el escarpe de la Sierra Juárez (que contiene a la falla del mismo nombre) se formó en el bloque de techo de un sistema de falla normal de bajo ángulo con deslizamiento al oeste (Díaz-Torres *et al.*, 2012).

2.2.4 Falla Agua Blanca

La falla Agua Blanca se encuentra localizada hacia el sur de la ciudad de Ensenada, Baja California. Esta falla cruza transversalmente la península, se extiende por 130 km desde el oceano Pacífico hasta el paso San Matías, en conjunción al norte con la falla San Pedro Martír. La falla de Agua Blanca consiste de cuatro segmentos, cada uno con una longitud entre 20-30 km, presenta movimiento lateral derecho y normal (Allen *et al.*, 1960; Ortega-Rivera *et al.*, 2018).

La falla Agua Blanca presenta abánicos aluviales del cuaternario que indican actividad relativamente joven (Suárez-Vidal *et al.*, 1991). Sin embargo, debido a la escasa actividad sísmica se cree que esta falla se encuentra “abandonada” y la deformación migró al sistema de fallas San Miguel-Vallecitos. O bien, la falla Agua Blanca se encuentra “bloqueada” y continúa acumulando deformación para ser liberada en un evento sísmico (Dixon *et al.*, 2002).

2.2.5 Sistema de fallas San Miguel-Vallecitos

El sistema de fallas San Miguel-Vallecitos se localiza hacia el sureste de la ciudad de Ensenada hacia el valle de Ojos Negros; este sistema se conforma por las fallas San Miguel, Ojos Negros, Tres Hermanos y Vallecitos. Estas fallas son de tipo lateral derecho y se piensa que puede ser una extensión de la zona de falla de Rose Canyon que pasa por la zona metropolitana de San Diego, sin embargo existen diferencias estructurales entre estas zonas de fallas (Hirabayashi *et al.*, 1996). De acuerdo con Frez *et al.* (2000), en esta región se concentra una alta actividad microsísmica comparable con la que se registra en el sistema de fallas de San Andrés.

Capítulo 3. Metodología

La metodología empleada consiste en dos fases: primero, se realizó una recopilación de datos, la cual consistió en recolectar información de las fallas del norte de Baja California (sección 3.1.1), así como de datos de velocidades geodésicas de las redes de monitoreo presentes en el área de estudio (sección 3.1.2).

En la segunda fase se llevó a cabo el modelado de las velocidades geodésicas (sección 3.2) para determinar la distribución de la deformación en el norte de Baja California, para esto, primero se realizó el cálculo de deformación infinitesimal mediante una triangulación de estaciones GNSS, para después realizar el modelado de bloques empleando un programa especializado.

3.1 Recopilación de datos

3.1.1 Información de las fallas del norte de Baja California

En esta primera fase se recolectaron datos que ayudarán a restringir el modelo de bloques, tales como profundidad de bloqueo, tasa de deslizamiento, así como ángulo y dirección de buzamiento. Esta información se extrajo de los siguientes artículos: Suárez-Vidal *et al.* (1991); Mueller y Rockwell (1995); Bennett *et al.* (1996); Frez *et al.* (2000); Cruz-Castillo (2002); McCaffrey (2005); Meade y Hager (2005); Fletcher y Spelz (2009); Hauksson *et al.* (2011); Díaz-Torres *et al.* (2012); Ortega-Rivera *et al.* (2018); Wetmore *et al.* (2019) y Velázquez Zaguilan (2020).

Además, con la base de datos de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM, 2019), se vectorizaron las fallas presentes en nuestra zona de estudio, y se extrajeron las coordenadas latitud y longitud, las cuales se usaron para la configuración de los bloques.

Debido a que los procesos tectónicos no se restringen solamente al norte de Baja California, se extendió la zona de estudio hacia las fallas del sur de California. Por lo que se incluyeron las fallas San Jacinto, Elsinore y Newport-Inglewood. A partir del catálogo de fallas y pliegues de Estados Unidos (U.S. Geological Survey y California Geological Survey, 2015) se vectorizaron dichas fallas para incluirlas en el estudio del modelo de bloques.

3.1.2 Velocidades geodésicas

Las velocidades que se emplearon en este proyecto corresponden a los períodos intersísmicos 1993-2010 y 2013-2019, los cuales marcan un antes y después del evento sísmico El Mayor-Cucapah (4 de abril del 2010). Para el primer período (Figura 4 y Figura 5) se emplearon datos de velocidad de estaciones temporales (González-Ortega *et al.*, 2018) y del catálogo del Centro de Terremotos del sur de California (Southern California Earthquake Center-SCEC, (Shen *et al.*, 2011)), en total para este periodo se recolectaron 191 estaciones.

Para el periodo 2013-2019 (Figura 6 y Figura 7) se usaron datos de velocidad de las estaciones de REGNOM (REGNOM, 2017) y de estaciones temporales (González-Ortega *et al.*, 2014), ambas procesadas en el laboratorio de Geodesia de REGNOM. También se emplearon datos de velocidad de la red de las Américas (Networks of the Americas-NOTA), anteriormente red Observatorio del límite de placas (Plate Boundary Observatory-PBO). Para el periodo posterior al sismo se obtuvieron en total 186 estaciones.

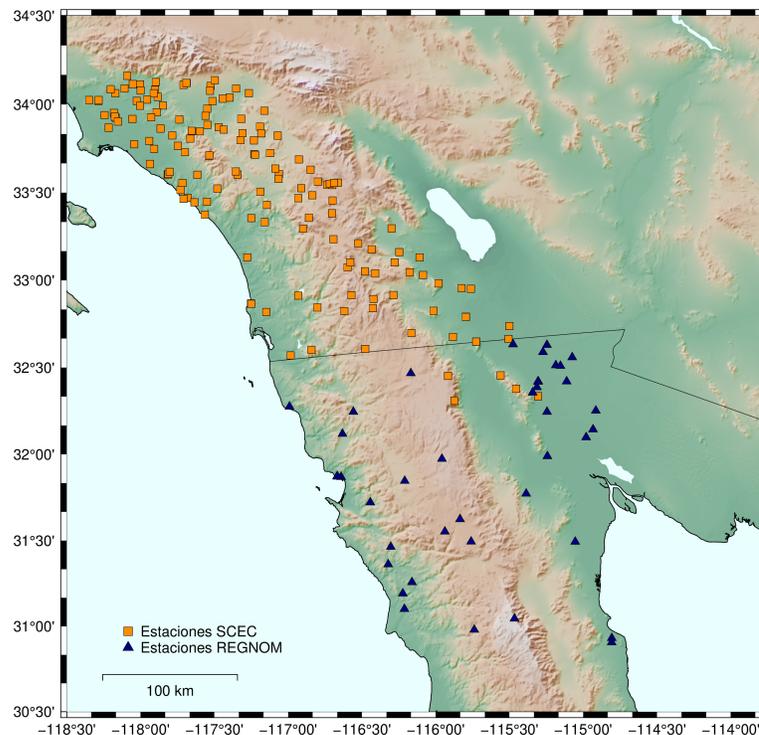


Figura 4. Distribución de las estaciones temporales y el catálogo SCEC para el período 1993-2010. En cuadrados de color naranja las estaciones del catálogo SCEC, mientras que los triángulos de color azul representan las estaciones temporales.

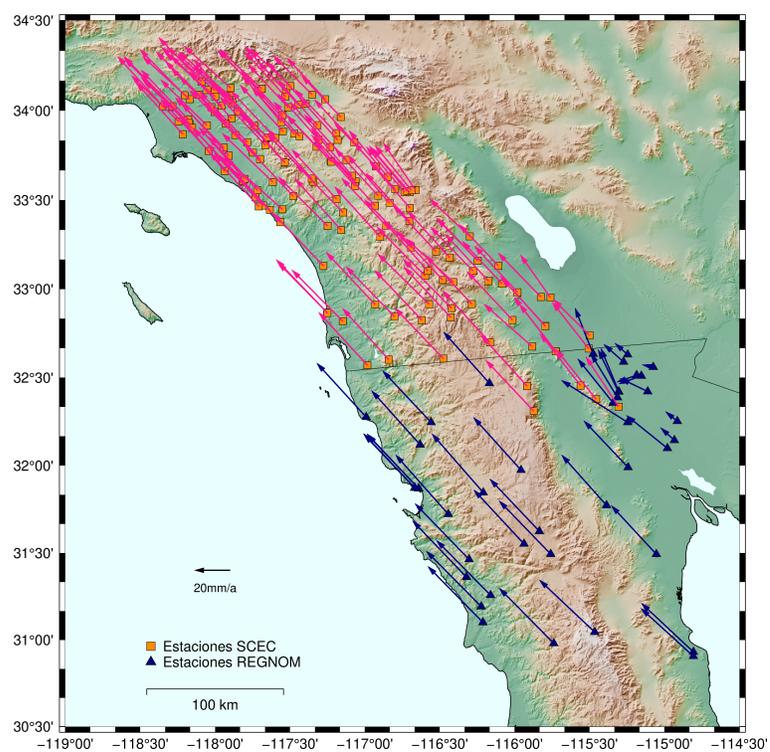


Figura 5. Vectores de velocidad de las estaciones empleadas para el periodo 1993-2010. En color rosa las velocidades de las estaciones del catálogo SCEC. En color azul las velocidades de las estaciones temporales.

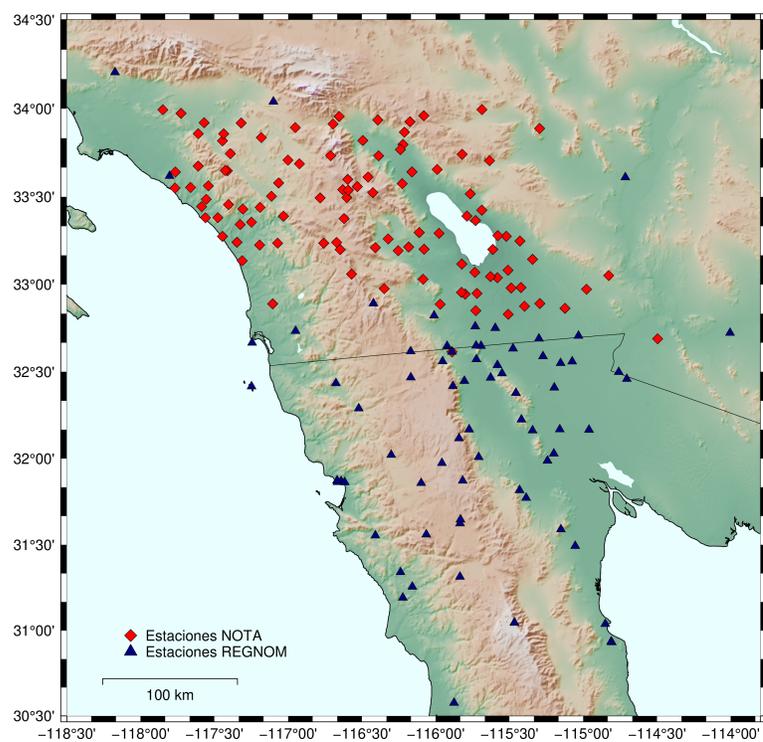


Figura 6. Estaciones GNSS del período 2013-2019 de las redes de REGNOM y NOTA. En triángulos de color azul las estaciones de REGNOM, en rombos de color rojo las estaciones de NOTA.

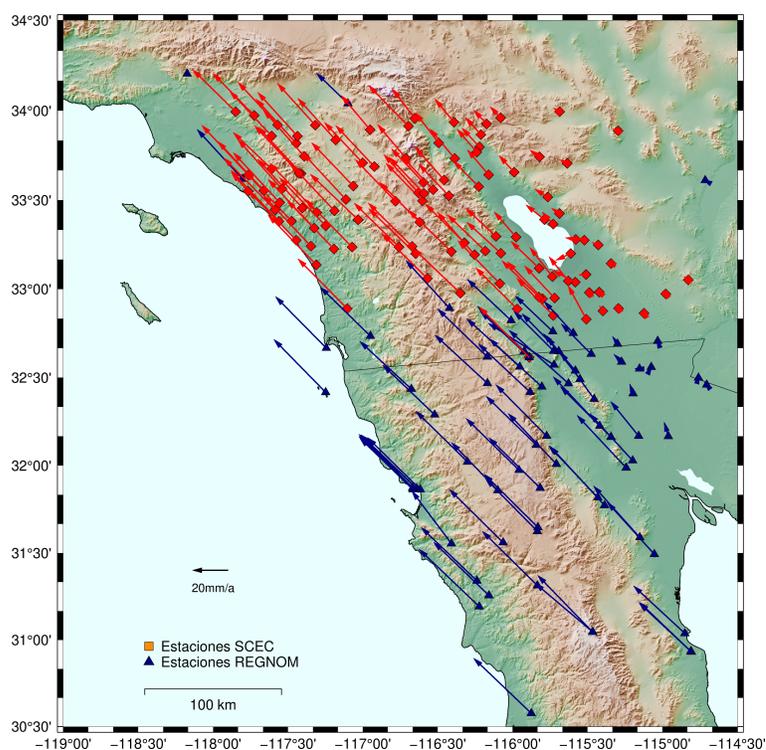


Figura 7. Vectores de velocidad de las estaciones empleadas para el periodo 2013-2019. En color rojo las velocidades de las estaciones de NOTA. En color azul las velocidades de las estaciones de REGNOM.

3.1.2.1 Centro de Terremotos del sur de California

Las velocidades geodésicas recolectadas del Centro de Terremotos del sur de California (Southern California Earthquake Center-SCEC) son parte del proyecto denominado Modelo del movimiento de la corteza (Crustal Motion Model-CMM). Bajo este proyecto, se agruparon en un mismo catálogo datos de velocidades GPS de estaciones temporales y continuas, trilateración, así como de interferometría de muy larga base (Very Long Base Interferometry-VLBI) de diversas instituciones que operaron en el sur de California entre 1970 y 2004 (Shen *et al.*, 2011).

Las velocidades GPS se obtuvieron a partir de estaciones que operaron entre 1986-2004, estas se encuentran referidas al marco de referencia de norteamérica estable. Algunas de las instituciones que realizaron campañas o instalaron estaciones permanentes son: el USGS, el Servicio Geodésico Nacional (National Geodetic Survey-NGS), el departamento de transporte de California, la Oficina del Programa Geotérmico de la Marina de los Estados Unidos y el Laboratorio de propulsión a chorro (Jet Propulsion Laboratory-JPL). En la Tabla 1 se describen las velocidades que se utilizaron de este catálogo.

Tabla 1. Velocidades del catálogo de SCEC para el área de estudio. Nota: Las velocidades y los errores asociados están en mm/a.

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Vn	1 σ Vn	Ve	1 σ Ve
a0149	-118.091	34.161	-24.1	2.9	24.8	2.9
a225	-115.725	32.648	-20.6	1.9	26.6	2
a819	-117.547	33.884	-24.2	0.9	26.1	1
a1103	-115.883	32.675	-27.1	2.8	23.9	2.9
a1108	-116.693	33.234	-26.2	1	27	1.1
a1109	-116.247	33.16	-23	1.3	23.6	1.3
a1109	-116.247	33.16	-22.9	0.9	24	1
a24	-115.306	32.334	-18.5	1.6	28.3	1.9
a6106	-117.396	34.038	-21.5	2.3	23.6	1.4
A586	-116.836	33.484	-23.5	1.1	26.9	1.1
ANZA	-116.662	33.556	-18.1	3.2	26.6	2.7
ARLI	-117.471	33.871	-23.8	1	25.8	1.1
AZU1	-117.897	34.126	-26.1	0.9	23.5	0.9
BACH	-117.062	33.605	-24.7	1	25.8	1.4
BILL	-117.065	33.578	-22.7	0.8	25.4	0.8
BORD	-115.506	32.664	-20.5	1.1	26.1	1.1
BRYN	-117.266	34.063	-21.3	1.5	23.2	1.8
CARY	-116.736	33.545	-21.4	1	25.5	1.1
CAZO	-116.015	32.825	-25.6	1	27.4	1
CLAR	-117.709	34.11	-23.1	0.9	22.8	0.9
CRAV	-116.701	33.543	-21.2	1	24.6	1
CVHS	-117.902	34.082	-29	1	25	1
DASH	-117.086	33.636	-23.1	1	26.9	1.1
DIXI	-115.796	32.791	-25.4	1	28.2	1
DOUB	-117.123	33.724	-23.7	1.4	25.5	1.8
ELPH	-116.175	33.045	-24.3	1	26.3	1.1
EWPP	-117.526	34.104	-23.3	2.3	25.6	2.4
FATL	-117.161	33.964	-22	2	23.2	1.4
FIER	-115.56	32.454	-22.8	1.3	29.3	1.2
FIPK	-115.981	32.982	-24.2	1	26	1
HOWY	-116.718	33.55	-21.4	1	25.5	1

Tabla 1 continuación

Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn	Estación
IDA	-117.323	33.798	-24.1	1	25.3	1.2
JASO	-116.799	33.562	-23.1	0.9	26.3	1.4
JUR3	-117.443	34.032	-22.8	0.9	24.3	0.9
L589	-115.761	32.951	-17	1.5	24.2	1.5
LAST	-117.309	33.837	-23	1	25.9	1.1
LIMP	-117.549	33.975	-23.9	1.1	25.7	1.1
LONG	-118.003	34.112	-26.8	0.9	24.5	0.9
M586	-116.689	33.555	-20.5	1.1	25.2	1.2
MATH	-117.437	33.857	-23.5	0.8	25.6	0.8
MENI	-117.229	33.718	-24.7	1	25.7	1.3
METZ	-117.232	33.796	-22.6	1.2	25.5	1.1
MICR	-117.191	33.874	-23.3	1.1	24.6	1.3
MLFP	-117.318	33.918	-22.1	1	25.4	1.1
MOOR	-117.224	33.714	-24.7	1.1	26	1.5
MOSS	-116.699	33.455	-22.6	1	26	1.2
MVFD	-116.525	33.211	-24.3	1.1	26.2	1.1
NELS	-117.071	33.823	-22.5	1	24.1	1.3
NORC	-117.56	33.935	-21.9	2.9	26.4	2.8
O225	-115.726	32.648	-23.5	1.1	30.5	1.1
OAKD	-117.598	33.847	-24.9	0.9	26.4	1
OCOT	-115.796	32.79	-24.1	0.9	26.8	0.9
OTLL	-116.109	33.131	-22.1	1	23.3	1
PEGL	-116.299	33.296	-22.6	1.1	21	1.3
PLYC	-116.927	33.688	-23.4	1	24.7	1.4
PMOB	-116.859	33.357	-25	1	26.7	1
PPBF	-117.182	33.836	-21.6	1	24	1
PSEB	-117.689	34.121	-23.7	1.1	22.3	1.1
PUER	-115.456	32.377	-22.6	1.4	28.1	1.3
R293	-116.848	33.63	-21.8	1.1	26.1	1.1
RDEC	-116.932	33.468	-23.8	1.2	26.7	1.2
RTHS	-117.353	34.089	-21.8	1	21.9	1

Tabla 1 continuación

Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn	Estación
RTOP	-116.911	33.524	-24.4	1	26.6	1.4
SANO	-117.513	34.018	-22.4	1	24.2	1.1
SDG6	-116.703	33.382	-24.6	1	27	1
SIER	-117.653	33.849	-24.8	0.9	27.1	0.9
SJUA	-117.738	33.914	-25.2	0.9	25.9	0.9
SNTZ	-117.884	34.042	-21.9	1.4	24.5	1.2
SPMS	-117.849	33.993	-24.9	1	26	1
SR28	-117.654	33.85	-25.4	1	27.1	1
STEE	-117.53	34.077	-23	1.2	25.3	1.2
SUP	-115.825	32.955	-24.1	1.1	24.8	1
T124	-115.5	32.738	-20.5	0.9	20.4	0.9
THRT	-117.497	34.136	-22.5	1.7	20.8	1.9
USGC	-116.085	33.03	-22.4	1.1	23.9	1.1
WCHS	-117.911	34.062	-28.7	1.1	25.7	1.1
WILN	-116.434	33.177	-23.6	1.1	26.1	1.2
YAKM	-116.278	33.102	-24	1.1	24.8	1.4
a0301	-117.565	33.375	-26.9	1	29.6	1
a0302	-117.249	33.355	-27.7	1.3	27.6	1.5
a0303	-117.159	33.332	-26	1.3	29	1.4
a0702	-118	34.078	-28	1.1	24.6	1.1
a07CI	-118.18	33.951	-26.5	1.4	27.8	1.5
a07DI	-118.171	34.063	-26.3	1.5	24	1.4
a1101	-116.983	32.569	-27.4	1.1	29.8	1.2
a1102	-116.477	32.607	-27.3	1	28.7	1.1
a1106	-116.802	32.844	-27.4	1	28.3	1
a1107	-117.277	33.13	-28.5	1	29.8	1.1
a1202	-117.68	33.469	-27.3	0.9	29.5	1
a56Z	-118.216	33.868	-26.2	1.2	29.1	1.2
BEE1	-117.7	33.729	-25.9	1.1	27.9	1
BELA	-117.48	33.523	-27.5	2	29.2	2.2
BL28	-117.663	33.806	-25.7	1.1	27.2	1

Tabla 1 continuación

Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn	Estación
BREA	-117.891	33.955	-23.7	2.2	26.5	2.2
CCCS	-117.865	33.863	-25.9	1	25.4	1.1
CHIQ	-117.615	33.601	-28.5	2.6	27.4	2.9
CILA	-115.917	32.451	-26.2	1.4	29	1.1
DANA	-117.709	33.464	-27.7	0.9	30.6	1
DBLO	-115.873	32.309	-27	1.4	28.7	1.1
DSHS	-118.349	34.024	-25.4	1.1	28	1.1
ELSI	-117.343	33.602	-26.2	1.1	27.1	1.2
FIFT	-117.909	33.748	-26.5	1.1	29.6	1.2
FLOO	-118.043	33.774	-27	0.9	29.1	1
FVPK	-117.936	33.662	-25.4	1	30.9	1
GRAN	-116.48	33.051	-25.7	1	27.5	1.2
HOLP	-118.168	33.924	-27.2	1	26	0.9
HOLY	-118.175	33.93	-27.7	1	28.1	1
JACU	-116.165	32.698	-26.7	1.1	29.2	1.1
JEFF	-118.203	34.085	-25.2	1.2	25.8	1.1
KITE	-117.716	33.554	-27.8	1.1	30.3	1
LAKE	-117.355	33.62	-25	1.1	28	1.2
LANW	-118.055	33.917	-26	0.9	25.8	1
LASE	-117.942	33.793	-27.3	1	28.2	1
LEMO	-117.785	33.824	-27	1.9	28.5	2.4
LM28	-117.747	33.765	-27.4	1.1	27.6	1.1
LPHS	-117.957	34.027	-28.5	1	28.2	1
MHMS	-118.244	33.939	-26.5	1.3	25.8	1.3
MONP	-116.422	32.892	-27.3	0.8	27.6	0.8
NIGU	-117.73	33.514	-27.4	0.9	30.7	0.9
OBSV	-116.427	32.84	-26.4	2.7	28.4	3.5
OTAY	-116.841	32.601	-26	1.5	28.9	1.2
PMHS	-118.154	33.903	-27.1	1	26.9	1
PSWB	-118.053	34.114	-25.7	1.3	24.2	1.6
RHCL	-118.026	34.019	-25.9	1.1	26	1.1

Tabla 1 continuación

Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn	Estación
ROSA	-117.189	33.505	-25.1	1.2	27.9	1.1
SAN1	-117.535	33.709	-25.6	1.3	28.2	1.4
SCMS	-117.635	33.444	-28.2	1	30.7	1
SD15	-116.598	33.074	-27.2	1.2	27.6	1.7
SD16	-116.41	33.039	-26.6	1.8	24.6	2.3
SD17	-117.148	32.818	-28.6	1.2	28.9	1.5
SD18	-116.931	32.912	-27.6	1	29.5	1.1
SD21	-116.619	32.824	-26.6	0.9	28.1	1
SD34	-116.899	33.294	-25.6	1.5	28.2	2
SD35	-116.571	32.914	-29	1.1	28.5	1.2
SGHS	-118.109	34.089	-24	1.2	24.1	1.2
SIO2	-117.252	32.867	-28.7	0.8	29.9	0.9
SIO3	-117.25	32.865	-27.8	0.7	28.3	0.8
SJOA	-117.816	33.602	-27.9	1.2	30.4	1.3
SNHS	-117.929	33.927	-26.2	1.1	26.8	1.1
SNJO	-117.812	33.606	-28.6	1.1	30	1.1
STAG	-116.286	32.915	-26	1	27.4	1.2
STGO	-117.534	33.711	-25.2	0.9	28.4	1
TALE	-117.551	33.448	-32.3	2.7	29	2.9
TRAK	-117.803	33.618	-25.7	0.8	29.1	0.9
USCO	-118.286	34.019	-26.8	2.5	27.3	2.4
USC1	-118.285	34.024	-27.3	0.8	28	0.9
VOLC	-116.579	33.102	-24.8	1	27.9	1.3
WORK	-118.003	33.992	-24.7	0.9	24.9	1
YUNG	-117.145	33.43	-26.7	1	27.3	1

3.1.2.2 Red Geodésica del Noroeste de México

La Red Geodésica del Noroeste de México (REGNOM), es una red de estaciones del Sistema Global de Navegación Satelital (Global Navigation Satellite System-GNSS) que forma parte de la Red Sismológica del Cen-

tro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE)(Vidal-Villegas *et al.*, 2018). REGNOM tiene vínculos de colaboración con agencias como el Consorcio Universidad NAVSTAR (University NAVSTAR Consortium-UNAVCO), el Servicio Sismológico Nacional (SSN-UNAM) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey-USGS).

Actualmente, REGNOM esta conformada por 29 estaciones de monitoreo continuo distribuidas por el norte de Baja California. El objetivo principal de esta red es el estudio sismotectónico y sismogeodésico del norte de Baja California, así como complementar las mediciones sísmicas de velocidad y aceleración (?).

En las Tablas 2 y 3 se muestran los datos de velocidad de las estaciones empleadas para el estudio.

Tabla 2. Velocidades de estaciones temporales para el período 1993.1-2010.1. Nota: Las velocidades y errores asociados están en mm/a.

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Vn	1 σ Vn	Ve	1 σ Ve
ASA1	-115.24583	32.6292	-7.22	0.6	6.5	0.6
CADG	-116.32204	31.36111	-30.31	0.4	31.74	0.4
CAOC	-116.64121	31.86801	-28.82	0.2	30.34	0.2
CD14	-115.11191	32.41999	-15.55	0.4	7.46	0.4
CIC1c	-116.66576	31.87068	-28.72	0.2	30.24	0.2
CJGG	-116.64121	31.86801	-29.02	0.2	30.84	0.2
COLO	-116.212	31.10075	-30.97	0.4	31.6	0.4
COND	-116.1687	32.46687	-25.84	0.4	28.99	0.4
CP12	-114.98049	32.0977	-23.02	1	18.52	1
CP13	-114.93372	32.14306	-7.8	0.6	7.1	0.4
CPEI	-114.9144	32.25142	-6.68	0.8	5.5	0.8
CPIG	-115.30468	32.41927	-10.07	0.4	24.42	0.4
CPVO	-115.3075	32.41827	-11.47	0.2	23.82	0.2
ELAL	-116.20986	31.84532	-28.89	0.4	33.1	0.4
ELCH	-115.05426	31.49242	-25.37	0.4	27.44	0.4
FI18	-115.27296	32.58826	-11.13	0.6	9.91	0.6
FI27	-115.18591	32.51263	-11.24	0.6	-3.92	0.6
FILO	-116.44314	31.72095	-29.64	0.4	33.47	0.4
INDE	-115.93764	31.5515	-28.23	0.2	30.42	0.2
JAMU	-115.75979	31.49303	-29.03	0.4	30.06	0.2
LACH	-115.15425	32.50867	-12.74	0.4	-4.53	0.4
LLCO	-116.16073	31.25665	-30.52	0.2	30.99	0.2
LN03	-115.31404	32.38675	-15.08	0.4	24.82	0.4
LOSA	-116.30442	31.46253	-30.39	0.4	31.43	0.4
LPUR	-115.3429	32.35574	-19.89	0.2	24.83	0.2
MAYO	-115.24281	31.98839	-24.87	0.6	26.3	0.6
MELR	-115.73855	30.97965	-30.75	0.4	31.16	0.4
MEX1c	-115.47571	32.63299	-10.24	0.4	25.87	0.4
MONT	-115.07492	32.55861	-6.22	0.4	1.35	0.4
MORR	-116.99104	32.27446	-27.76	0.6	30.44	0.4
RAYO	-115.95769	31.97299	-26.74	0.2	29.72	0.2
RLOV	-116.6317	32.11776	-27.26	0.4	30.43	0.4
RM01	-116.66793	31.87179	-28.62	0.2	30.54	0.2
RM02	-116.66759	31.87166	-28.62	0.2	30.34	0.4
SAIS	-116.22307	31.19148	-30.94	0.4	31.31	0.4
SALD	-115.38678	31.77177	-25.33	0.4	28.44	0.4
SFB2	-114.80684	30.9305	-29.28	0.8	27.46	0.8
SFBC	-114.8071	30.90561	-29.49	0.2	26.96	0.2
SM01	-115.83481	31.62364	-27.91	0.2	29.48	0.2
SPMXc	-115.46586	31.04504	-31.11	0.2	29.37	0.2
VA01	-116.55786	32.24472	-27.33	0.4	29.11	0.4
VM15	-115.24551	32.24463	-37.25	1.4	23.74	1.4

Tabla 3. Velocidades de las estaciones de REGNOM para el periodo 2013-2019. Nota: Las velocidades y errores asociados a están en mm/a.

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn
ALAX	-115.7083	32.00749	-27.1	0.08	28.55	0.07
BLYT	-114.71485	33.61041	-1.25	0.01	0.74	0.01
CAOC	-116.64122	31.86801	-31.17	0.15	30.21	0.15
CARX	-115.15899	32.16744	-15.69	2.05	19.44	1.96
CICT	-116.66739	31.87114	-27.84	0.08	28.61	0.08
CJGG	-116.64122	31.86801	-31.19	0.24	30.13	0.24
COND	-116.16871	32.46688	-29.47	0.06	27.22	0.06
CORX	-117.24819	32.41537	-29.12	0.18	29.8	0.18
CRFP	-117.09969	34.03905	-17.66	1.43	17.03	1.44
DAEX	-115.41921	32.2245	-26.13	0.01	27.72	0.01
ELCH	-115.05428	31.49243	-26.5	0.09	29.29	0.08
FI18	-115.27296	32.58826	-4.39	0.33	4.34	0.38
GCYN	-115.77328	32.16706	-28.54	0.08	28.91	0.08
GOLD	-116.88925	35.42516	-4.03	0.01	6.7	0.01
IID2	-115.0318	32.70617	-0.39	0.01	1.19	0.01
IIOR	-116.66603	31.86248	-29.91	0.22	29.02	0.22
IMIE	-116.61634	31.86186	-29.68	0.02	29.3	0.02
JARX	-115.58153	32.53786	-17.92	0.06	20.87	0.06
LASA	-115.62735	32.46544	-33.51	0.25	30.06	0.25
LPUR	-115.3429	32.35573	-6.09	0.09	20.1	0.09
MAY3	-115.24262	31.98667	-27.57	0.08	29.49	0.08
MBIG	-115.19597	32.40891	-1.98	0.06	5.46	0.06
MEXI	-115.47571	32.63299	-16.88	0.01	16.98	0.01
MONP	-116.42235	32.89194	-24.43	0.01	26.79	0.01
MONT	-115.07492	32.5586	0.37	0.19	0.71	0.21
MXCT	-115.7241	32.57107	-37	0.21	23.46	0.21
NAYX	-115.29551	32.32428	-9.89	0.01	22.46	0.01
OJOX	-116.09858	31.85726	-26.13	0.12	27	0.12
PO03	-114.00495	32.72254	-0.27	0.01	0.73	0.01
PO66	-116.16979	32.61653	-27.93	0.01	27.04	0.01

Tabla 3 continuación

Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn	Estación
P473	-116.94952	32.73378	-28.23	0.01	27.66	0.01
P475	-117.24394	32.6664	-28.61	0.01	29	0.01
P481	-116.01079	32.82224	-24.67	0.01	23.2	0.01
P494	-115.73207	32.75965	-21.06	0.01	20.03	0.01
P496	-115.59596	32.75063	-16.41	0.01	17.97	0.01
P500	-115.29993	32.69005	-2.87	0.01	4.23	0.01
P796	-114.75935	32.49787	0.54	0.01	1.8	0.01
PALX	-116.06379	31.55912	-30.26	0.01	29.97	0.01
PB1X	-115.69244	32.64794	-20.68	0.02	21.23	0.02
PB2X	-115.88961	32.61392	-27.45	0.02	25.93	0.02
PCDA	-115.80544	32.44678	-29.54	0.12	27.16	0.13
PHJX	-115.55045	32.49006	-18.59	0.01	24.01	0.01
PJZX	-115.88373	32.41701	-29.06	0.01	27.19	0.01
PLCX	-116.15808	31.25521	-31.18	0.08	30.1	0.08
PLPR	-115.95315	32.55974	-29.74	0.1	27.12	0.11
PLPX	-115.15128	31.5886	-26.07	0.01	29.01	0.01
PLTX	-115.4309	31.81634	-27.7	0.01	29.23	0.01
PSTX	-115.83544	31.31312	-30.92	0.01	30.53	0.01
PTAX	-115.45634	32.37749	-19.01	0.01	26.56	0.01
PTEX	-116.52124	32.28845	-29.1	0.01	27.92	0.01
PUAS	-115.34361	32.16158	-28.45	0.08	28.39	0.08
QUEX	-115.15323	32.54921	-2.78	0.01	0.11	0.01
RACX	-116.30134	32.0202	-29.1	0.13	28.57	0.13
RAYO	-115.9577	31.97299	-29.79	0.05	29.16	0.05
RITX	-114.96103	32.16563	-2.32	2.18	8.04	2.29
RM01	-116.66793	31.87179	-30.22	0.31	29.05	0.3
RM02	-116.66759	31.87165	-30.18	0.35	30.2	0.35
RSLX	-115.84163	32.11602	-28.23	0.19	27.46	0.19
SAIS	-116.22307	31.19149	-33.87	0.32	32.34	0.31
SALD	-115.38678	31.77177	-30.52	0.21	33.2	0.21
SFB2	-114.80685	30.9305	-29.09	0.33	27.95	0.31

Tabla 3 continuación

Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn	Estación
SFPX	-114.85059	31.03756	-28.82	0.09	26.71	0.08
SGLG	-115.72638	32.64927	-22.31	0.06	22.34	0.06
SIVX	-115.81676	31.87109	-28.82	0.14	28.32	0.13
SLRX	-114.70489	32.45804	-1.34	0.06	1.64	0.06
SM01	-115.83481	31.62365	-29.25	0.2	29.71	0.2
SM07	-115.83166	31.64596	-30.14	0.17	29.95	0.16
SP2X	-115.46602	31.04607	-32.4	0.07	27.48	0.07
SPMX	-115.46587	31.04505	-30.89	0.04	31.93	0.04
SQNX	-115.87569	30.57612	-32.4	0.16	31.02	0.15
STMX	-116.40873	31.55268	-22.37	0.09	29.79	0.09
SVTX	-116.23845	31.33978	-31.36	0.09	30.05	0.09
TJIG	-116.67621	32.43378	-29.01	0.05	26.95	0.05
TRAK	-117.80344	33.61794	-25.63	0.01	27.93	0.01
TSEFX	-114.81064	30.93393	-29.08	0.07	27.17	0.07
YUHG	-115.92224	32.64757	-26.28	0.04	25.43	0.04
YUMX	-115.1992	32.02768	-24.17	0.01	26.4	0.01

3.1.2.3 Red de las Américas

La red de las Américas (Network of the Americas-NOTA), es una red de monitoreo GNSS que actualmente es administrada por la Organización geodésica para el avance de las geociencias (Geodetic facility for the Advancement of GEoscience-GAGE). Esta conformada por las redes TLALOCNet, COCONet y la red Observatorio del límite de placas (Plate Boundary Observatory-PBO), la cual estuvo operada por UNAVCO del 2003 al 2018 (UNAVCO, 2019).

Tabla 4. Velocidad de las estaciones empleadas de la red NOTA, estas se encuentran referidas a norteamérica estable. Nota: Las velocidades y los errores asociados a están en mm/a.

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn
ACSX	-117.4448914824	33.27426666997	-27.08	0.03	27.97	0.3
AR27	-117.324930773	33.3418500652	-25.91	0.01	27.5	0.1
AR53	-117.4765053009	33.3811368115	-25.95	0.01	27.8	0.01

Tabla 4 continuación

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn
AZRY	-116.6296975958	33.5400729323	-19.37	0.01	21.54	0.02
BILL	-117.0646003113	33.578243452	-23.4	0.01	24.49	0.01
BOMG	-115.7297049986	33.3646294064	-6.25	0.04	6.9	0.08
CACT	-115.9899493296	33.6551355478	-8.59	0.01	9.48	0.02
CASE	-117.4039836164	33.4553518688	-24.99	0.02	27.42	0.01
CLBD	-117.310976685	33.1353872206	-27.11	0.01	28.14	0.01
CNPP	-117.6089198696	33.857632725	-23.6	0.01	25.35	0.01
COAG	-115.1233462337	32.8634648983	-1.2	0.02	1.91	0.02
COKG	-115.7285008936	32.8505139518	-20.59	0.02	21.02	0.01
COTD	-116.3868893456	33.7324870929	-13.98	0.02	16.7	0.03
CRRS	-115.7350415155	33.0698080574	-12.71	0.01	16.45	0.01
DHLG	-115.7880285505	33.3898061786	-10.48	0.01	8.43	0.01
DLUZ	-117.3072208822	33.4305885591	-26.55	0.01	27.78	0.01
DSSC	-116.7120898719	33.7333314078	-16.02	0.01	19.09	0.01
ECFS	-117.4116949648	33.6476846012	-24.28	0.01	26.31	0.01
ELSG	-117.4260212988	33.6491427517	-24.97	0.03	26.79	0.03
ERRG	-115.8227325431	33.1164466412	-15.95	0.02	15.22	0.02
FSHB	-115.7999407832	32.9449892955	-19.85	0.02	20.84	0.02
GLRS	-115.5213716316	33.2748124397	-4.57	0.02	1.4	0.02
GMPK	-114.8273453787	33.0510854063	-2.67	0.02	1.99	0.01
HMTG	-117.0015029455	33.7080979212	-21.51	0.02	22.77	0.02
HNPS	-115.6353355284	33.7050062257	-4.5	0.01	2.18	0.01
IDOG	-116.221513921	33.7967985015	-9.88	0.01	10.72	0.01
IDQG	-116.2389842919	33.7679740187	-11.19	0.01	13.01	0.02
KYVW	-116.173395499	33.9253695157	-7.37	0.02	7.77	0.01
LGWD	-117.7644507682	33.6405971411	-26.22	0.01	28.01	0.01
LKHG	-116.7587653313	33.2360074483	-25.28	0.09	24.8	0.05
LMHG	-117.3912844561	33.7442018189	-23.05	0.02	26.09	0.04
LMSG	-117.4450718616	33.8174010545	-22.63	0.02	24.89	0.02
MAT2	-117.4366989521	33.8567610059	-22.38	0.01	24.69	0.01
MLFP	-117.3179583078	33.9184039535	-21.33	0.01	23.58	0.01

Tabla 4 continuación

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn
MTGG	-116.6472273737	33.1991648279	-26.46	0.05	25.31	0.06
NOCO	-117.5695808871	33.9197089707	-22.28	0.02	24.03	0.01
OCSO	-117.3467353748	33.2406684457	-26.81	0.01	28.71	0.01
P471	-117.5408661893	33.5621259016	-24.79	0.01	27.86	0.01
PALG	-117.0317812368	33.3890186714	-26.91	0.06	25.7	0.05
PB2Y	-115.889611824	32.613920117	-28.1	0.31	28.4	0.32
PIN1	-116.4581622471	33.6121580877	-16.29	0.45	18.51	0.49
POBG	-116.9237482627	33.687133563	-21.7	0.03	23.14	0.03
PPBF	-117.182088937	33.8357269488	-21.33	0.01	23.48	0.01
PSAP	-116.4939922048	33.8192371957	-13.1	0.02	17.11	0.04
RCSC	-117.5864763825	33.4441450719	-28.83	0.14	29.37	0.08
RKMG	-117.6094286092	33.6741274244	-21.62	0.13	20.53	0.07
RMVJ	-117.5553221441	33.4858124869	-26.07	0.02	28.1	0.01
RUNG	-114.9780328499	32.9723121071	-1.9	0.02	1.85	0.02
SA63	-114.4957221333	32.6889019292	-7.33	0.22	12.96	0.27
SBCC	-117.6614864346	33.5530005346	-25.87	0.01	27.71	0.01
SGPS	-116.6956859431	33.9125361516	-22.49	0.08	23.07	0.06
SLHG	-116.2540583046	33.1926242137	-20.93	0.03	23.92	0.04
SLMS	-115.9778417466	33.2922278193	-12.28	0.01	14.25	0.01
SONG	-117.5602618619	33.3807510359	-27	0.02	28.63	0.01
SPMS	-117.8487752555	33.9926545206	-24.17	0.01	23.73	0.01
THMG	-117.7667973229	33.5496387293	-9.4	0.02	10.47	0.01
TMAP	-116.1604609159	33.6412456388	-12.04	0.02	14.15	0.02
TWMS	-117.72552099	33.9724551797	-23.25	0.01	23.76	0.01
USGC	-116.0853345811	33.0300639329	-23.64	0.01	24.25	0.02
VTOR	-117.193186828	33.2250158969	-26.41	0.01	27.47	0.01
WIDC	-116.3917820256	33.9347575104	-10.8	0.04	13.13	0.03
WMDG	-115.5818949202	33.0383247276	-12.83	0.04	6.64	0.03
WWFG	-115.5787786903	33.2788366513	-5.89	0.02	0.95	0.02
WWMT	-116.653857	33.955313449	-12.62	0.02	16.76	0.03
P472	-117.1046958189	32.8892100864	-27.72	0.01	28.07	0.01

Tabla 4 continuación

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn
P474	-117.2486922958	33.355193523	-25.94	0.01	27.1	0.01
P476	-117.1896770863	33.4396498933	-25.01	0.01	26.5	0.01
P477	-117.1133722322	33.5028017954	-24.26	0.01	26.22	0.01
P478	-117.0715910132	33.2357151564	-26.35	0.01	26.96	0.01
P479	-116.782930307	33.4933183738	-22.51	0.01	23.46	0.01
P480	-116.3485360415	32.9759963277	-26.68	0.02	25.44	0.01
P482	-116.6714128005	33.2401798365	-24.62	0.01	24.33	0.01
P483	-116.5693260759	33.0591643056	-25.61	0.02	25.21	0.01
P484	-116.6208381159	33.3755931157	-22.72	0.01	22.61	0.01
P485	-116.4090395438	33.2102125749	-24.24	0.02	23.36	0.02
P486	-116.3222867279	33.2601915577	-21.87	0.02	21.73	0.01
P487	-116.1830730964	33.2135322499	-21.38	0.01	20.5	0.01
P488	-116.0788102588	33.2010163182	-19.22	0.01	17.56	0.01
P489	-116.1116086019	33.296213687	-16.92	0.01	15.76	0.01
P490	-116.4259050324	33.523463034	-17.04	0.01	17.96	0.02
P491	-116.2268248126	33.5746791859	-14.25	0.01	14.47	0.01
P492	-115.969450979	32.8870488354	-23.47	0.01	23.28	0.01
P493	-115.8248913532	32.9547036531	-20.85	0.01	20.49	0.01
P495	-115.6283932421	33.044961374	-10.89	0.07	13.7	0.02
P497	-115.5770313371	32.8347325442	-14.4	0.01	18.81	0.01
P498	-115.5695661271	32.898429413	-11.59	0.01	18.08	0.05
P499	-115.4879121856	32.9796073322	-1.15	0.13	2.3	0.06
P501	-115.3979119002	32.8757571321	-1.98	0.02	3.05	0.01
P502	-115.4219119026	32.9824507587	-1.57	0.05	1.43	0.02
P503	-115.7201819279	32.9489158431	-16.9	0.03	18.07	0.01
P504	-115.765847294	33.5164107087	-7.4	0.01	4.63	0.01
P505	-115.6869994989	33.4238741927	-4.63	0.01	3.11	0.01
P506	-115.5101976547	33.0814308342	-4.17	0.03	-0.2	0.07
P507	-115.6124045704	33.1999751129	-8.48	0.01	-3.95	0.01
P508	-115.4287056882	33.2477804043	-3.69	0.01	1.51	0.02
P509	-115.2939170028	32.8906636137	-1.67	0.01	2.15	0.01

Tabla 4 continuación

Estación	Longitud (°)	Latitud (°)	Ve	1 σ Ve	Vn	1 σ Vn
P510	-115.3433320622	33.1435740559	-2.32	0.01	0.96	0.01
P511	-115.2961007115	33.8869355047	-3.04	0.01	1.15	0.01
P584	-116.9516414362	33.8926032373	-16.23	0.01	19.35	0.01
P600	-116.2118761322	33.8658467356	-8.77	0.01	9.71	0.01
P601	-116.0802281207	33.9592972181	-6.01	0.01	6.36	0.01
P607	-115.8206528303	33.741040256	-5.5	0.01	3.89	0.01
P608	-115.6866033044	33.9940841603	-3.61	0.02	2.02	0.01
P740	-116.595975631	33.5981952942	-17.98	0.02	19.05	0.02
P741	-116.5310213327	33.5574739473	-17.48	0.02	18.75	0.02
P742	-116.6025731653	33.4955435256	-20.56	0.01	21.23	0.01
P744	-115.508405267	32.8293829067	-10.28	0.01	18.98	0.01
P797	-116.5925264697	33.5372940261	-19.37	0.01	20.22	0.01

3.2 Modelado de velocidades geodésicas

3.2.1 Deformación infinitesimal a partir de polígonos triangulares

El cálculo de la deformación infinitesimal se realizó a través del programa *GPS Strain Calculator* de Cronin *et al.* (2017). Este programa emplea las velocidades horizontales (norte y este) de tres estaciones GPS para calcular los parámetros de traslación, rotación y deformación, donde se asume que la deformación ocurre en el plano horizontal y se distribuye de manera uniforme en el área que engloba el polígono triangular, cuyos vértices se conforman por las estaciones GPS.

Este análisis es un problema perfectamente constreñido ya que se tiene el mismo número de parámetros conocidos que de incógnitas. Los parámetros conocidos son las velocidades norte y este de tres estaciones GPS, mientras que las incógnitas son: (1) la velocidad del vector de traslación (t_x y t_y), el cual indica el movimiento promedio en línea recta de las tres estaciones GPS (Pratt-Sitaula *et al.*, 2019); (2) la magnitud del vector de velocidad angular (ω , en unidades de nano-radianes por año); (3) los elementos del tensor de deformación (ϵ_{xx} , ϵ_{xy} , ϵ_{yx} , ϵ_{yy}).

El movimiento de traslación se muestra en la Figura 8. El triángulo con línea punteada representa un área

sobre la superficie terrestre, la cual esta delimitada en sus tres vértices por estaciones geodésicas, cada una con su propia velocidad este y norte. Después de un tiempo esta área se ha movido, dicho movimiento se representa por el triángulo en línea continua, del cual al promediar las velocidades de las tres estaciones se obtiene el vector de traslación.

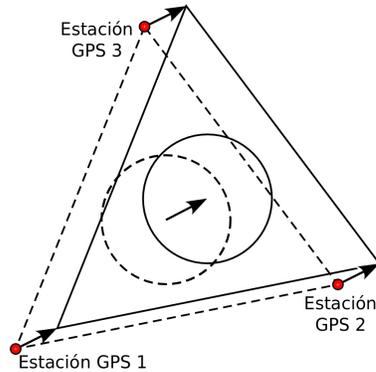


Figura 8. Vector de traslación resultante de un área delimitada por tres estaciones GPS.

El movimiento de rotación (ω) se muestra en la Figura 9. Este parámetro cuantifica el movimiento que una superficie ha tenido a lo largo del tiempo. Tomando como ejemplo la Figura 9, el resultado de la deformación se refleja en las velocidades de la estación GPS. Si pintáramos una línea en la superficie de la Tierra a lo largo de los ejes mayor y menor de una elipse (líneas continuas rojo y azul), para después invertir la deformación, veríamos que esas líneas han cambiado un poco su orientación (líneas discontinuas rojo y azul), el resultado que obtenemos es el cambio de orientación por año, el cual llamamos rotación. La dirección de la rotación se toma a partir de la orientación original de un eje dado y su orientación después de la deformación, si tiene un valor positivo el sentido es antihorario, mientras que si es un valor negativo el sentido es horario (Pratt-Sitaula *et al.*, 2019).

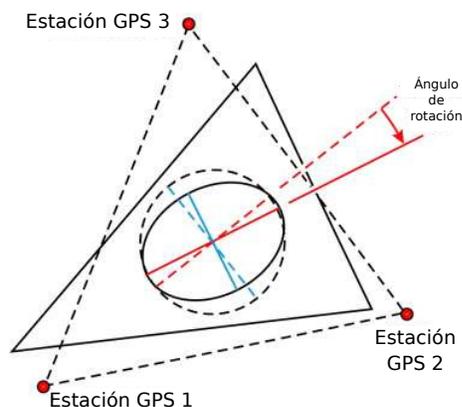


Figura 9. Esquema donde se ejemplifica la rotación que experimenta un área sobre la superficie terrestre y es calculada mediante la velocidad de tres estaciones GPS.

Por último, otro de los parámetros que se obtienen a partir de la deformación infinitesimal de Cronin *et al.* (2017) es el denominado *Strain*. Este se puede definir como el cambio relativo en la forma de un cuerpo, este se supone que ha sido deformado desde una posición inicial a una final por medio de fuerzas aplicadas a el (Jaeger, 1987). Matemáticamente, la deformación se describe por medio de un tensor gradiente de desplazamiento, la cual es una matriz asimétrica. Esta matriz se descompone en la suma de un tensor simétrico (tasa de deformación) y un tensor asimétrico (rotación, descrita anteriormente).

El tensor de rotación se representa como:

$$\Omega_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega \\ \Omega & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Mientras que la tasa de deformación infinitesimal se representa por la matriz:

$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Este tensor contiene 3 variables independientes: ϵ_{xx} , $\epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}$ y ϵ_{yy} .

Al sumar los dos tensores resulta el tensor gradiente de tasa de desplazamiento (e_{ij})

$$e_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} - \Omega \\ \epsilon_{xy} + \Omega & \epsilon_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

La ecuación matricial que describe la deformación en un sitio individual, dada su ubicación inicial (x_0 , y_0) con su correspondiente velocidad este (V_x) y norte (V_y), añadiendo el vector de traslación, es igual a:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} - \Omega \\ \epsilon_{xy} + \Omega & \epsilon_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

De esta matriz se obtienen las siguientes dos ecuaciones con seis incógnitas:

$$V_x = (X_0 \epsilon_{xx}) + (Y_0 \epsilon_{xy}) - (Y_0 \Omega) + (t_x) \quad (5)$$

$$V_y = (X_0 \epsilon_{xy}) + (X_0 \Omega) + (Y_0 \epsilon_{yy}) + (t_y) \quad (6)$$

Al tener las velocidades este (V_x) y norte (V_y) de tres sitios GPS, se tienen seis ecuaciones como las descritas anteriormente, las cuales se pueden describir de la siguiente manera:

$$d = Gm \quad (7)$$

Donde d es la matriz de los datos conocidos (las velocidades de las tres estaciones), m representa la matriz del modelo (matriz donde se encuentran las seis incógnitas), mientras que G es la matriz de coeficientes que relaciona a d y m usando las ecuaciones 6.

Este es un problema de inversión que se resuelve mediante la ecuación:

$$m = G^{-1}d \quad (8)$$

Al resolver este problema, se obtienen los componentes del vector de traslación, la velocidad de rotación y los tres elementos independientes de la matriz de deformación.

El resultado de la deformación, se representa gráficamente por medio de una elipse de deformación, de la cual sus ejes principales (eje mayor e_{1H} y eje menor e_{2H}) se representan por medio de flechas denominadas tensores. Dichos tensores se muestran en la Figura 10, en esta se observa el semieje mayor (línea roja) y el semieje menor (línea azul) de la elipse, e_{1H} y e_{2H} respectivamente, donde una extensión se representa por un par de flechas que apunta hacia afuera, mientras que una contracción por un par flechas que apunta hacia adentro.

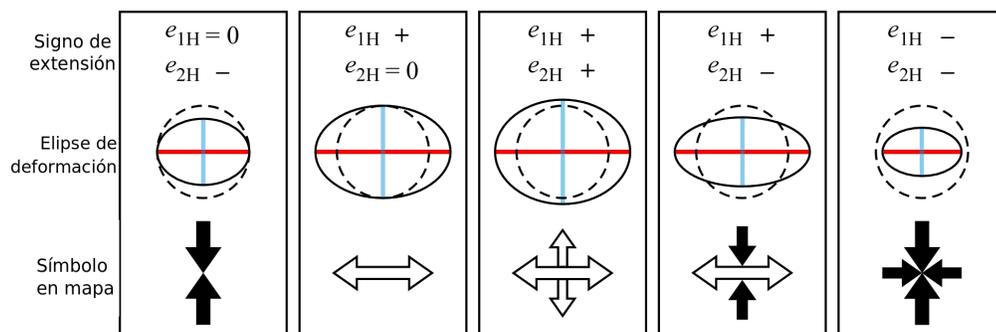


Figura 10. Representación de las cinco posibles resultados en una elipse de deformación y su respectiva representación en un mapa por medio de tensores.

3.2.2 Modelo de bloques

El modelo de bloques permite simular numéricamente los efectos de la deformación intersísmica en fallas activas a través de un campo de velocidades, para esto, todo el dominio del modelo es dividido en bloques elásticos considerando como sus límites las fallas presentes (Segall, 2010).

Este método descompone el campo de velocidades geodésico (Ec.9), ya que se asume que la velocidad resultante tiene contenido parámetros como rotación, acumulación de deformación, así como deformación interna del bloque.

$$\tilde{V}_t = \tilde{V}_B + \tilde{V}_E + \tilde{V}_C \quad (9)$$

Donde \tilde{V}_t : es la velocidad de una estación GPS/GNSS; \tilde{V}_B : Rotación del bloque; \tilde{V}_E : Acumulación de deformación; \tilde{V}_C : representa la deformación interna del bloque.

En el estudio de la deformación por medio del modelo de bloques destacan dos metodologías: (1) BLOCKS, desarrollado por Meade y Loveless (2009), y (2) DEFNODE o TDEFNODE en su versión más reciente, desarrollado por McCaffrey (2005). Este último fue el elegido para realizar este trabajo de tesis sobre el norte de Baja California.

TDEFNODE (McCaffrey, 2009), es un programa que permite modelar rotaciones de bloques y su deformación interna, profundidad de bloqueo en las fallas, así como fuentes transitorias como deslizamientos lentos, fuentes volcánicas, entre otros. Para estimar los parámetros del movimiento de los bloques y el bloqueo de las fallas, se usan fórmulas del modelo de dislocación de Savage (1983), así como la formulación de Okada (1985) para semi-espacios homogéneos. Además de velocidades GPS/GNSS, TDEFNODE admite otro tipo de datos para constreñir el modelo propuesto, tales datos pueden ser: series de tiempo GPS, datos de interferometría radar de apertura sintética (Interferometric Synthetic Aperture Radar-INSAR), tasas de deslizamiento de fallas, tasas de elevación de la superficie, tasas de dispersión del fondo marino, tasas de inclinación de la superficie.

Los bloques se representan por medio de polígonos, los cuales comprenden el área de estudio, en donde cada punto dentro del bloque rota a una misma velocidad angular. Principalmente, los límites de un bloque coinciden con las fallas que se encuentran en el área de estudio. El movimiento del bloque esta expresado por medio de polos de Euler (Figura 11).

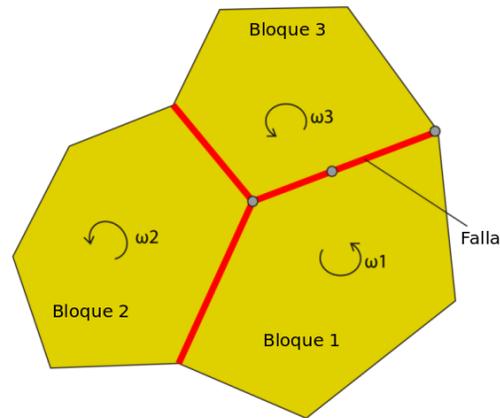


Figura 11. Representación esquemática del modelo de bloques. Las líneas rojas indican las fallas y los puntos verdes los nodos que conforman las fallas.

Las fallas se definen por medio de nodos, los cuales están referidos por medio de longitud, latitud y profundidad. Los nodos son anotados a lo largo de la traza de la falla formando una malla irregular, los cuales son numerados de acuerdo a la dirección de la falla y después en modo decreciente, como puede verse representado en la Figura 12, por lo que la deformación es calculada al integrar sobre las regiones que forman los nodos.

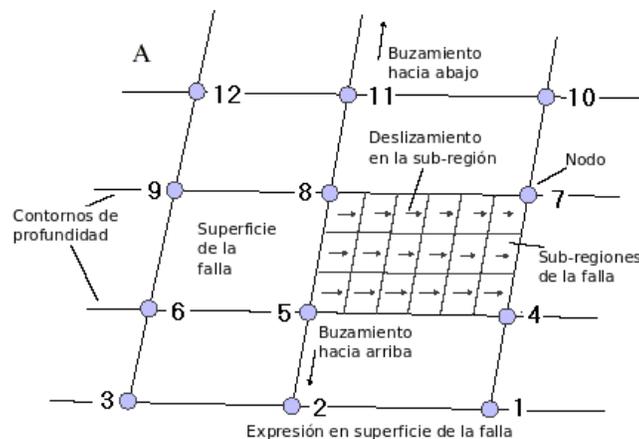


Figura 12. Representación de una falla por medio de nodos para el programa TDEFNODE.

Para estimar el mejor modelo que se ajusta a los datos, se utiliza la estadística chi-cuadrada reducida (χ^2)

$$\chi^2 = [n^{-1} \sum p_i]^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Donde: n es el número de grados de libertad (número de observaciones menos el número de parámetros libres), p es una función de penalización de los datos y la suma es sobre el total de número de observacio-

nes. Debido a que el problema es no lineal, χ^2 se calcula empleando el algoritmo de recocido simulado (*simulated annealing*) de Press *et al.* (2007).

3.2.2.1 Rotación de una placa

Al igual que el movimiento de las placas tectónicas, el movimiento de pequeños bloques sobre la superficie terrestre pueden ser descritos por medio de rotaciones sobre un eje vertical conocido como polo de Euler, el cual intersecta el centro de la Tierra (McCaffrey, 2002).

La rotación se puede describir como un movimiento relativo como se describe en la Figura 13, en la cual se observa la rotación de la placa A respecto a la placa B (${}_B ROT_A$). Todos los puntos de la misma placa giran alrededor del polo de Euler con una misma velocidad angular expresada en grados o radianes por millón de años.

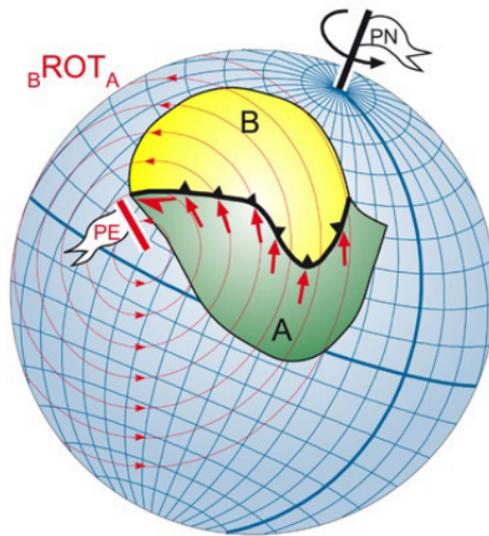


Figura 13. Esquema de la superficie de la Tierra donde se muestran dos placas tectónicas (A y B), donde su movimiento relativo puede ser descrito mediante una rotación (${}_B ROT_A$) alrededor de un polo de Euler (PE) el cual no necesariamente tiene que coincidir con el polo de rotación de la Tierra (PN: polo Norte). Los círculos rojos representan las trayectorias que seguirían diversos puntos de la placa A en su movimiento relativo con respecto a la placa B. Tomada de Alfaro *et al.* (2013).

La magnitud de la velocidad de un punto sobre la superficie de la Tierra que rota sobre un polo de Euler es igual a:

$$v_i = \omega R_e \text{sen}(\Delta) \quad (11)$$

Donde: ω es la velocidad angular, R_e representa el radio de la Tierra y Δ es la distancia angular del punto de interés al polo de Euler.

Un polo de Euler en coordenadas esféricas (${}_R\Omega_i = (\lambda_p, \phi_p, \omega)$) da la rotación de un punto con coordenadas λ, ϕ , en un bloque i en un sistema de referencia R , donde R puede ser otra placa o un sistema de referencia como ITRF. La velocidad lineal de un punto dentro del bloque i relativo al sistema de referencia R es igual a:

$${}_R V_i = {}_R \Omega_i \times \mathbf{X} \quad (12)$$

Donde \mathbf{X} es el vector que apunta desde el centro de la Tierra al punto con coordenadas λ, ϕ .

3.2.2.2 Bloqueo de una falla y deformación intersísmica

Se le denomina bloqueo o acoplamiento a la tendencia de una falla de estar “atascada” o “bloqueada” por largos periodos de tiempo, durante el cual acumula esfuerzos en las rocas adyacentes a la falla (McCaffrey, 2005).

Para modelar la acumulación de deformación en las fallas, se utiliza una cantidad escalar cinemática adimensional representada por ϕ , el cual representa un promedio espacial del movimiento de la falla.

Para calcular ϕ , se considera a V como la tasa de deslizamiento promedio de la falla a través de varios ciclos sísmicos y a V_c (Ec. 13), como la tasa de deslizamiento de la falla en un período corto de tiempo (como el que es medido con una estación GPS), entonces ϕ es definido como:

$$\phi = 1 - \frac{V_c}{V} \quad (13)$$

El parámetro ϕ tiene valores entre 0 y 1, los valores intermedios indican el grado de bloqueo que puede presentar una falla. Si $\phi = 0$, en la falla se produce movimiento asísmico o *creep*, por el contrario si $\phi = 1$, la falla se encuentra bloqueada, lo que significa que la falla esta acumulando esfuerzos para ser liberada en un próximo evento sísmico (McCaffrey *et al.*, 2007).

En TDEFNODE, el valor de ϕ es asignado a cada nodo, mientras que el parámetro V es calculado a partir de las velocidades angulares de los bloques contiguos y las tasas de deformación de los bloques que están en contacto con las fallas.

El parámetro que indica la acumulación de deformación elástica alrededor de la falla, esta dado por el producto de ϕV , al cual se le denomina déficit de tasa de deslizamiento o *deficit slip-rate*. Este parámetro,

representa el déficit en la tasa de deslizamiento a corto plazo (tiempo de medición en una red geodésica) comparado con la tasa de deslizamiento a largo plazo (sobre varios ciclos sísmicos). Por lo que este parámetro, cuantifica la tasa a la cual se acumula la deformación elástica en un área dada en una falla (Manaker *et al.*, 2008). En otras palabras, el déficit en la tasa de deslizamiento se define como la diferencia entre el deslizamiento que presenta actualmente la falla y el deslizamiento que se espera que ocurra. El déficit cambia con el tiempo, se acumula entre eventos sísmicos y es reducido al producirse el terremoto (Freymueller, 2017).

Capítulo 4. Análisis de deformación infinitesimal

En este capítulo se tratará el análisis preliminar de deformación infinitesimal realizado en el norte de Baja California, para el cual se empleó la metodología de Cronin *et al.* (2017), en la cual a partir de tres estaciones GPS es posible estimar los parámetros de traslación, rotación y *strain*. El análisis preliminar permitirá estimar de manera general la distribución de la deformación de nuestra zona de estudio. De acuerdo con los resultados obtenidos y la distribución de las fallas presentes, se establecerá la geometría de los bloques tectónicos que se estudiarán posteriormente por medio del programa especializado TDEFNODE.

4.1 Triangulación sobre el área de estudio

De acuerdo con a la distribución de las estaciones temporales y a la ubicación de las fallas del norte de Baja California, se trazó una triangulación sobre la zona (Figura 14), de la cual se cuidó que el área que engloba las tres estaciones no cruce una falla principal, ya que siguiendo la teoría del modelo de bloques las fallas actúan como límites. Para este análisis se seleccionaron velocidades de las estaciones temporales para el período 1993.1-2010.1 (González-Ortega *et al.* (2018), Tabla 2). Siguiendo el criterio de trazar el arreglo triangular sobre áreas sin cruzar fallas, se formaron 19 triángulos sobre el norte de Baja California, empleando las estaciones descritas en la Tabla 5.

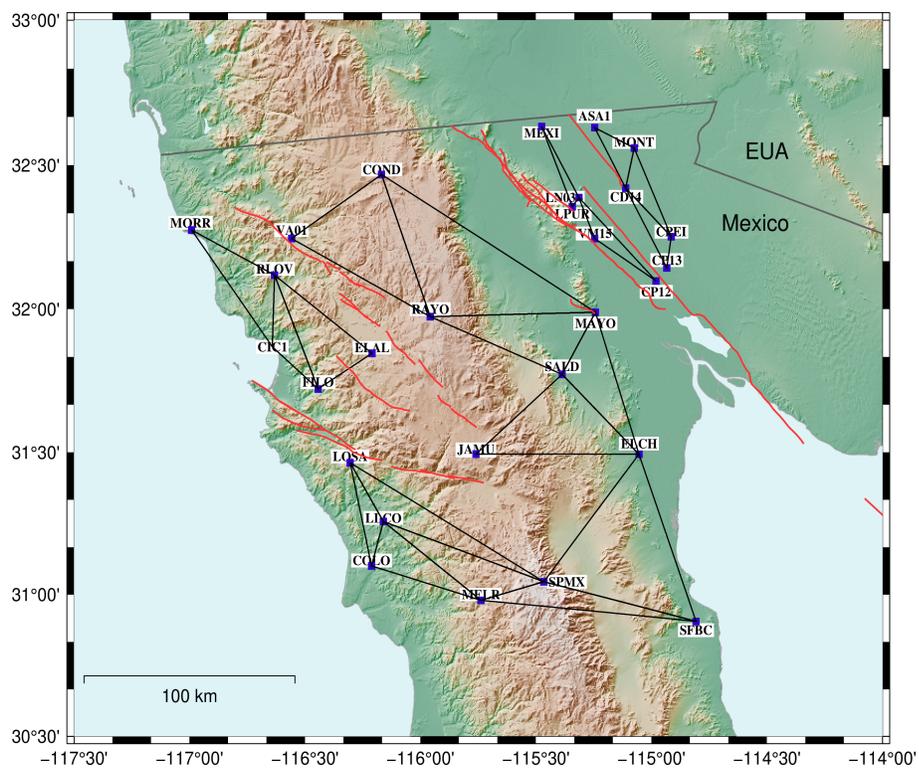


Figura 14. Triangulación propuesta en el norte de Baja California de acuerdo con la distribución de las estaciones geodésicas temporales y las fallas principales.

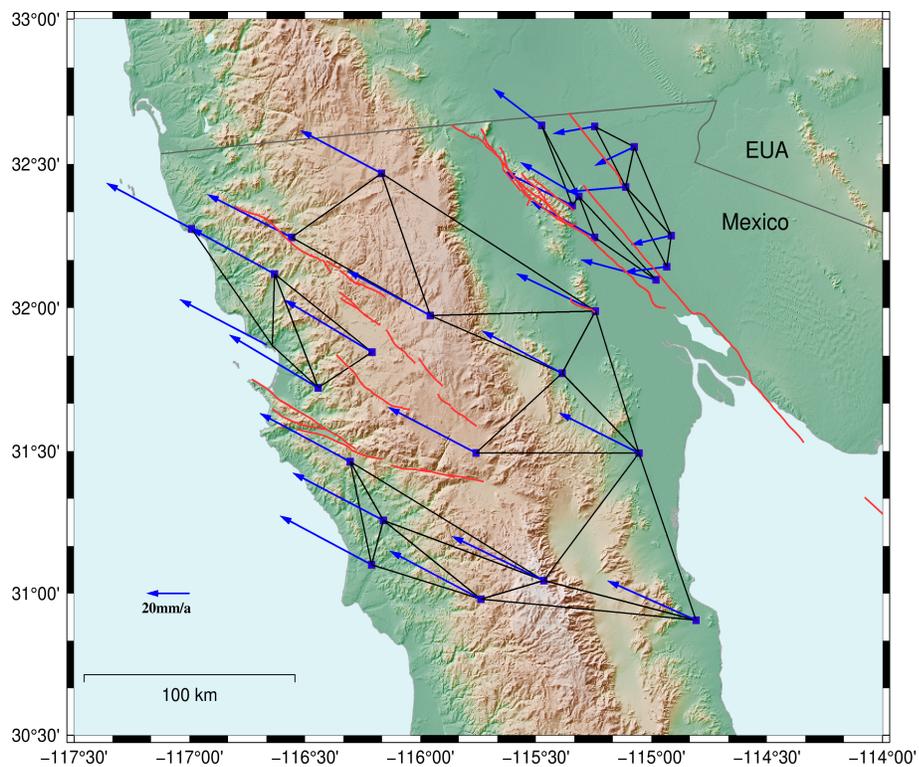


Figura 15. Vectores de velocidad de las estaciones temporales a utilizar para el análisis de deformación infinitesimal. Marco de referencia ITRF 2008.

Tabla 5. Velocidades de las estaciones usadas para el análisis preliminar. Las velocidades se encuentran en el marco de referencia ITRF 2008 y con respecto a la placa Norteamérica, así como el periodo de datos.

Estación	Latitud °	Longitud °	ITRF 2008				NAM08		Tiempo
			Vn	σ Vn	Ve	σ Ve	Vn	Ve	
ASA1	32.6292	115.24583	-3.2	0.6	-19.5	0.6	6.5	-7.22	1993-2004
CADG	31.36111	116.32204	21.7	0.4	-42.2	0.4	31.74	-30.31	1995-2001
CD14	32.41999	115.11191	-2.2	0.4	-27.8	0.4	7.46	-15.55	1997-2008
CIC1c	31.87068	116.66576	20.1	0.2	-40.7	0.2	30.24	-28.72	1999-2009
COLO	31.10075	116.212	21.6	0.4	-42.8	0.4	31.6	-30.97	1994-2002
COND	32.46687	116.1687	19	0.4	-38	0.4	28.99	-25.84	1995-2001
CP12	32.0977	114.98049	8.9	1	-35.2	1	18.52	-23.02	1997-2002
CP13	32.14306	114.93372	-2.5	0.4	-20	0.6	7.1	-7.8	1993-2002
CPEI	32.25142	114.9144	-4.1	0.8	-18.9	0.8	5.5	-6.68	1993-2002
CPIG	32.41927	115.30468	14.7	0.4	-22.3	0.4	24.42	-10.07	1999-2008
ELAL	31.84532	116.20986	23.1	0.4	-40.9	0.4	33.1	-28.89	1995-2001
ELCH	31.49242	115.05426	17.8	0.4	-37.4	0.4	27.44	-25.37	1994-2002
F118	32.58826	115.27296	0.2	0.6	-23.4	0.6	9.91	-11.13	1997-2004
FI27	32.51263	115.18591	-13.6	0.6	-23.5	0.6	-3.92	-11.24	1997-2008
FILO	31.72095	116.44314	23.4	0.4	-41.6	0.4	33.47	-29.64	1994-2001
INDE	31.5515	115.93764	20.5	0.2	-40.2	0.2	30.42	-28.23	1995-2001
JAMU	31.49303	115.75979	20.2	0.2	-41	0.4	30.06	-29.03	1995-2002
LACH	32.50867	115.15425	-14.2	0.4	-25	0.4	-4.53	-12.74	1993-2007
LLCO	31.25665	116.16073	21	0.2	-42.4	0.2	30.99	-30.52	1993-2007
LN03	32.38675	115.31404	15.1	0.4	-27.3	0.4	24.82	-15.08	1999-2010
LOSA	31.46253	116.30442	21.4	0.4	-42.3	0.4	31.43	-30.39	1994-2001
LPUR	32.35574	115.3429	15.1	0.2	-32.1	0.2	24.83	-19.89	1993-2010
MAYO	31.98839	115.24281	16.6	0.6	-37	0.6	26.3	-24.87	1993-2002
MELR	30.97965	115.73855	21.3	0.4	-42.6	0.4	31.16	-30.75	1994-2001
MEX1c	32.63299	115.47571	16.1	0.4	-22.5	0.4	25.87	-10.24	2006-2010
MONT	32.55861	115.07492	-8.3	0.4	-18.5	0.4	1.35	-6.22	1993-2007
MORR	32.27446	116.99104	20.2	0.4	-39.8	0.6	30.44	-27.76	1994-2001
RAYO	31.97299	115.95769	19.8	0.2	-38.8	0.2	29.72	-26.74	1994-2002
RLOV	32.11776	116.6317	20.3	0.4	-39.3	0.4	30.43	-27.26	1994-2001
SAIS	31.19148	116.22307	21.3	0.4	-42.8	0.4	31.31	-30.94	1994-2001
SALD	31.77177	115.38678	18.7	0.4	-37.4	0.4	28.44	-25.33	1994-2001
SFB2	30.9305	114.80684	17.9	0.8	-41.2	0.8	27.46	-29.28	2001-2007
SFBC	30.90561	114.8071	17.4	0.2	-41.4	0.2	26.96	-29.49	1993-2007
SM01	31.62364	115.83481	19.6	0.2	-39.9	0.2	29.48	-27.91	1993-2009
SPMXc	31.04504	115.46586	19.6	0.2	-43	0.2	29.37	-31.11	1998-2009
VA01	32.24472	116.55786	19	0.4	-39.4	0.4	29.11	-27.33	1993-2002
VM15	32.24463	115.24551	16	1.4	-29.8	1.4	25.7	-17.61	1995-1999

4.2 Resultados del cálculo de deformación infinitesimal

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de traslación, rotación y tensores de deformación, al emplear las velocidades de las estaciones temporales del periodo 1993.1-2010.1, cabe mencionar que los cálculos fueron realizados con velocidades referidas al ITRF 2008.

4.2.1 Traslación

La traslación se puede representar por medio de un vector que indica el movimiento promedio sobre la superficie de interés. De acuerdo con la Figura 16 y Tabla 6, gran parte de los vectores de traslación del norte de Baja California se encuentran orientados al noroeste, siguiendo la tendencia del campo de velocidades geodésicas en el marco de referencia ITRF 2008.

Hacia el área de Mexicali (triángulos 1-5) se observan dos comportamientos distintos. Mientras que en los arreglos triangulares 1, 2 y 3 presentan una orientación al suroeste, los triángulos 4 y 5 se orientan al noroeste. Esta diferencia en la orientación de los vectores se debe a que los bloques triangulares 1, 2 y 3 se encuentran ubicados dentro de la placa Norteamericana, mientras que los triángulos 4 y 5, así como el resto de la triangulación, se encuentran dentro de la placa Pacífico.

Las velocidades de traslación para el área de Mexicali rondan los 22-33 mm/a, mientras que fuera de esta área (triángulos 6-19) las velocidades se encuentran entre 41-47 mm/a aproximadamente.

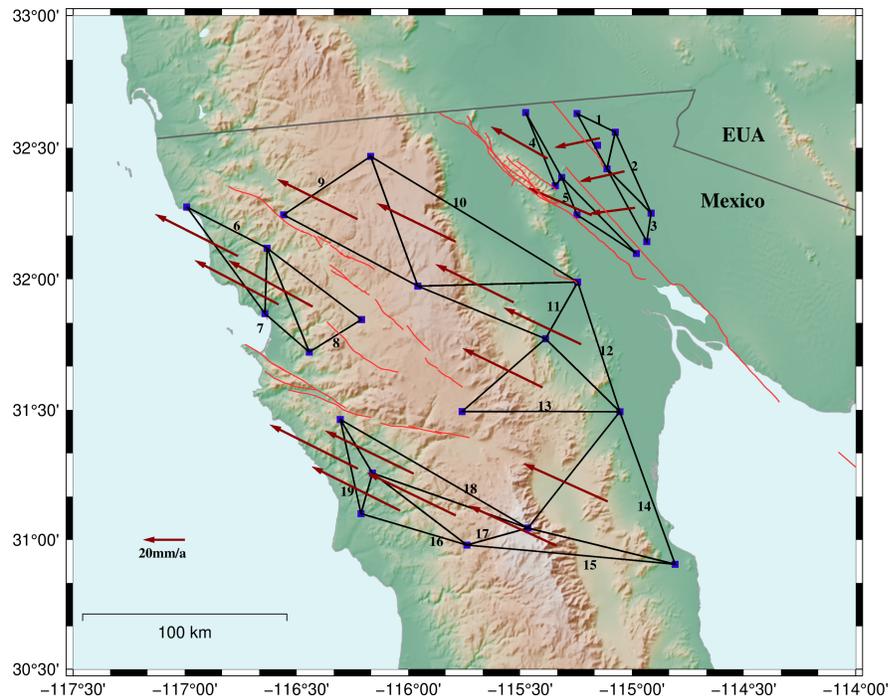


Figura 16. Vectores de traslación del arreglo triangular realizado en el norte de Baja California. La magnitud del vector corresponde a la velocidad promedio de las tres estaciones GPS en mm/a, en el marco de referencia ITRF 2008.

Tabla 6. Velocidades de traslación para los arreglos triangulares en el norte de Baja California.

No. Triangulo	Estaciones	Longitud (°)	Latitud (°)	$V_e \pm 1\sigma$	$V_n \pm 1\sigma$	Velocidad (mm/a)
1	ASA1 - MONT - CD14	-115.14422	32.53593	-21.9 ± 0.3	-4.6 ± 0.3	22.4
2	CD14 - CPEI - MONT	-115.03374	32.41001	-21.7 ± 0.3	-4.9 ± 0.3	22.3
3	CD14 - CPEI - CP13	-114.98668	32.27149	-22.2 ± 0.4	-2.9 ± 0.3	22.4
4	MEXI - LPUR - LN03	-115.37755	32.45849	-27.3 ± 0.2	15.4 ± 0.2	31.4
5	LN03 - VM15 - CP12	-115.18001	32.24303	-30.8 ± 0.6	13.3 ± 0.6	33.5
6	MORR - RLOV - CIC1	-116.76283	32.08763	-39.9 ± 0.2	20.2 ± 0.2	44.8
7	RLOV - CIC1 - FILO	-116.58020	31.90313	-40.5 ± 0.2	21.3 ± 0.2	45.8
8	RLOV - ELAL - FILO	-116.42823	31.89468	-40.6 ± 0.2	22.3 ± 0.2	46.3
9	VA01 - COND - RAYO	-116.22808	32.22819	-38.7 ± 0.2	19.3 ± 0.2	43.3
10	COND - RAYO - MAYO	-115.78973	32.14275	-37.9 ± 0.2	18.5 ± 0.2	42.2
11	RAYO - MAYO - SALD	-115.52909	31.91105	-37.7 ± 0.2	18.4 ± 0.2	42.0
12	MAYO - ELCH - SALD	-115.22795	31.75086	-37.3 ± 0.3	17.7 ± 0.3	41.3
13	JAMU - ELCH - SALD	-115.40028	31.58574	-38.6 ± 0.2	18.9 ± 0.2	43.0
14	ELCH - SPMX - SFBC	-115.10907	31.14769	-40.6 ± 0.2	18.3 ± 0.2	44.5
15	MELR - SPMX - SFBC	-115.33717	30.97677	-42.3 ± 0.2	19.4 ± 0.2	46.6
16	MELR - LLCO - COLO	-116.03709	31.11235	-42.6 ± 0.2	21.3 ± 0.2	47.6
17	SPMX - MELR - LLCO	-115.78838	31.09378	-42.7 ± 0.2	20.6 ± 0.2	47.4
18	LOSA - LLCO - SPMX	-115.97700	31.25474	-42.6 ± 0.2	20.7 ± 0.2	47.3
19	LOSA - LLCO - COLO	-116.22572	31.27331	-42.5 ± 0.2	21.3 ± 0.2	47.6

4.2.2 Rotación

Los valores de rotación obtenidos para los arreglos triangulares, se encuentran en la Tabla 7, mientras que en la Figura 17, se muestra un panorama general de la rotación del norte de Baja California. Como se puede observar, la rotación no es uniforme en toda la zona de estudio, sin embargo siguen el mismo sentido. De acuerdo con los trabajos de Hagstrum y Filmer (1990) así como el de Bennett y Oskin (2014), la rotación del norte de Baja California presenta sentido horario debido a la extensión provocada por la formación del golfo de California y a la presencia de las fallas de rumbo.

Las rotaciones de mayor magnitud se presentan en el área de Mexicali (triángulos 1-5), con valores entre 5-20°/Ma (Figura 18(a)). Para el resto de los arreglos triangulares (triángulos 6-19) se obtuvieron valores de rotación entre 0-3°/Ma (Figura 18(b)). Sin embargo, cabe resaltar el arreglo triangular 7 ubicado hacia la ciudad de Ensenada (conformado por las estaciones RLOV, CIC1 y FILO), el cual presenta una rotación antihoraria siendo contrario a lo observado en toda la zona de estudio.

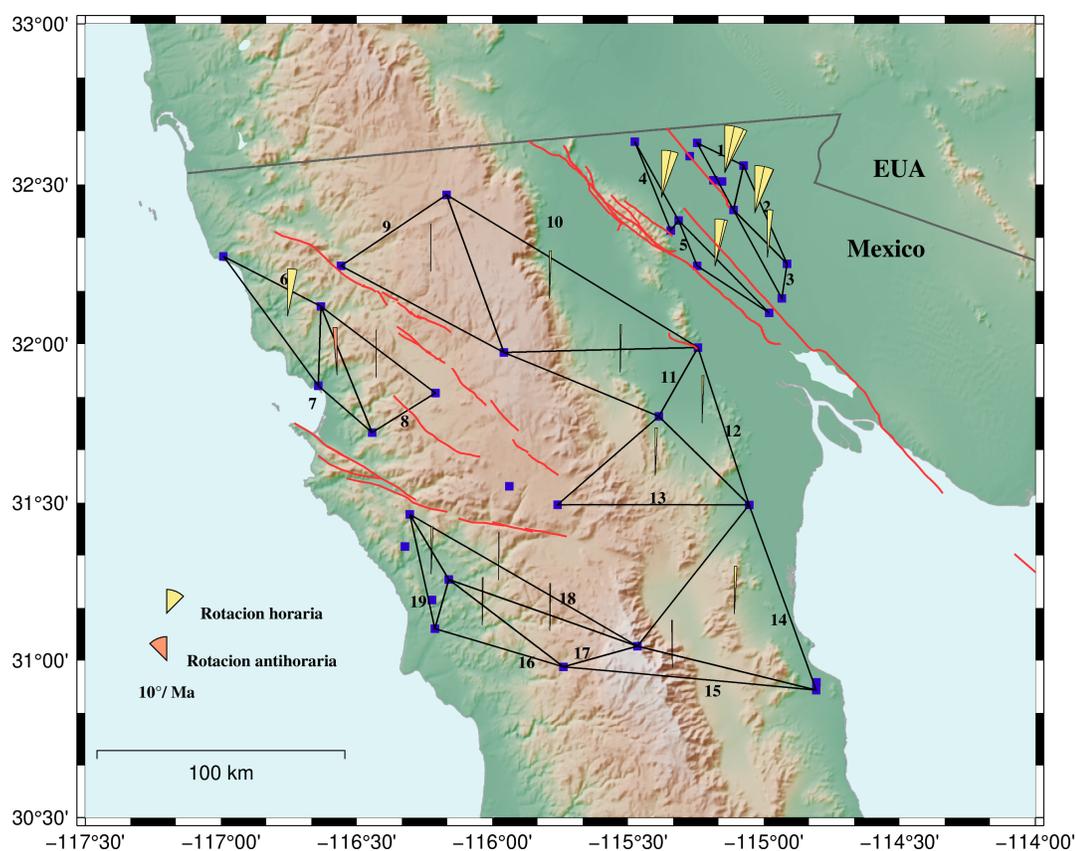
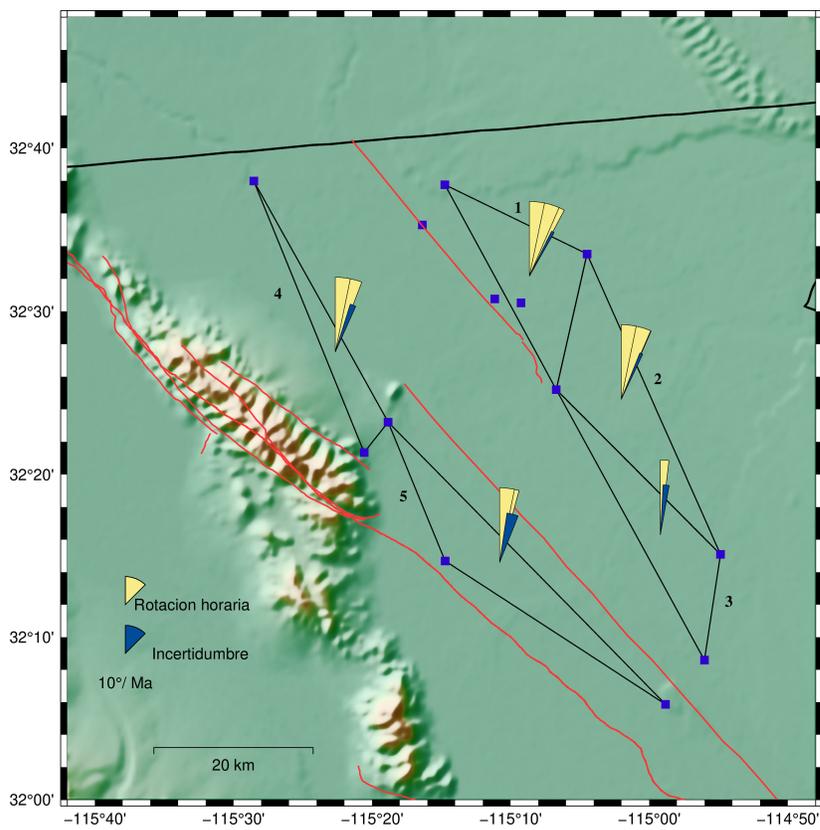


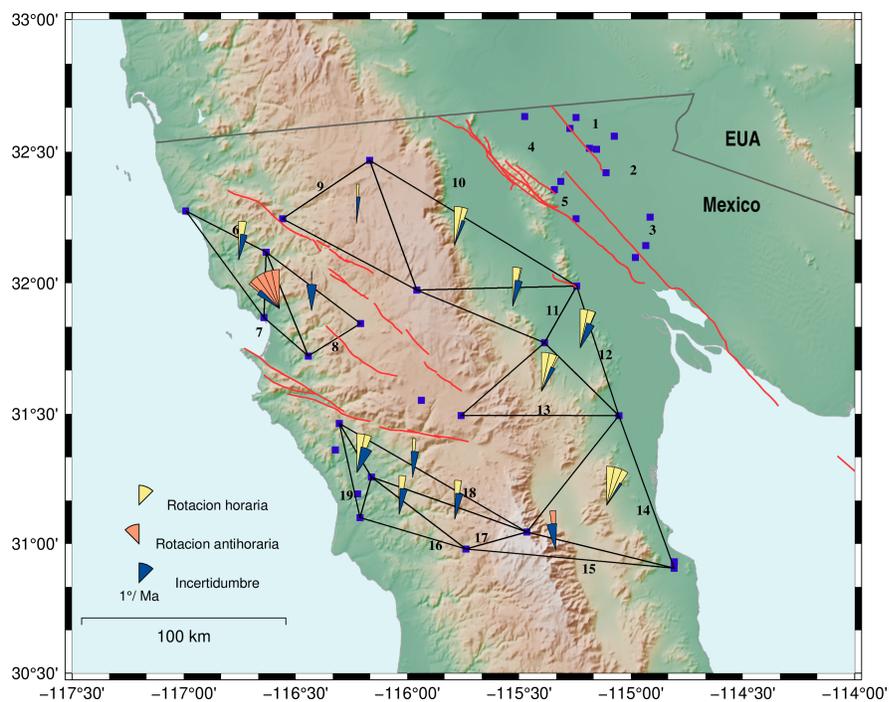
Figura 17. Rotación general del norte de Baja California, la escala representa una rotación de 10°/Ma. Se aprecia que hacia el noreste se tienen valores superiores a 10°/Ma. El abanico de color amarillo representa el sentido de rotación horaria, mientras que el de color naranja representa rotación antihoraria,

Tabla 7. Resultados de rotación para la triangulación sobre el norte de Baja California.

No. Triángulo	Estaciones	°/Ma $\pm 1\sigma$	Sentido
1	ASAI - MONT - CD14	-27.8 \pm 1.6	Horario
2	CD14 - CPEI - MONT	-23.6 \pm 1.8	Horario
3	CD14 - CPEI - CP13	-6.6 \pm 3.5	Horario
4	MEXI - LPUR - LN03	-20.7 \pm 3.5	Horario
5	LN03 - VM15 - CP12	-15.1 \pm 6.5	Horario
6	MORR - RLOV - CIC1	-1.2 \pm 0.7	Horario
7	RLOV - CIC1 - FILO	5.1 \pm 0.6	Antihorario
8	RLOV - ELAL - FILO	-0.01 \pm 1.1	Horario
9	VA01 - COND - RAYO	-0.4 \pm 0.4	Horario
10	COND - RAYO - MAYO	-2 \pm 0.4	Horario
11	RAYO - MAYO - SALD	-1.3 \pm 0.8	Horario
12	MAYO - ELCH - SALD	-2.4 \pm 0.9	Horario
13	JAMU - ELCH - SALD	-2.6 \pm 0.5	Horario
14	ELCH - SPMX - SFBC	-3.3 \pm 0.3	Horario
15	MELR - SPMX - SFBC	0.9 \pm 1.1	Horario
16	MELR - LLCO - COLO	-1 \pm 0.8	Antihorario
17	SPMX - MELR - LLCO	-1 \pm 0.8	Horario
18	LOSA - LLCO - SPMX	-0.5 \pm 0.8	Horario
19	LOSA - LLCO - COLO	-2.2 \pm 1.3	Horario



(a) Rotación del área Mexicali-Valle Imperial.



(b) Rotación del norte de Baja California excluyendo el área Mexicali-Valle Imperial.

Figura 18. Rotación del norte de Baja California: (a) representa la rotación sobre el área de Mexicali (triángulos 1-5) y (b) la rotación para los arreglos triangulares del 6 al 19. El abanico de color amarillo representa el sentido de rotación horaria, mientras que el de color naranja representa rotación antihoraria, el color azul indica la incertidumbre del valor de rotación.

4.2.3 Tensores de deformación

En esta sección se muestran los tensores de deformación obtenidos a partir de los arreglos triangulares de estaciones geodésicas. Con esta información sumado a la ubicación de las fallas presentes en la zona de estudio, se propone una división de bloques para el norte de Baja California, para ser analizados con el programa TDEFNODE.

En la Tabla 8 se muestran los resultados obtenidos para los ejes $e1H$, $e2H$, su dirección, la deformación de cizalla y de área, mediante la deformación de área se puede identificar si el área en cuestión a sufrido una compresión o extensión. En la Figura 19 se observa que el área donde se presentan los valores más altos de deformación es el área de Mexicali y el Valle Imperial. Este resultado es acorde a lo esperado, debido a la interacción entre las placas Norteamérica y Pacífico además de la alta sismicidad de la zona.

En la Figura 20(a), que representa el área del Valle de Mexicali, los tensores muestran una fuerte componente de extensión, en los arreglos triangulares 1, 2 y 3 se encuentra orientada hacia el ENE-OSO, el arreglo 4 conserva la componente de extensión ligeramente orientada hacia el NE-SO, mientras que el arreglo triangular 5 presenta una componente de compresión NE-SO. Al alejarnos de esta zona, hacia el oeste, la magnitud de los tensores de deformación disminuye como puede verse en la Figura 20(b). Sobre esta región se observan componentes de extensión sobre la mayoría de los arreglos triangulares, a excepción del arreglo 17, el cual presenta un valor de extensión muy cercano a cero. La componente de extensión en los arreglos 10, 11, 12 y 15 se encuentra orientada hacia el NO-SE, mientras que para los arreglos 13 y 14 la extensión se orienta ligeramente ENE-OSO. También se observan componentes de compresión en los arreglos triangulares 10, 11, 12, 15 y 17 que disminuye en los arreglos 16 y 19, esta compresión se orienta aproximadamente NE-SO. Sin embargo para los arreglos triangulares 6, 7 y 9 no se observa una tendencia definida, ya que para estos arreglos se observa extensión NE-SO, aunque en el arreglo 7 domina la componente de compresión NO-SE.

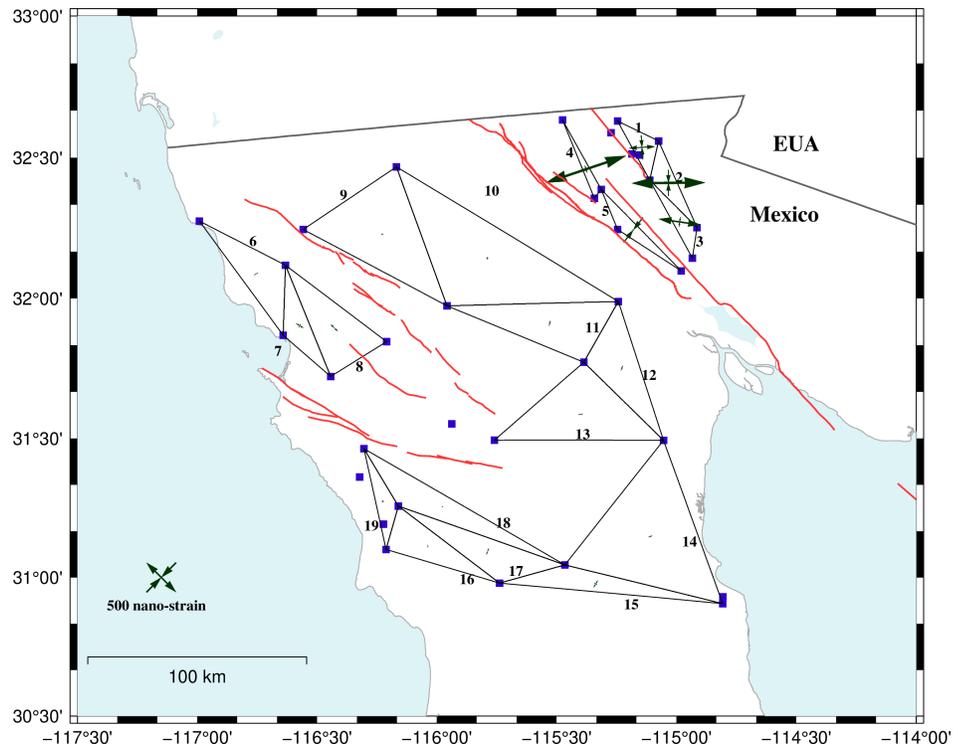


Figura 19. Representación de los tensores de deformación sobre la triangulación realizada en el norte de Baja California.

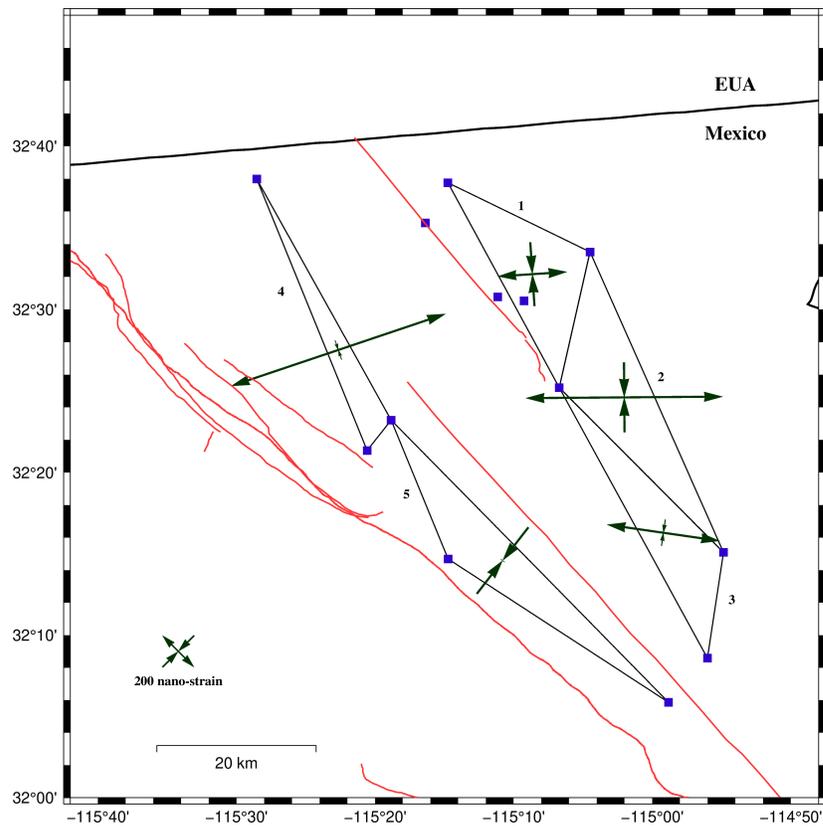
Tabla 8. Resultado de los tensores de deformación del norte de Baja California calculados a partir del arreglo de triangulación.

No. Triangulo	Estaciones	e1H	e2H	Azimut al e1H (°)	Deformación de cizalla	Deformación de área
1	ASAI - MONT - CD14	309.4382	-285.2728	86.2341	594.711	24.1654
2	CD14 - CPEI - MONT	877.4516	-311.8872	89.5597	1189.3389	565.5644
3	CD14 - CPEI - CP13	507.855	-118.7665	98.2047	626.6215	389.0884
4	MEXI - LPUR - LNO3	1008.5791	-91.2847	71.3607	1099.8637	917.2944
5	LNO3 - VM15 - CP12	-23.4907	-374.7716	127.7485	351.2809	-398.2623
6	MORR - RLOV - CIC1	53.5456	-8.3741	60.5657	61.9197	45.1716
7	RLOV - CIC1 - FILO	50.0075	-103.2699	33.1005	153.2774	-53.2625
8	RLOV - ELAL - FILO	113.5624	10.6217	133.7806	102.9407	124.184
9	VAO1 - COND - RAYO	27.5166	5.0093	70.4653	22.5072	32.5259
10	COND - RAYO - MAYO	27.7424	-33.898	100.4116	61.6405	-6.1556
11	RAYO - MAYO - SALD	31.5287	-67.0167	102.9482	98.5454	-35.488
12	MAYO - ELCH - SALD	23.831	-60.4413	113.598	84.2724	-36.6103
13	JAMU - ELCH - SALD	54.5652	-9.6162	80.91	64.1814	44.9489
14	ELCH - SPMX - SFBC	50.697	-15.3281	70.3255	66.0251	35.369
15	MELR - SPMX - SFBC	45.7259	-97.3256	121.1439	143.0515	-51.5998
16	MELR - LLCO - COLO	10.3869	-30.5807	86.5436	40.9677	-20.1938
17	SPMX - MELR - LLCO	-1.4158	-81.1989	111.8572	79.7831	-82.6147
18	LOSA - LLCO - SPMX	11.0875	-14.5305	153.681	25.618	-3.4429
19	LOSA - LLCO - COLO	30.1973	-27.4171	113.3139	57.6143	2.7802

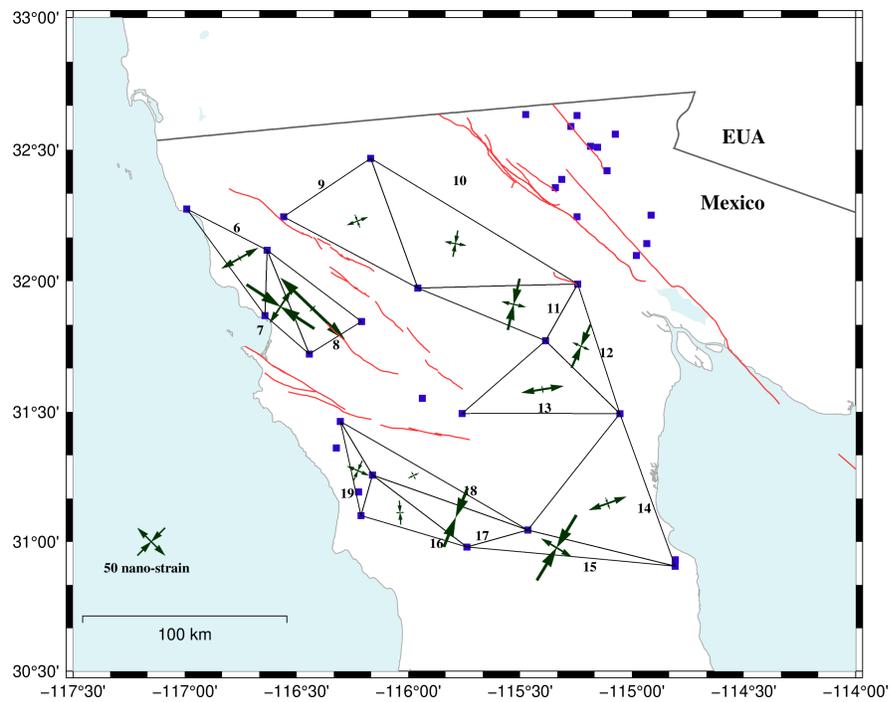
La deformación de cizalla, de área, $e1H$ y $e2H$ tiene unidades de nano-strain/a.

Los valores positivos indican extensión.

Los valores negativos indican contracción.



(a) Tensores de deformación en el área del Valle de Mexicali y el valle Imperial.



(b) Tensores de deformación del norte de Baja California excluyendo el área de Mexicali y el valle Imperial.

Figura 20. Tensores de deformación sobre el norte de Baja California, de acuerdo a los cálculos realizados predomina la componente de extensión.

4.3 Discusión

El análisis de deformación infinitesimal realizado a partir de arreglos triangulares de estaciones geodésicas temporales, nos permitió caracterizar el norte de Baja California en términos de traslación, rotación y tensores de deformación. De acuerdo con el resultado de traslación, el movimiento promedio del norte de Baja California sigue la dirección preferencial del movimiento de las velocidades geodésicas hacia el noroeste, esto si consideramos las velocidades que se encuentran en la placa Pacífico (Figura 16, arreglos 6-19), mientras que las velocidades sobre la placa Norteamericana (al este de las fallas Imperial, arreglos 1-3), las velocidades se orientan hacia el suroeste. Además, la magnitud de las velocidades incrementan al alejarse de la interacción entre las placas Norteamérica y Pacífico, si se considera un sistema de referencia absoluto como el ITRF 2008.

En cuanto al resultado de rotación, se pudo comprobar que la orientación de nuestra zona de estudio obedece el sentido horario, siendo acorde con los trabajos de Hagstrum y Filmer (1990), McQuarrie (2005) y Bennett y Oskin (2014). Sin embargo, el arreglo triangular que involucra a las estaciones RLOV, CIC1 y FILO sigue el sentido antihorario y tiene una magnitud de $5^\circ/\text{Ma}$ aproximadamente, siendo de magnitud mayor a lo estimado en el resto de la triangulación (excluyendo el área de Mexicali y el Valle Imperial).

Se probaron diferentes configuraciones (Figura 21) para detectar cambios en la orientación del arreglo triangular, no obstante obtuvimos resultados mayores a lo obtenido con el arreglo propuesto en la Figura 18(b).

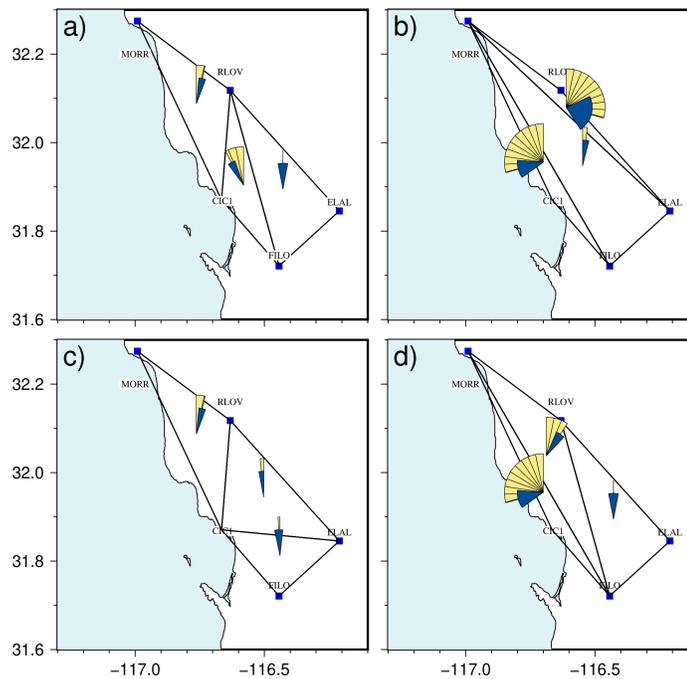


Figura 21. Diferentes configuraciones para las estaciones RLOV, CIC1 y FILO. El inciso a) corresponde a la configuración original utilizada en la Figura 17 y Fig 18(b).

Como se observa en la Figura 21, los arreglos que contienen a la estación CIC1 presentan rotación en sentido antihorario. Para descartar alguna clase de problema con la estación CIC1, se utilizaron las estaciones CAOC y CJGG para calcular la rotación de los arreglos de la Figura 21. Estas estaciones se encuentran aproximadamente a 2.5 kilómetros de la estación CIC1 por lo que la geometría de los arreglos no sufre un cambio significativo. Sin embargo, el sentido de rotación antihorario se mantiene, al no contar con otra estación cercana o entre CIC1 y FILO no es posible saber con certeza lo que origina el sentido antihorario en esta región.

Por último, de acuerdo con los resultados de tensores de deformación, se identificaron regiones que siguen un patrón similar de deformación, y que además guardan relación con la distribución de las fallas principales del norte de Baja California, tal como se muestra en la Figura 22. A partir de esta configuración, se proponen cinco bloques tectónicos que cubren el norte de Baja California, en los cuales también se incluirán las fallas San Jacinto, Elsinore y Newport-Inglewood del sur de California.

Por lo tanto, a partir de la configuración de bloques mostrada en la Figura 22 y Tabla 9, se realizará el modelado de bloques con el programa especializado TDEFNODE.

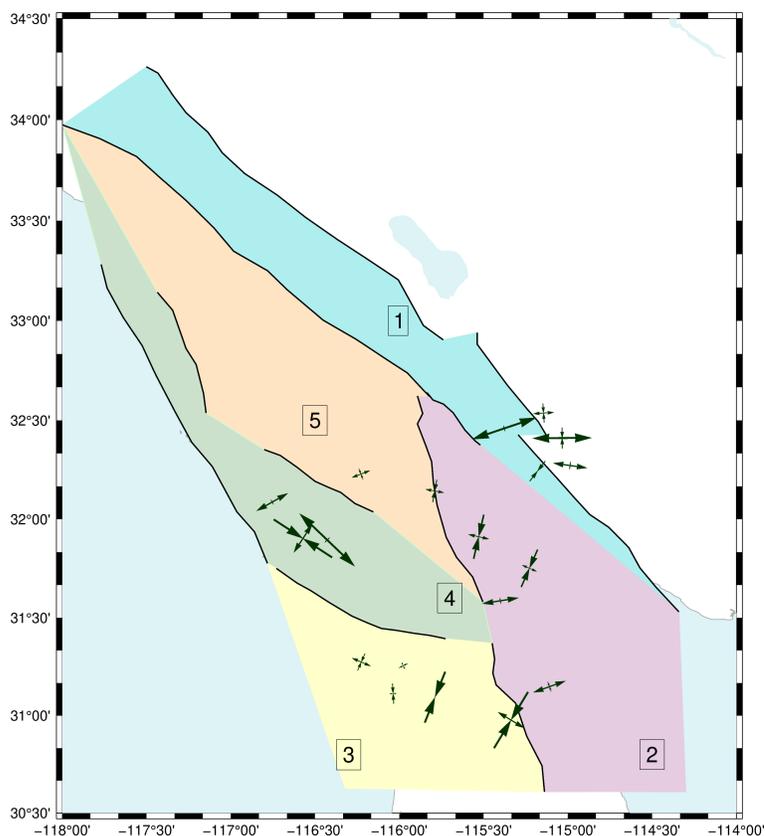


Figura 22. Agrupación en regiones de los tensores de deformación para el norte de Baja California, de acuerdo a su orientación y sentido de extensión o contracción.

Tabla 9. Configuración de los bloques tectónicos de acuerdo a las fallas y al estudio preliminar.

Número de bloque	Configuración 1	Configuración 2
1	Fallas San Jacinto, Elsinore, Imperial, Cerro prieto, Laguna salada.	Fallas San Jacinto, Elsinore, Imperial, Laguna salada.
2	Fallas Sierra Juárez, San Pedro Mártir, Laguna Salada.	Fallas Sierra Juárez, San Pedro Mártir, Laguna Salada, Cerro prieto.
3	Fallas Agua blanca y San Pedro Mártir.	
4	Fallas Vallecitos, Agua blanca, Coronado Banks, Newport-Inglewood.	Fallas Vallecitos, Agua blanca, Newport-Inglewood.
5	Fallas Elsinore, Sierra Juárez, Vallecitos, Newport-Inglewood.	

Capítulo 5. Modelación de la deformación del norte de Baja California

Uno de los objetivos de este trabajo de tesis es estimar si hay cambios en la acumulación de deformación en el norte de Baja California antes y después del sismo de El Mayor-Cucapah, ocurrido el 4 de abril del 2010. Esto mediante el modelado de bloques empleando el programa especializado TDEFNODE (McCaffrey, 2005). La selección del mejor modelo se realizó por medio de las pruebas estadísticas: 1) Intervalo de confianza para la media, 2) valor de chi-cuadrada y 3) la prueba de la estadística F.

5.1 Datos empleados para el modelo de bloques

Los datos empleados para constreñir el modelo de bloques consiste principalmente en velocidades geodésicas, además de información como localización, profundidad y dirección de echado de las fallas principales del norte de Baja California y el sur de California.

Las velocidades geodésicas se agruparon en dos periodos, el primer conjunto de datos cubre el período intersísmico 1993-2010 (anterior del sismo), donde se usaron velocidades de estaciones de las redes temporales (González-Ortega *et al.*, 2018) y el catálogo de SCEC; mientras que el segundo conjunto de datos abarca del año 2013 al 2019 (posterior al sismo), en el que se usaron estaciones de la redes REGNOM y NOTA. Ambos conjuntos de datos están referidos al sistema de referencia de Norteamérica fija.

5.2 Selección del mejor modelo

Para obtener el mejor modelo de bloques que represente el norte de Baja California y el sur de California se realizaron diferentes pruebas estadísticas a los datos a utilizar. Primero, se empleó el análisis para un intervalo de confianza para la media de los errores de las velocidades geodésicas. Después, se seleccionaron aquellos modelos con los mejores valores de chi-cuadrada obtenidos del programa TDEFNODE. Por último, se seleccionó el mejor modelo que ajusta a los datos, por medio de una prueba de estadística F.

5.2.1 Intervalo de confianza para la media de las velocidades geodésicas

Un intervalo de confianza es una técnica de estimación que permite acotar un par de valores, dentro de los cuales se encontrará la estimación puntual buscada (media o varianza) con una determinada probabilidad (Marco Sanjuán, 2020).

Para los datos geodésicos, se estimaron intervalos de confianza para la media muestral tomando en cuenta los errores de las velocidades. Esto, con la finalidad de tener un proceso que nos permitiera eliminar aquellas velocidades que presentan un alto valor de sigma, el cual pudiera llevar a obtener sesgos en el resultado de inversión. Al obtener un intervalo de confianza, se estiman dos valores que acotarán un rango dentro del cual se encontrará la media de nuestra población de datos, esto dentro de una probabilidad previamente establecida.

Para obtener el intervalo de confianza (Devore, 2008), se asume que los datos (en este caso los errores de los datos) siguen una distribución normal, de la cual se conoce el tamaño de la muestra n , la media muestral \bar{X} normalmente distribuida con valor esperado μ y su desviación estándar σ/\sqrt{n} , (ecuación 14).

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (14)$$

El valor de Z corresponde al valor de probabilidad que se asignará para el intervalo de confianza, el cual asignamos un valor del 95%. Este valor de probabilidad se puede encontrar en una tabla de distribución Z (Devore, 2008), donde el valor correspondiente para el 95% es igual a 1.96, el cual puede sustituirse de la ecuación 14, para dar paso a la ecuación 15:

$$P\left(-1.96 < \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} < 1.96\right) = 0.95 \quad (15)$$

Al resolver las desigualdades obtenemos la expresión:

$$\left(\bar{X} - 1.96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{X} + 1.96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) \quad (16)$$

Se empleó la ecuación 16, para determinar el intervalo de confianza para los datos antes del sismo y posterior a este, en la tabla 10, se presentan los resultados de este proceso.

Tabla 10. Intervalos de confianza al 95% para las velocidades GPS, en los periodos antes y después del sismo El Mayor-Cuapah del 2010.

Periodo 1993-2010			
	REGNOM (Tabla 2)	SCEC 1 (Tabla 1)	SCEC 2
n	42	77	72
\bar{X}	0.41	1.28	1.31
σ	0.24	0.59	0.57
IC al 95%	0.34 < 0.41 < 0.49	1.17 < 1.28 < 1.42	1.2 < 1.31 < 1.44
Periodo 2013-2019			
	REGNOM (Tabla 3)	NOTA (Tabla 4)	
n	86	100	
\bar{X}	0.14	0.03	
σ	0.35	0.06	
IC* al 95%	0.07 < 0.14 < 0.22	0.02 < 0.03 < 0.05	

5.2.2 Estimación de chi-cuadrada

La inversión realizada por TDEFNODE encuentra el conjunto de parámetros que minimiza la suma del valor de chi-cuadrada reducida X_n^2 , la cual se define como:

$$X_n^2 = \left(\frac{\sum r^2 / sF^2}{gdl} \right) \quad (17)$$

Donde r : es el residual (datos observados menos datos calculados); s : desviación estándar, F : factor de escala; gdl : grados de libertad. La suma se realiza sobre todos los datos de velocidades geodésicas.

Cada vez que se calcula un modelo usando TDEFNODE se obtiene un valor de X_n^2 , el cual representa el ajuste a los datos al emplear dicho modelo. Para obtener el modelo de bloques que mejor represente el norte de Baja California, se probaron diferentes modelos donde se probaron distintas configuraciones en los bloques propuestos.

En la Figura 23, se muestran seis diferentes configuraciones que se probaron, de las cuales se observan cambios en la geometría de algunos bloques (subfigura a y b), se considera la inclusión de la falla oceánica Coronado banks (subfigura d y e), también se tomó en cuenta separar las fallas del norte de Baja California y el sur de California (subfigura c), y solo usar las fallas del norte de Baja California (subfigura f).

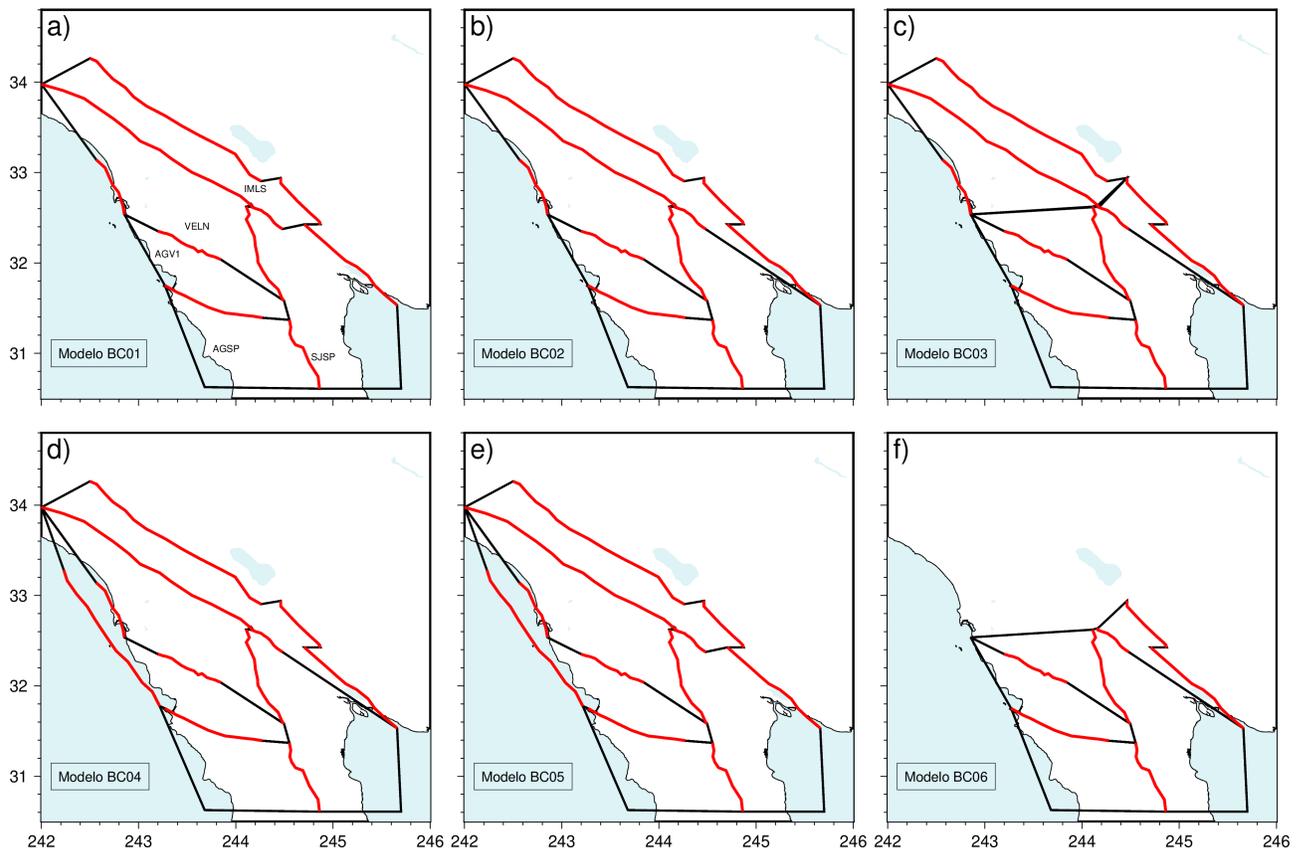


Figura 23. Distintas configuraciones de los bloques tectónicos. Las líneas rojas representan las fallas y las líneas negras las pseudo-fallas.

La Tabla 11, muestra el valor de chi-cuadrada de los diferentes modelos calculados con los datos de las velocidades geodésicas del periodo 1993-2010.

Tabla 11. Características de los modelos realizados: grados de libertad, número de datos y de parámetros.

Modelo	χ^2	DOF	Ndatos	Nparam	Nota
BC01	4.905	318	360	42	12 fallas; 5 bloques: en el bloque IMLS no esta la falla Cerro prieto
BC02	4.755	318	360	42	12 fallas; 5 bloques: en el bloque IMLS esta la falla Cerro prieto
BC03	4.786	306	360	54	12 fallas; 7 bloques
BC04	4.264	341	384	43	13 fallas; geometría similar a BC02
BC05	4.39	341	384	43	13 fallas; geometria similar a BC01
BC06	19.679	29	68	39	solo velocidades de REGNOM
BC08	3.543	254	296	42	Usando intervalos de confianza; geometria similar a BC04
BC10	6.717	266	296	30	$\phi = 1$ para todas las fallas
BC11	6.441	266	296	30	$\phi = 0$ para todas las fallas

$\phi = 0$ las fallas están libres en superficie.

$\phi = 1$ las fallas están bloqueadas en superficie.

El valor de chi-cuadrada indica que tan bien se ajustaron los datos, en este caso las velocidades geodésicas, a los parámetros del modelo. A menor valor de chi-cuadrada, se deduce que dicho modelo ajusta mejor a los datos. Sin embargo, como se observa en la Tabla 11, hay modelos con el mismo numero de datos,

parámetros y grados de libertad, pero con un valor diferente de chi-cuadrada. Entonces, ¿Como seleccionar el mejor modelo?, para elegir el modelo que mejor represente la zona de estudio aplicamos una prueba de la estadística F en los modelos propuestos.

5.2.3 Prueba de estadística F

La prueba de estadística F es usada cuando se busca comparar varianzas. Esta prueba nos dice que tan bien dos diferentes modelos ajustan los datos, en los cuales los modelos difieren en el número de parámetros a ajustar (Stein y Gordon, 1984).

La prueba de la estadística F o Test F , se calcula por medio de la ecuación 18, donde χ_1^2 y χ_2^2 representan la varianza de los modelos o su valor de χ^2 , mientras que ν_1 y ν_2 , representan los grados de libertad. Mediante la prueba F se puede inferir si es justificable el cambio de los parámetros en un modelo dado.

$$F = \frac{\chi_1^2/\nu_1}{\chi_2^2/\nu_2} \quad (18)$$

En la Tabla 12, se muestra el resultado de aplicar la prueba F a los modelos presentados en la Tabla 11. A partir de este resultado se puede concluir que el mejor modelo es el BC04, en el cual se consideran 13 fallas y 5 bloques.

Tabla 12. Selección del mejor modelo de acuerdo a la prueba de la estadística F para el periodo 1993-2010.

Prueba	Probabilidad	Resultado
¿Es el modelo BC01 mejor que el BC02?	0.39	No
¿Es el modelo BC02 mejor que el BC01?	0.61	Si
¿Es el modelo BC02 mejor que el BC03?	0.65	Si
¿Es el modelo BC02 mejor que el BC04?	0.05	No
¿Es el modelo BC04 mejor que el BC02?	0.95	SI
¿Es el modelo BC04 mejor que el BC05?	0.6	Si
¿Es el modelo BC05 mejor que el BC04?	0.39	No
¿Es el modelo BC04 mejor que el BC08?	0.82	Si
¿Es el modelo BC08 mejor que el BC10?	0.99	Si
¿Es el modelo BC04 mejor que el BC10?	0.99	Si
¿Es el modelo BC08 mejor que el BC11?	0.99	Si
¿El el modelo BC08 mejor que el BC06?	1	Si
¿Es el modelo BC04 mejor que el BC06?	1	Si
¿Es el modelo BC06 mejor que el BC04?	0	No

5.3 Modelo de bloques: antes y después del sismo El Mayor-Cucapah

La formación de los bloques no sigue reglas previamente definidas, sin embargo esta se adecúa a las características propias de la región a estudiar, principalmente de rasgos sismotéctonicos como la presencia de fallas, la sismicidad, entre otros.

Se evaluaron diferentes modelos (Figura 23 y Tabla 11), donde se probaron distintas configuraciones entre los bloques, fallas, y datos de velocidades geodésicas. A partir de las pruebas estadísticas, el modelo de bloques que mejor ajusta a las velocidades geodésicas y representa los rasgos sismotéctonicos del norte de Baja California y el sur de California es el modelo BC04, el cual toma en cuenta cinco bloques tectónicos y 13 fallas. Este modelo se usó con el conjunto de velocidades geodésicas que comprenden el periodo 1993-2010 (antes del sismo), y con las velocidades para el periodo 2013-2019 (después del sismo).

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos al emplear el mejor modelo.

5.3.1 Campo de velocidades

En esta sección se muestra el campo de velocidades para los periodos 1993-2010 y 2013-2019, que el programa TDEFNODE empleó para calcular las tasas de deformación, rotación, tasas de deslizamiento y de déficit.

En secciones anteriores se presentó el total de velocidades geodésicas recolectadas para cada periodo (Tabla 1 y 2 para 1993-2010, Tabla 3 y 4 para 2013-2019). Sin embargo, TDEFNODE excluye de la inversión aquellas velocidades que se encuentran fuera del dominio de los bloques, además se incluyó la restricción de excluir las velocidades que no cumplieran con el criterio del intervalo de confianza de la media para los errores de las velocidades geodésicas. Del total de velocidades geodésicas para el periodo 1993-2010 (Figura 24(a)), se rechazaron 96 estaciones, dejando un total de 95. Mientras que para el periodo 2013-2019 (Figura 24(b)), se rechazaron 87 estaciones, quedando un total de 99 estaciones.

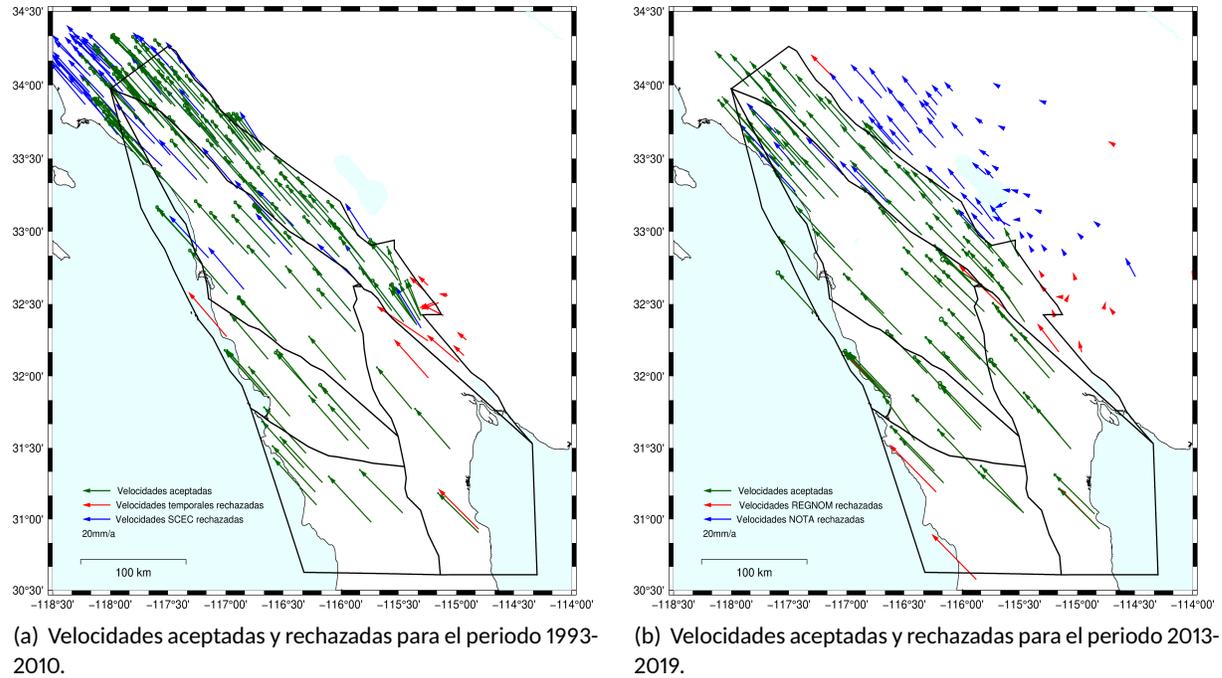


Figura 24. Velocidades empleadas para los periodos: a) 1993-2010 y b) 2013-2019. Vectores en color verde representan las velocidades empleadas en el modelo. Vectores de color azul, velocidades excluidas de SCEC y NOTA. Vectores en color rojo, velocidades excluidas de REGNOM y temporales.

Al final de la inversión, se obtienen estadísticas con base en el número de observaciones contenidas en cada bloque, estas son expresadas en términos de error medio cuadrático normalizado (Normalized Root Mean Square - NRMS) y error medio cuadrático pesado (Weighted Root Mean Square - WRMS).

El NRMS (ec. 19) indica el grado de ajuste de los datos, se considera como bueno que el NRMS sea cercano a la unidad, mientras que el WRMS (ec. 20) da una medida de la dispersión ponderada a posteriori en los ajustes y tiene unidades del tipo de medida, en este caso de mm/a.

$$NRMS = \left[N^{-1} \left(\sum_{i=1}^N \frac{r_i^2}{\sigma_i^2} \right) \right]^{1/2} \quad (19)$$

$$WRMS = \left[\left(\sum_{i=1}^N \frac{r_i^2}{\sigma_i^2} \right) / \left(\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} \right) \right]^{1/2} \quad (20)$$

Donde r es el residual, σ es el error estándar y N el número de datos.

En la Tabla 13, se muestran los valores de NRMS y WRMS para cada bloque analizado y de acuerdo al periodo de observaciones.

Tabla 13. Valores de NRMS y WRMS de acuerdo al número de observaciones por bloque y periodo.

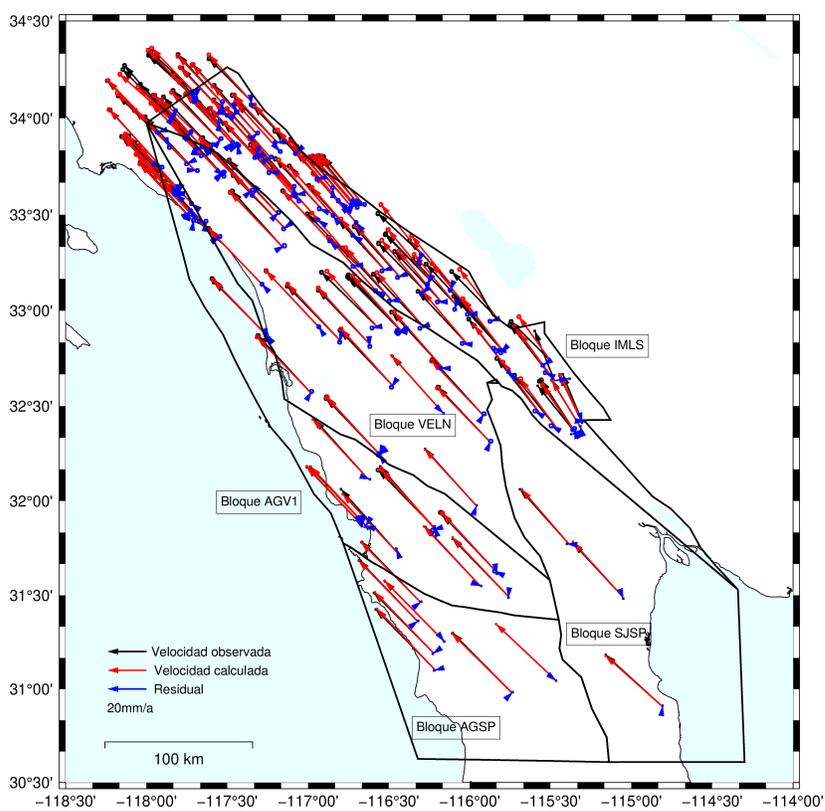
Bloque	Modelo 1993-2010			Modelo 2013-2019		
	Obs*	NRMS	WRMS ¹	Obs	NRMS	WRMS
IMLS	116	2.186	2.032	74	10.609	1.398
SJSP	6	1.605	0.604	28	1.539	1.216
VELN	64	0.808	0.747	58	4.74	0.653
AGV1	40	1.524	0.769	26	8.682	3.612
AGSP	14	0.883	0.335	12	2.632	2.023

*: indica el número de las componentes de la velocidad.

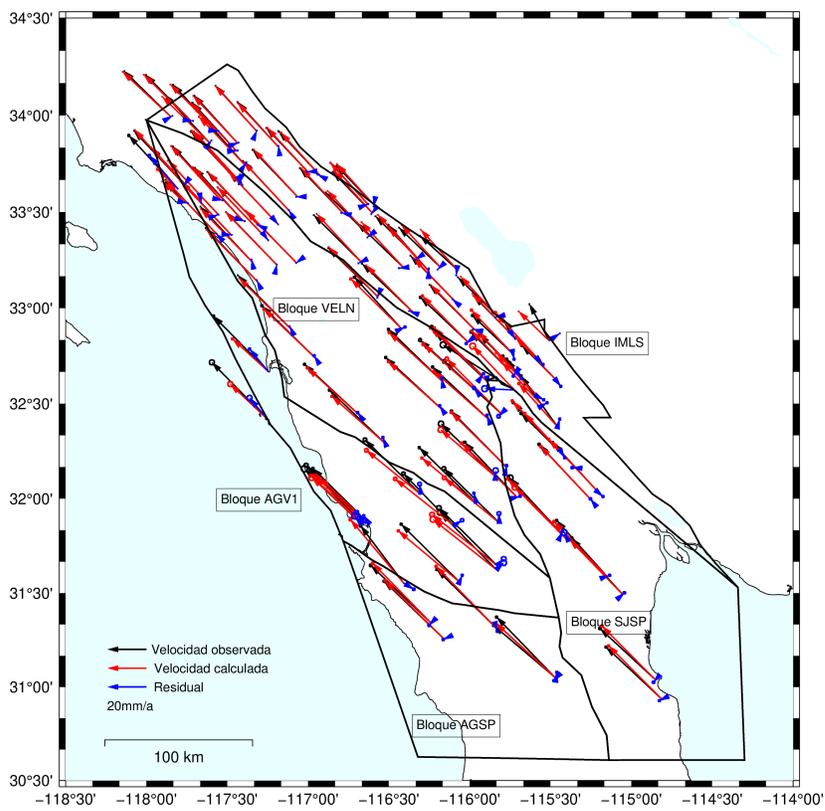
¹: unidades en mm/a.

En la Figura 25 se muestran las velocidades observadas, calculadas y su residual para cada período analizado. Si observamos la distribución de velocidades, se puede notar que en el período 1993-2010 (Figura 25(a)), el bloque IMLS tiene el mayor número de datos, este bloque cubre el área de Mexicali, el valle Imperial, así como el área entre las fallas San Jacinto y Elsinore; mientras que hacia el sur, el bloque SJSP (bloque que cubre Sierra Juárez y San Pedro Mártir) contiene el menor número de observaciones con 3 estaciones. Por su parte en el período 2013-2019 (Figura 25(b)), se observa una mejor distribución de los datos, aunque el bloque IMLS mantiene el mayor número de observaciones (37 estaciones), se nota una mejora en el bloque SJSP, el cual cuenta con 14 estaciones.

A partir del valor de NRMS para las observaciones de cada período, se puede observar que las velocidades del período 1993-2010 ajustan mejor el modelo de bloques realizado, con respecto a las velocidades del período 2013-2019. Esto debido a que las observaciones del primer período tienen valores cercanos a la unidad, contrario a lo obtenido para el período posterior al sismo.



(a) Campo de velocidades para el periodo 1993-2010.



(b) Campo de velocidades para el periodo 2013-2019.

Figura 25. Campo de velocidades intersísmico para los periodo: a) 1993-2010 y b) 2013-2019. Velocidades con respecto a la placa Norteamérica.

5.3.2 Tensores de deformación

Para el periodo 1993-2010 (antes del sismo), se observa que domina la componente de extensión para la mayoría de los bloques (Tabla 14, Figura 26(a)). Los tensores para los bloques IMLS y VELN (que cubren las fallas del sur de California, el área de Mexicali y el Valle Imperial), conservan la componente de extensión orientada ligeramente ENE-OSO, mientras que los bloques SJSP y el bloque AGV1 su componente de extensión se encuentra hacia el NE-SO. Sin embargo el bloque AGSP presenta compresión hacia el ENE-OSO contrario a lo visto en los demás bloques.

Para el período después del sismo (2013-2019), se sigue conservando el carácter extensivo del área de estudio, sin embargo el sentido de los tensores cambió ligeramente (Tabla 14, Figura 26(b)). Los bloques IMLS, VELN y AGSP presentan una extensión orientada hacia el ONO-ESE, para el bloque SJSP la extensión se encuentra hacia el NO-SE. Por el contrario el bloque AGV1 presenta compresión totalmente, siendo mayor hacia el NE-SO.

Tabla 14. Valores de los tensores de deformación para los períodos 1993-2010 y 2013-2019.

Modelo 1993-2010					
Bloque	Longitud (°)	Latitud (°)	$e1H$	$e2H$	Azimut al $e1H$ (°)
IMLS	-116.067	32.953	-5.41	21.85	147.04
SJSP	-115.027	31.454	-41.21	81.03	120.63
VELN	-116.533	32.677	4.51	13.56	151.73
AGV1	-116.746	32.211	-4.66	25.66	130.64
AGSP	-115.873	31.276	-53.69	6.25	64.05
Modelo 2013-2019					
Bloque	Longitud (°)	Latitud (°)	$e1H$	$e2H$	Azimut al $e1H$ (°)
IMLS	-116.067	32.953	-2.54	11.75	105.66
SJSP	-115.027	31.454	11.16	40.56	141.14
VELN	-116.533	32.677	-16.27	38.99	91.07
AGV1	-116.746	32.211	-100.05	-32.87	115.43
AGSP	-115.873	31.276	-12.26	90.21	94.46

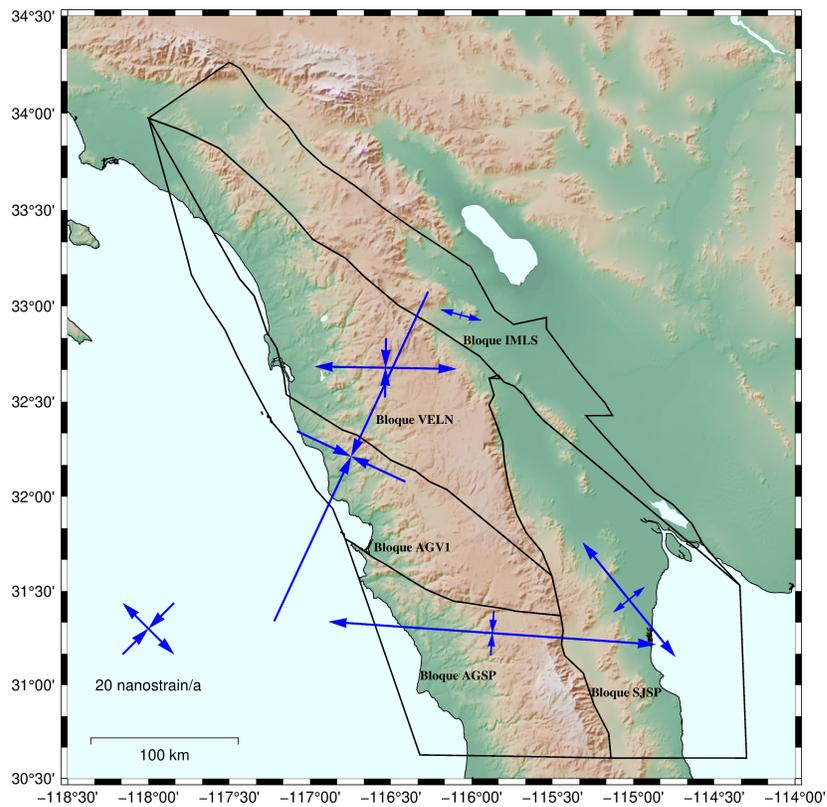
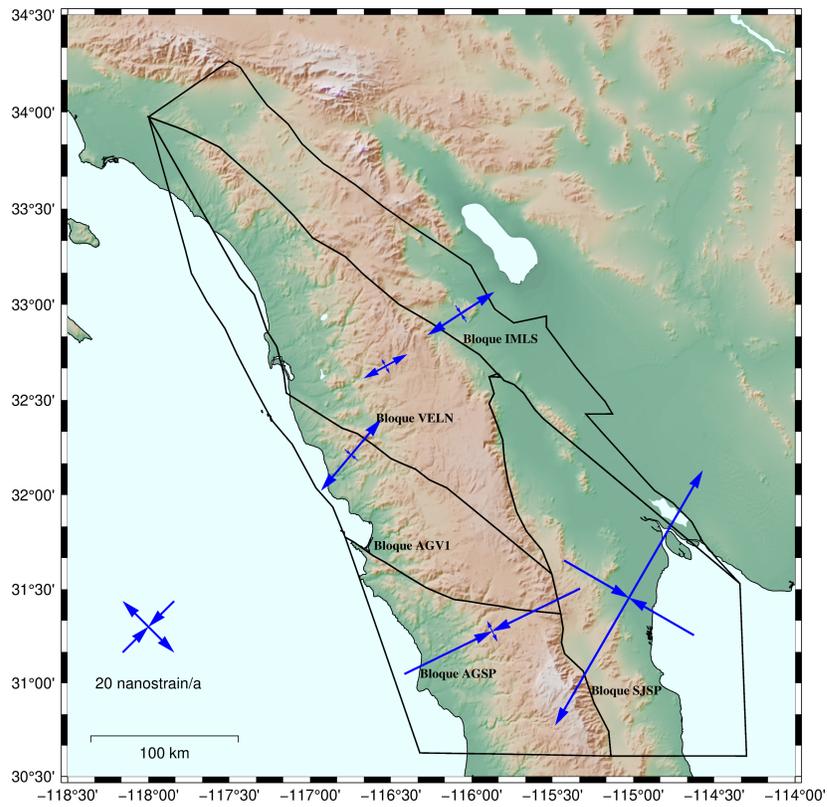


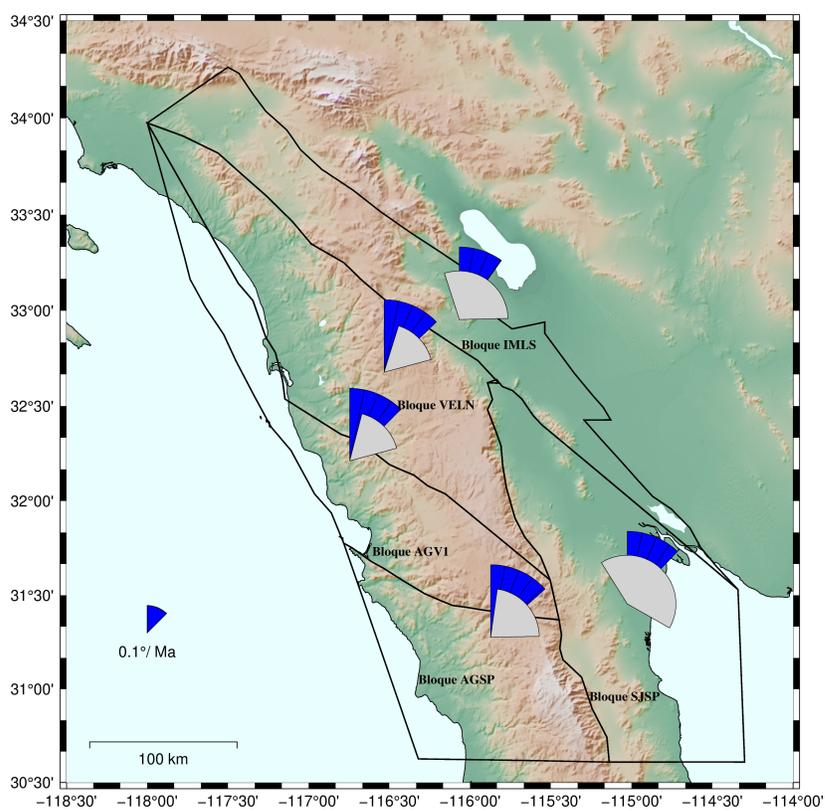
Figura 26. Tensores de deformación de los cinco bloques tectónicos estudiados con TDEFNODE para antes y después del sismo de El Mayor-Cucapah.

5.3.3 Rotación

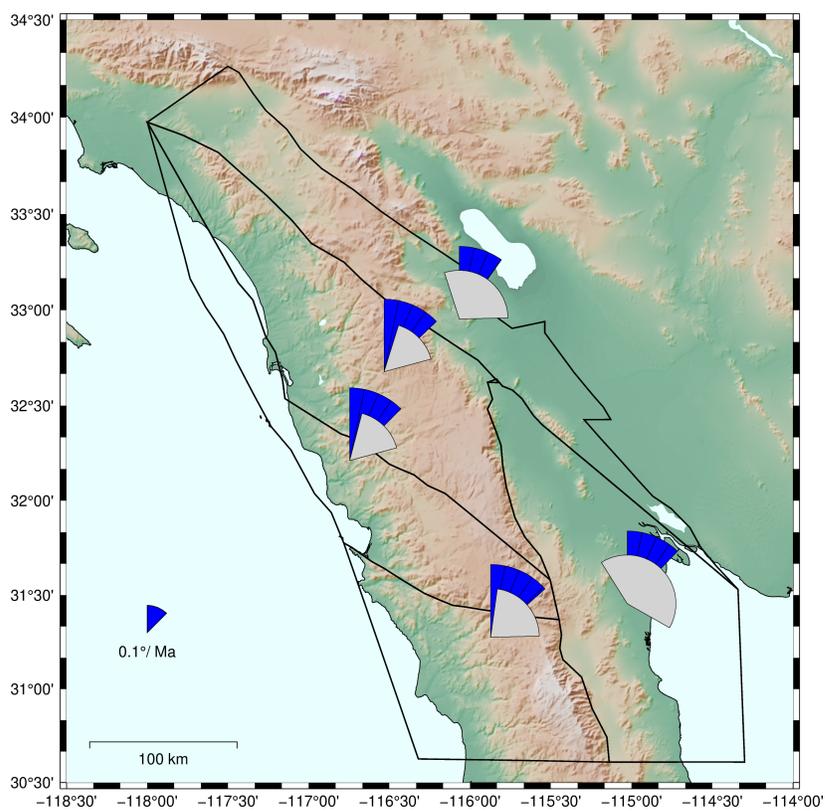
De acuerdo a los resultados de rotación presentados en la Tabla 15, se observa el sentido horario de rotación para todos los bloques y para ambos periodos. En la Figura 27(a), se muestra la rotación para el período 1993-2010, donde la rotación esta en un rango entre 0.35-0.48°/Ma. Para el periodo 2013-2019 se ve ilustrado en la Figura 27(b), donde la rotación se encuentra entre 0.29-0.51°/Ma.

Tabla 15. Valores de rotación de los bloques para ambos periodos.

Bloque	Longitud (°)	Latitud (°)	1993 - 2010	2013 - 2019
			$\Omega \pm \sigma$ (°/Ma)	$\Omega \pm \sigma$ (°/Ma)
IMLS	-116.067	32.953	0.3542 ± 0.532	0.3515 ± 0.0941
SJSP	-115.027	31.454	0.4382 ± 0.7595	0.4976 ± 0.4159
VELN	-116.533	32.677	0.4607 ± 0.2878	0.5109 ± 0.0782
AGV1	-116.746	32.211	0.4476 ± 0.3024	0.2948 ± 0.1003
AGSP	-115.873	31.276	0.4841 ± 0.4047	0.4372 ± 0.6432



(a) Rotación de los bloques para el período 1993-2010.



(b) Rotación de los bloques para el período 2013-2019.

Figura 27. Rotación de los bloques para los periodos 1993-2010 (antes del sismo) y 2013-2019 (después del sismo). El abanico de color gris representa la incertidumbre del valor de rotación. El abanico de color azul representa el valor de rotación.

5.3.4 Acumulación de deformación

En esta sección se presentarán los resultados de acumulación de deformación, los cuales son caracterizados a través de los parámetros: 1) tasa de deslizamiento, 2) grado de acoplamiento (valor ϕ) y, 3) déficit en la tasa de deslizamiento.

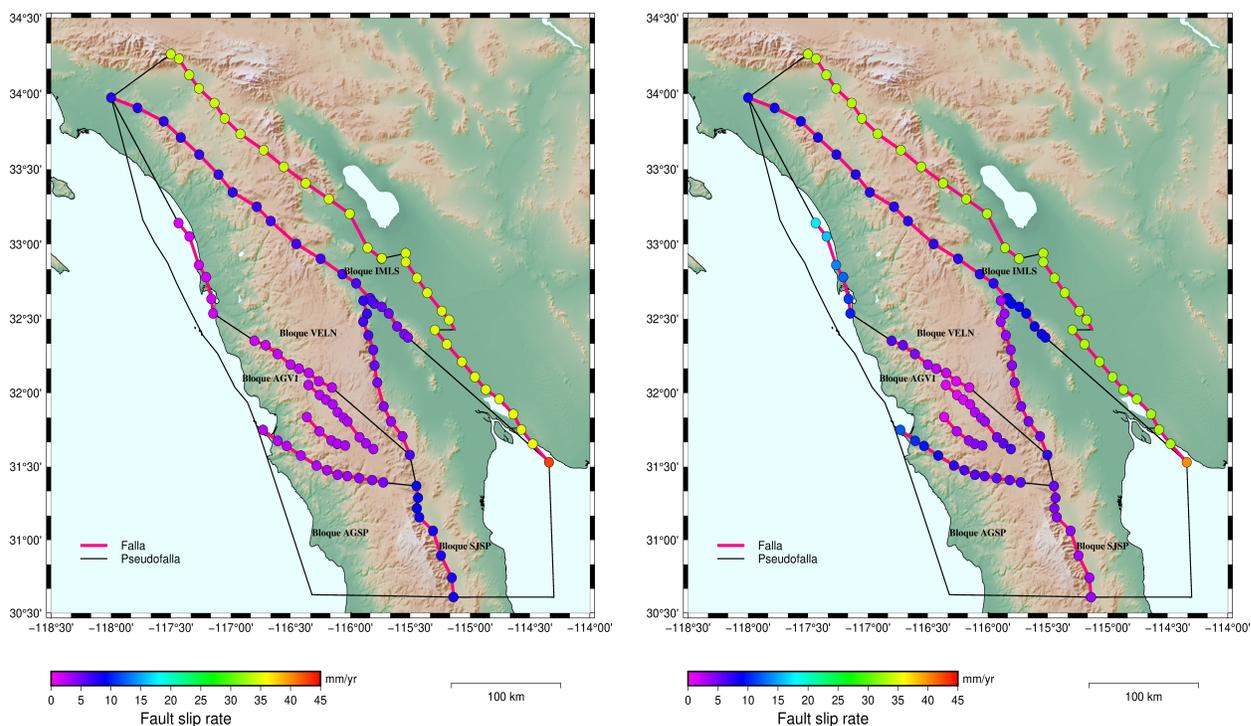
5.3.4.1 Tasa de deslizamiento

La tasa de deslizamiento nos dice que tan rápido se deslizan los dos lados de una falla en relación con el otro, de acuerdo con TDEFNODE este valor está más cercano al deslizamiento que se produce en la falla a un largo plazo, o bien a través de varios ciclos sísmicos. En la Tabla 16, se presenta el resultado obtenido para los periodos 1993-2010 y 2013-2019, mientras que en la Figura 28, se muestra visualmente el deslizamiento obtenido en los nodos de la fallas.

Las fallas Cerro Prieto e Imperial son las que registran el mayor valor de tasa de deslizamiento entre 32 y 35 mm/a (en ambos periodos), valores similares a los reportados en otros trabajos (Bennett *et al.*, 1996; Velázquez Zaguilan, 2020), sin embargo llama la atención el alto valor que registra la falla San Jacinto con alrededor de 33 mm/a, cuando se reportan valores alrededor de 9-15 mm/a (Petersen y Wesnousky, 1994; Spinler *et al.*, 2010). Para el resto de la zona de estudio las fallas indican una tasa de deslizamiento entre 1.5 a 9.0 mm/a para el periodo anterior al sismo (Figura 28(a)), siendo la falla San Pedro Martir la que registra una mayor tasa de deslizamiento entre 7.6 a 9.0 mm/a. Mientras que para el periodo posterior al sismo (Figura 28(b)), las tasas de deslizamiento se encuentran dentro de 1.0 a 9.0 mm/a. Las fallas que presentaron mayor variación entre periodos son: Laguna Salada (antes: 4.1-4.9 mm/a, después: 8.6-9.0 mm/a); San Pedro Mártir (antes: 4.0-9.0 mm/a, después: 3.5-7.2 mm/a); Vallecitos (antes: 1.8-2.5 mm/a, después: 1.2-6.4 mm/a); San Miguel (antes: 2.3-3.0 mm/a, después: 0.8-6.4 mm/a); Agua blanca (antes: 2.1-4.2 mm/a, después: 5.7-12.1 mm/a) y Newport-Inglewood (antes: 1.4-1.5 mm/a, después: 10.0-17.3 mm/a).

Tabla 16. Tasas de deslizamiento para las fallas del norte de Baja California y el sur de California para los periodos 1993-2010 y 2013-2019.

Falla	Tasa de deslizamiento (mm/a)	
	1993-2010	2013-2019
Cerro Prieto	34 - 35	32.9 - 33.1
Imperial	32.4 - 34.5	33.1 - 33.4
Laguna Salada	4.1 - 4.9	8.6 - 9.0
Sierra Juárez	4.0 - 7.7	3.1 - 7.2
San Pedro M	7.6 - 9.0	3.5 - 5.3
Vallecitos	1.8 - 2.5	1.2 - 6.4
San Miguel	2.3 - 3.0	0.8 - 6.4
3 hermanos	2.4 - 2.8	1.0 - 4.6
Agua blanca	2.1 - 4.2	5.7 - 12.1
Newport-Inglewood	1.4 - 1.5	10.0 - 17.3
Elsinore	6.8 - 8.9	7.3 - 8.5
San Jacinto	33.1 - 34.2	33.2 - 33.4



(a) Tasa de deslizamiento para antes del sismo (1993-2010).

(b) Tasa de deslizamiento para después del sismo (2013-2019).

Figura 28. Tasas de deslizamiento para las fallas del norte de Baja California y el sur de California para los periodos 1993-2010 y 2013-2019.

5.3.4.2 Déficit de tasa de deslizamiento y acoplamiento de las fallas

El déficit en la tasa de deslizamiento y el grado de acoplamiento, son parámetros que cuantifican y caracterizan la acumulación de deformación intersísmica en las fallas. El valor de acoplamiento ϕ tiene valores entre 0 y 1, donde 0 indica la posibilidad de movimiento asísmico o *creep*, mientras que 1 indica que la falla se encuentra bloqueada y por ende acumulando deformación para ser liberada en un sismo.

De acuerdo a la Tabla 17, en el periodo 1993-2010 (Figura 29), 7 de las 12 fallas estudiadas se encuentran acumulando deformación intersísmica ($\phi = 1$), dentro de estas fallas se encuentran la falla Imperial y Laguna Salada, por su parte Cerro Prieto y Elsinore presentan un alto grado de acoplamiento más no se encuentran totalmente acopladas ($\phi = 0.805$ y $\phi = 0.989$, respectivamente). En la Figura 29(a), se representa visualmente el déficit en la tasa de deslizamiento, por su parte el valor de ϕ o de acoplamiento se representa en la Figura 29(b)).

Tabla 17. Déficit en la tasa de deslizamiento y grado de acoplamiento (bloqueo) para las fallas del norte de Baja California y el sur de California, para antes (1993-2010) y después (2013-2019) del sismo del El Mayor-Cucapah.

Falla	1993 -2010		2013-2019	
	Déficit	$\phi \pm \sigma$	Déficit	$\phi \pm \sigma$
Cerro prieto	27.8 - 33.9	0.805 ± 0.037	32.9 - 33.1	1 ± 0.27
Imperial	34.2 - 34.5	1 ± 0.186	33.1 - 33.4	1 ± 0.015
Laguna Salada	4.1 - 4.9	1 ± 0.576	0.0	0 ± 0.198
Sierra Juárez	4.0 - 7.7	1 ± 0.411	0.3 - 0.7	0.094 ± 0.212
San Pedro	7.6 - 9.0	1 ± 0.549	2.6 - 4.3	0.817 ± 1.963
Vallecitos	0.0	0.015 ± 0.669	0.0	0.0 ± 0.567
San Miguel	2.3 - 3.0	1 ± 0.369	0.1 - 1.1	0.183 ± 0.440
3 hermanos	2.4 - 2.8	1 ± 0.721	0.2 - 0.8	0.175 ± 1.842
Agua blanca	1.3 - 2.5	0.596 ± 0.470	5.7 - 12.1	1 ± 0.298
Newport-Inglewood	1.4 - 1.5	1 ± 1.625	0.0	0 ± 0.042
Elsinore	6.7 - 8.8	0.989 ± 0.07	6.8 - 7.7	0.924 ± 0.014
San Jacinto	3.82 - 3.92	0.115 ± 0.082	11.5	0.346 ± 0.011

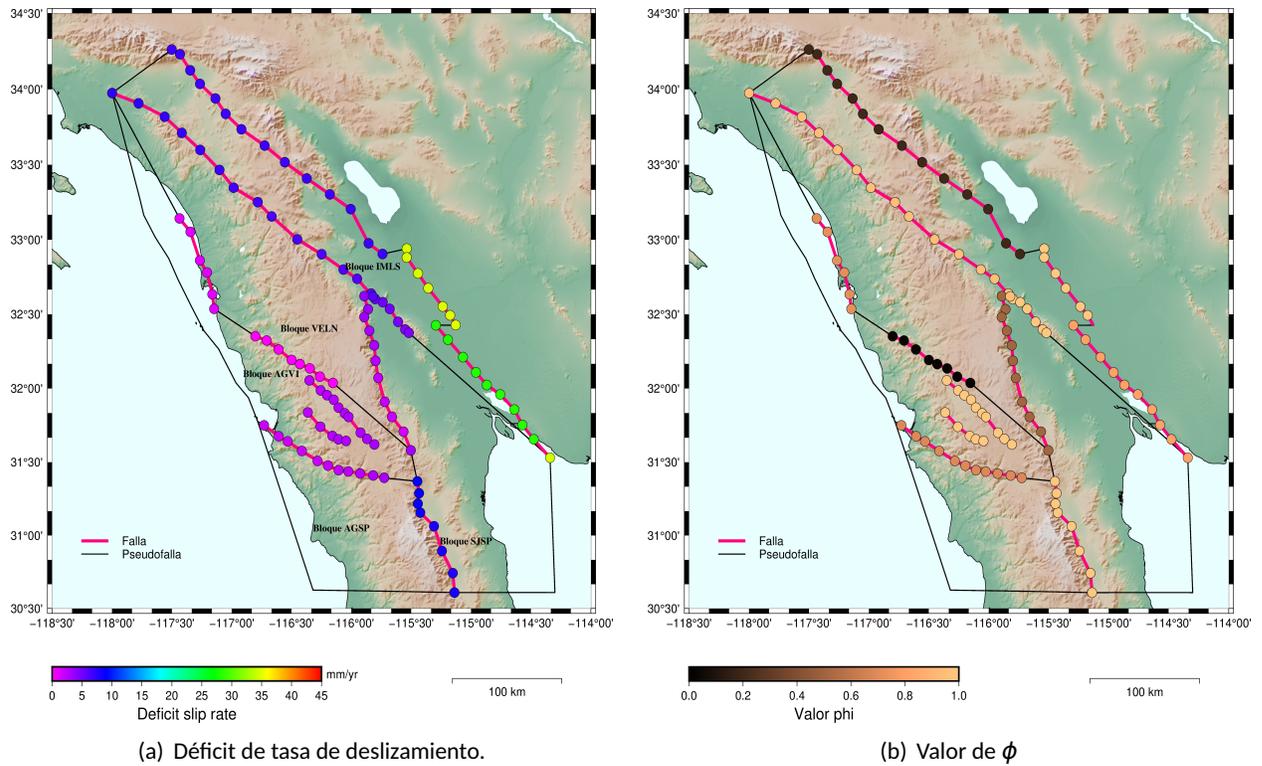


Figura 29. Déficit de tasa de deslizamiento y valor de acoplamiento para las fallas del norte de Baja California y sur de California para el periodo 1993-2010 (anterior al sismo).

En la Figura 30, se representa el periodo posterior al sismo (2013-2019), donde 3 de las 12 fallas se encuentran completamente acopladas ($\phi = 1$) Estas son las fallas Imperial, Cerro Prieto y Agua blanca, mientras que las fallas San Pedro Mártir y Elsinore se encuentran con un alto grado de acoplamiento entre 0.817 y 0.924 respectivamente. En la Figura 30(a) se representa el déficit de las fallas, mientras que en la Figura 30(b) el valor de acoplamiento.

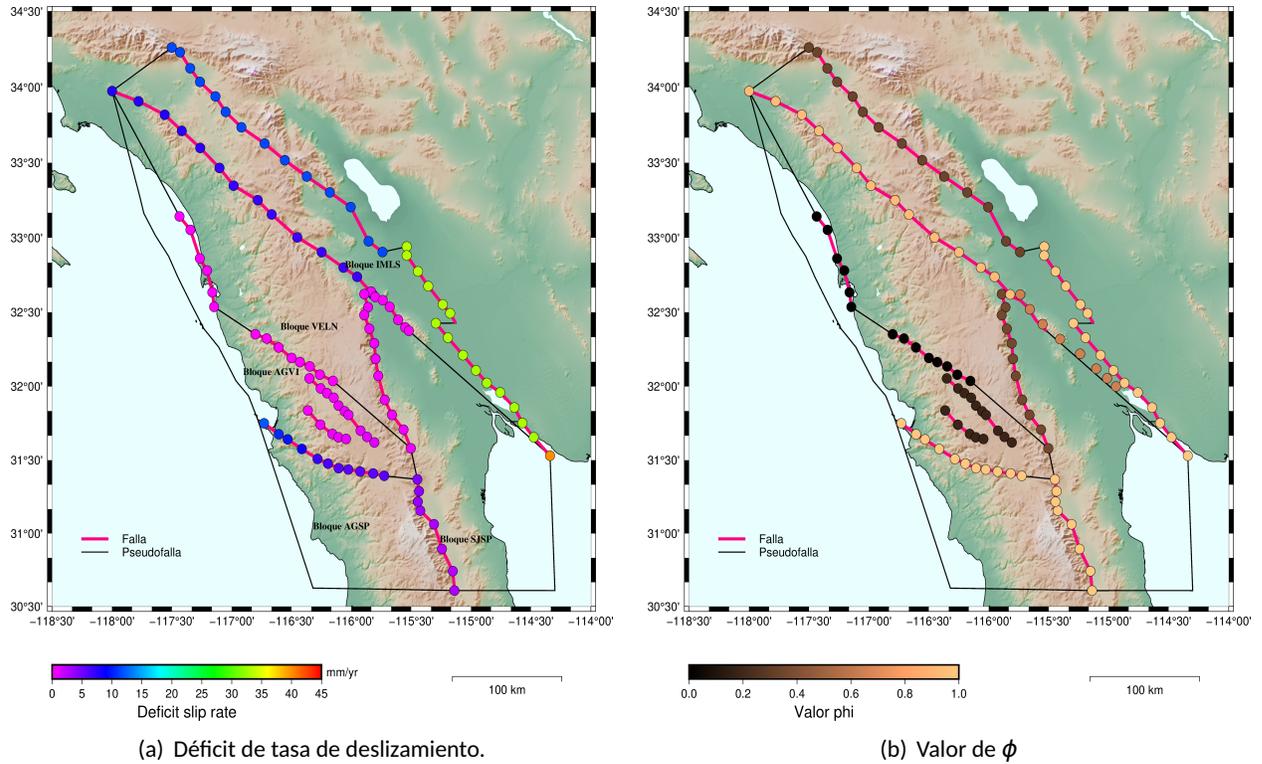


Figura 30. Déficit de tasa de deslizamiento y valor de acoplamiento para las fallas del norte de Baja California y sur de California para el periodo 2013-2019 (posterior al sismo).

5.4 Estimación del momento sísmico

De acuerdo con Chang *et al.* (2016), la tasa de déficit de deslizamiento puede usarse para cuantificar la acumulación de la energía sísmica en las fallas. Para esto, primero se asume una velocidad de momento escalar de un mecanismo de doble par, expresado como:

$$\dot{M} = \mu AV_{def} \quad (21)$$

Donde: μ es el módulo de cizalla (30 GPa); A es el área de ruptura de la falla, la cual se define al multiplicar la longitud de la falla por la profundidad de bloqueo; y V_{def} es el promedio de tasa de déficit de todos los nodos de la falla.

A partir de la ecuación 21, se obtiene la velocidad de acumulación anual de momento sísmico, por lo

que el momento total de T años, después del último sismo se obtiene de:

$$M_0 = \dot{M} \times T \quad (22)$$

Donde M_0 será la cantidad de momento sísmico liberado en el próximo evento sísmico.

A partir de la ecuación 23 de Hanks y Kanamori (1979), se puede obtener la magnitud de momento (M_w) correspondiente al momento sísmico:

$$M_w = \frac{2}{3}(\log M_0 - 9.1) \quad (23)$$

Se calculó el momento sísmico y la magnitud de momento para las fallas Cerro prieto, Imperial y San Miguel, ya que estas fallas tienen sismos de magnitud considerable en los últimos años. Para Cerro prieto se tomó en cuenta el sismo de M_w 6.1 de 1980, para la falla Imperial el sismo de M_w 7.1 de 1979 y para la falla San Miguel el sismo de M_l 6.8 de 1956.

En la Tabla 18, se muestra el momento sísmico anual que acumula la falla, el momento sísmico que acumula la falla en 40 años y 60 años respectivamente, y su correspondiente magnitud momento.

Tabla 18. Momento sísmico anual, acumulado y magnitud momento para las fallas Cerro prieto, Imperial y San Miguel.

Falla	Longitud (km)	Profundidad (km)	V_{def} (mm/a)	M_0 ($N/m^2 \cdot a$)	Tiempo	$M_0 \times T$ (N/m^2)	M_w
Cerro prieto	134.9	6	28.7	6.97×10^{17}	40 años	2.79×10^{19}	6.9
Imperial	69.9	6	34.4	4.34×10^{17}	40 años	1.73×10^{19}	6.8
San Miguel	71	6	2.7	8.63×10^{16}	60 años	5.18×10^{18}	6.4

De acuerdo con el resultado obtenido, en la falla Cerro prieto se acumula anualmente $6.97 \times 10^{17} N/m^2 \cdot a$, en la falla Imperial se acumula $4.34 \times 10^{17} N/m^2 \cdot a$ y en la falla San Miguel $8.63 \times 10^{16} N/m^2 \cdot a$. Si toda la energía acumulada se libera en un evento sísmico, podría producir un sismo de M_w 6.9 en la falla Cerro Prieto, M_w 6.8 en la falla Imperial y de M_w 6.4 en la falla San Miguel.

5.5 Discusión

La elección del modelo de bloques que represente de manera adecuada el norte de Baja California y el sur de California, se llevó a cabo al seguir los criterios de: 1) Estudio previo de deformación infinitesimal rea-

lizado por medio de triangulación de estaciones geodésicas y 2) Pruebas estadísticas (Intervalo de confianza para la media, Valor de chi-cuadrada y Prueba de la estadística F).

Al obtener el mejor modelo de acuerdo con las pruebas realizadas, se obtuvieron resultados donde se observaron cambios en la acumulación de deformación en la zona debido a la ocurrencia del sismo El Mayor-Cucapah de Mw 7.2 (2010).

De acuerdo a las velocidades analizadas, el periodo anterior al evento sísmico (1993-2010), ajusta mejor el modelo de bloques propuesto, al tener valores de NRMS cercanos a la unidad, en contraste con el modelo 2013-2019, donde el único bloque que tiene valores cercanos a uno, es el bloque SJSP. El alto valor de NRMS para el periodo 2013-2019 puede darse por distintos factores como: la cantidad de datos, distintos métodos de procesamiento de los datos; se usaron diferentes redes (catálogo SCEC para 1993-2010 y red NOTA para 2013-2019); además, el periodo de tiempo es desigual, ya que para el primer periodo analizado se cuenta con información de 17 años contra 7 años para el segundo periodo, donde para el periodo posterior hay velocidades que aún contienen componentes de relajación posísmica.

A pesar de la discrepancia en el ajuste de las velocidades, se observa que para la deformación interna de los bloques, representado por medio de tensores, y en la rotación de los mismos, los resultados entre periodos concuerdan representando: 1) el carácter extensivo de la zona de estudio y 2) el sentido horario de rotación, siendo acordes a los visto en el análisis de deformación infinitesimal y en diversos estudios.

En cuanto a la tasa de deslizamiento de las fallas, en la Tabla 19, se muestra una recopilación de tasas de deslizamiento reportada por diversos autores. Dichas tasas de deslizamiento provienen de trabajos realizados mediante datos geodésicos (Bennett *et al.*, 1996; Dixon *et al.*, 2002; Becker *et al.*, 2005; Meade y Hager, 2005; Wetmore *et al.*, 2019; Velázquez Zaguilan, 2020), métodos geológicos (Ortega-Rivera *et al.*, 2018; Gold *et al.*, 2020) y mediante datos paleomagnéticos (Hirabayashi *et al.*, 1996). Por medio de esta comparación, es posible observar que los valores obtenidos en este trabajo están dentro del rango reportado por otros trabajos. Se observa que para el período 1993-2010, la tasa de deslizamiento de las fallas son más cercanos a los resultados propuestos por otros autores, esto es de tomar en cuenta ya que los datos que representan este periodo no han sido afectados por un evento sísmico, en contraste con el periodo 2013-2019 la cual puede que estos datos aún se encuentren afectados por la etapa posísmica producto del sismo del 2010.

Tabla 19. Comparación de las tasas de deslizamiento de las fallas del norte de Baja California y el sur de California entre los resultados obtenidos en este trabajo de tesis y los reportado por diversos autores.

Falla	Tasa de deslizamiento (mm/a)					
	1993-2010		2013-2019			
Imperial	34.2 - 34.5*	33.1- 33.4**	35 ± 2 ⁽¹⁾	39.5 ± 7 ⁽²⁾	32.7 ± 0.9 ⁽³⁾	36 ± 0.7 ⁽⁵⁾
Cerro prieto	34 -35 y 42*	32.9 - 33.1 y 40**	42 ± 1 ⁽¹⁾	28.2 ± 1.2 ⁽³⁾	40.0 ± 1.5 ⁽⁵⁾	
San Jacinto	33.1 - 34.2*	33.2 - 33.4**	9 ± 2 ⁽¹⁾	15.3 ± 11 ⁽²⁾	11.9 ± 1.2 ⁽⁵⁾	4 ± 2 - 12 ± 6 ⁽¹⁰⁾
Elsinore	6.8 - 8.9*	7.3 - 8.5**	6 ± 2 ⁽¹⁾	3.7 ± 7 ⁽²⁾	2.7 ± 0.6 ⁽⁵⁾	2.5 ± 1 - 5 ± 5 ⁽¹⁰⁾
Laguna sal	4.1 - 4.9*	8.6 - 9**	6 ± 2 ⁽¹⁾			
Agua blanca	2.1 - 4.2*	5.9 - 12.1**	4 ± 3 ⁽¹⁾	6.13 - 9.0 ⁽⁴⁾	9.1 ± 2.7 ⁽⁵⁾	4 ⁽⁶⁾ 6 -8 ⁽⁷⁾
San Pedro	7.6 - 9*	3.2 - 5.3**	5 ± 3 ⁽¹⁾	5.3 ± 1.2 ⁽⁸⁾		
San Miguel	2.3 - 3*	0.8 - 6.4**	3 ± 3 ⁽¹⁾	3.7 ± 1.6 ⁽⁸⁾	0.2 ⁽⁹⁾	
Sierra juarez	4 - 7.7*	3.1 - 7.2**				
Vallecitos	1.8 - 2.5*	1.2 - 6.2**				
3 Hermanos	2.4 - 2.8*	1.0 - 4.6**				
Newport	1-4 - 1.5*	10.0 - 17.3**	0.8 ± 1.6 ⁽⁵⁾	1-5 ± 0.5 ⁽¹⁰⁾		

* y **: resultados para el periodo 1993-2010 y 2013-2019, respectivamente; ¹ Bennett *et al.* (1996); ² Becker *et al.* (2005);

³ Velázquez Zaguilan (2020); ⁴ Ortega-Rivera *et al.* (2018); ⁵ Meade y Hager (2005); ⁶ Gold *et al.* (2020);

⁷ Wetmore *et al.* (2019); ⁸ Dixon *et al.* (2002); ⁹ Hirabayashi *et al.* (1996); ¹⁰ Petersen *et al.* (1996)

Con respecto al déficit en la tasa de deslizamiento y el grado de acoplamiento o bloqueo se pudo observar que la falla Imperial, antes y después del sismo, conserva su grado de acoplamiento ($\phi = 1$), por su parte la falla Cerro Prieto paso de $\phi = 0.805$ a $\phi = 1$. Lo que podría indicar que Imperial no sufrió una alteración en su ciclo sísmico, mientras que para la falla Cerro Prieto podría indicar que el sismo alteró su ciclo y ahora pasa a estar completamente acoplada, lo que podría significar que esta más cerca de producir un sismo.

La falla Laguna Salada, en el período antes del sismo, se muestra una falla completamente acoplada, y para el periodo posterior, observamos un grado de acoplamiento igual a cero. De acuerdo con Li *et al.* (2018), este comportamiento se observa al producirse un sismo, ya que la falla interrumpe su ciclo sísmico al haber liberado esfuerzos. Otra falla que pudo haber interrumpido su ciclo sísmico, es la falla Sierra Juárez, ya que de igual manera en el periodo anterior al sismo la falla se muestra totalmente acoplada, mientras que para el periodo posterior tiene un valor de ϕ igual a 0.094.

De este análisis resalta la falla Vallecitos, que en ambos periodos obtuvimos un valor de $\phi = 0$, esto indicaría que en la falla se produce movimiento asísmico o de *creep*, sin embargo, no se tiene información de que esto ocurra en la falla. De acuerdo con Li *et al.* (2016), esto podría deberse a que el valor de buzamiento, o bien, la profundidad de bloqueo que indicamos como información de entrada no es la apropiada, lo que llevaría al programa TDEFNODE a realizar cálculos incorrectos para la falla.

En la falla Agua blanca, se observa que en el periodo anterior al sismo, la falla se encuentra con un valor de $\phi = 0.596$, mientras que posterior al sismo, obtuvimos un valor de $\phi = 1$. Este resultado puede llevar

a considerar que la falla Agua blanca absorbió deformación con el evento sísmico de El Mayor-Cucapah, sin embargo con el análisis realizado en este trabajo de tesis es difícil asegurar lo anterior. De acuerdo con Yang *et al.* (2019), el valor de ϕ nos muestra una distribución general de la acumulación de deformación de una falla, la cual puede producir una potencial ruptura. No obstante, los detalles de este futuro proceso no pueden inferirse mediante este valor, para ello, Yang *et al.* (2019) propone que estos detalles pueden analizarse por medio de un estudio conocido como simulación dinámica, el cual toma parámetros como la geometría de la falla, propiedades del material, así como una estimación inicial de la deformación.

Con respecto a la estimación del momento sísmico, la cual se llevo a cabo en las fallas Cerro prieto, Imperial y San Miguel. En la Tabla 20, se muestra la comparación entre los resultados obtenidos en este trabajo de tesis, con el trabajo realizado por Velázquez Zaguilan (2020), que estimó el momento sísmico y la magnitud de momento para las fallas Cerro prieto e Imperial. Como puede observarse en la Tabla 20, ambos resultados son similares, en ambos se consideró un periodo de 40 años y una profundidad de 6 km, mientras que la longitud considerada en Velázquez Zaguilan (2020) para la falla Cerro prieto es de 64.5 km y para la falla Imperial de 43.5 km. Sin embargo se observa que la magnitud momento calculada para ambas fallas son similares entre ambos trabajos.

Tabla 20. Comparación de momento sísmico acumulado y magnitud momento en las fallas Cerro prieto, Imperial y San Miguel.

Falla	M_0 acumulado*	Mw*	M_0 acumulado ¹	Mw ¹
Cerro prieto	2.79×10^{19}	6.9	1.88×10^{19}	6.8
Imperial	1.7×10^{19}	6.8	1.47×10^{19}	6.7
San Miguel	5.18×10^{18}	6.4		

*: resultados obtenidos en este trabajo de tesis.

¹: resultados obtenidos en Velázquez Zaguilan (2020)

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

A partir de la metodología de modelo de bloques empleando velocidades geodésicas, se estudiaron las fallas del norte de Baja California y el sur de California, con la finalidad de observar cambios en las tasas y acumulación de deformación producto del sismo El Mayor-Cucapah Mw 7.2 ocurrido en el 2010. Para esto se analizaron las velocidades geodésicas de los períodos intersísmicos 1993-2010 y 2013-2019.

Además del modelo de bloques, realizado con el programa TDEFNODE, se llevó a cabo un análisis de deformación infinitesimal donde se caracterizó el norte de Baja California mediante los parámetros de traslación, rotación y tensores de deformación.

Para el estudio se usaron mayormente datos de la red REGNOM, la cual cubre ambos periodos estudiados, además de redes geodésicas que cubren el sur de California (catálogo SCEC y la red NOTA). Estos datos en conjunto con la localización e información de las fallas, además del análisis de deformación infinitesimal, se utilizaron como datos de entrada para producir el modelo de bloques analizado mediante el programa TDEFNODE.

A partir de los modelos realizados podemos concluir que:

- Los vectores de traslación del norte de Baja California siguen la tendencia del campo de velocidades geodésicas para las placas Pacífico y Norteamérica.
- Se observó que los valores de rotación no se vieron afectados en los periodos antes y después al sismo.
- La deformación interna por medio de tensores indica que hay cierta variación entre el periodo anterior y posterior al sismo con ligeros cambios en la orientación de los tensores, e incluso en algunos patrones extensivos y compresivos.
- Las tasas de deslizamiento concuerdan a lo obtenido por otros autores que realizaron trabajos con datos geodésicos y geológicos.
- Por medio del valor de bloqueo, se puede tener un indicativo general de la interrupción del ciclo sísmico o de acumulación de deformación intersísmica. A partir de la variación de este parámetro entre periodos, se puede inferir que las fallas Laguna Salada y Sierra Juarez al presentar un bajo valor de bloqueo en el periodo 2013-2019 (después del sismo), pudieron ver interrumpido su ciclo sísmico. Por el contrario la falla Imperial mantuvo el valor de bloqueo para ambos periodos ($\phi = 1$), lo cual podría indicar que pudo no haberse visto afectada por el sismo. Además la falla Cerro Prieto, presenta

variaciones en el valor de bloqueo en los periodos antes y despues del sismo, el cual es un posible indicativo de la influencia del evento sobre las fallas vecinas.

- De acuerdo con la estimación del momento sísmico acumulado, la falla Cerro prieto podría producir un sismo de Mw 6.8, la falla Imperial de Mw 6.7 y la falla San Miguel de Mw 6.4.

Con base en lo anterior, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- Realizar periodicamente estudios de déficit en la tasa de deslizamiento y de valor ϕ , para observar cambios en las fallas.
- Incorporar series de tiempo en el modelo de bloques y su análisis en detalle.
- Incorporar datos de nuevas estaciones geodésicas.

Literatura citada

- Alfaro, P., Alonso-Chaves, F. M., Fernández, C., y Gutiérrez-Alonso, G. (2013). La tectónica de placas, teoría integradora sobre el funcionamiento del planeta. *Enseñanza las ciencias la Tierra*, **21**(2): 168–180.
- Allen, C. R., Silver, L. T., y Stehli, F. G. (1960). Agua Blanca fault: a major transverse structure of northern Baja California, Mexico. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **71**: 467–482.
- Axen, G. J. y Fletcher, J. M. (1998). Late miocene-pleistocene extensional faulting, northern gulf of California, Mexico and Salton Trough, California. *Int. Geol. Rev.*, **40**(3): 217–244.
- Becker, T. W., Hardebeck, J. L., y Anderson, G. (2005). Constraints on fault slip rates of the southern California plate boundary from GPS velocity and stress inversions. *Geophys. J. Int.*, **160**(2): 634–650.
- Bennett, R., Davis, J., y Wernicke, B. (1999). The present-day pattern of western US cordillera deformation. *Geology*, **27**: 371–374.
- Bennett, R. A., Rodi, W., y Reilinger, R. E. (1996). Global positioning system constraints on fault slip rates in southern California and northern Baja, Mexico. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **101**(B10): 21943–21960.
- Bennett, S. E. y Oskin, M. E. (2014). Oblique rifting ruptures continents: Example from the gulf of California shear zone. *Geology*, **42**(3): 215–218.
- Bürgmann, R. y Thatcher, W. (2013). Space geodesy: A revolution in crustal deformation measurements of tectonic processes. *Geol. Soc. Am.*, **2500**(12): 1–34.
- Cambrón Rosas, J. F. (2017). *Historial de acumulación de cizalla cosísmica en el segmento norte de la falla Cañada David durante los últimos 20 000 años*. Tesis de maestría, CICESE.
- Chang, W., Ching, K., Lee, C., Lee, Y., y Lee, C. (2016). Earthquake potential of active faults in Taiwan from GPS observations and block modeling. *Seismol. Res. Lett.*, **87**(6): 1274–1286.
- Cronin, V. S., Resor, P., y Pratt-Sitaula, B. (2017). GETSI module on GPS, strain, and earthquake. En: *Assoc. Environ. Stud. Sci. Annu. Conf.*
- Cruz-Castillo, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. *Geos*, pp. 37–42.
- Devore, J. L. (2008). Intervalos estadísticos basados en una sola muestra. En: *Probab. y estadística para Ing. y ciencias*. capítulo 7, pp. 255–257.
- Díaz-Torres, J. J., Fletcher, J. M., Spelz-Madero, R. M., Martín-Barajas, A., y Suárez-Vidal, F. (2012). Geomorfometría del escarpe principal del golfo de California. Análisis comparativo entre dos segmentos del rift: sierra San Pedro Mártir y sierra Juárez, Baja California, México. *Rev. Mex. Ciencias Geol.*, **29**(3): 590–610.
- Dixon, T., Decaix, J., Farina, F., Furlong, K., Malservisi, R., Bennett, R., Suárez-Vidal, F., Fletcher, J., y Lee, J. (2002). Seismic cycle and rheological effects on estimation of present-day slip rates for the Agua Blanca and San Miguel-Vallecitos faults, northern Baja California, Mexico. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **107**(B10): ETG 5–1–ETG 5–23.
- Ekström, G., Nettles, M., y Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **200-201**: 1–9.
- Ellis, A., DeMets, C., McCaffrey, R., Briole, P., Cosenza Muralles, B., Flores, O., Guzmán-Speziale, M., Hernández, D., Kostoglodov, V., LaFemina, P., Lord, N., Lasserre, C., Lyon-Caen, H., Rodríguez Maradiaga, M., Molina, E., Rivera, J., Rogers, R., Staller, A., y Tikoff, B. (2019). GPS constraints on deformation in northern Central America from 1999 to 2017, part 2: Block rotations and fault slip rates, fault locking and distributed deformation. *Geophys. J. Int.*, **218**(2): 729–754.

- Felzer, K. R. y Cao, T. (2008). Wgcep historical california earthquake catalog. Reporte técnico, US Geological Survey.
- Fletcher, J. M. y Spelz, R. M. (2009). Patterns of quaternary deformation and rupture propagation associated with an active low-angle normal fault, Laguna Salada, Mexico: Evidence of a rolling hinge? *Geosphere*, **5**(4): 385–407.
- Fletcher, J. M., Terán, O. J., Rockwell, T. K., Oskin, M. E., Hudnut, K. W., Mueller, K. J., Spelz, R. M., Akciz, S. O., Masana, E., Faneros, G., Fielding, E. J., Leprince, S., Morelan, A. E., Stock, J., Lynch, D. K., Elliott, A. J., Gold, P., Liu-Zeng, J., González-Ortega, A., Hinojosa-Corona, A., y González-García, J. (2014). Assembly of a large earthquake from a complex fault system: Surface rupture kinematics of the 4 april 2010 El Mayor-Cucapah (Mexico) M w 7.2 earthquake. *Geosphere*, **10**(4): 797–827.
- Freymueller, J. T. (2017). Earthquake cycle deformation. En: P. J. Teunissen y O. Montenbruck (eds.), *Springer Handb. Glob. Navig. Satell. Syst.*. capítulo 37, p. 1076.
- Frez, J. y González, J. J. (1991). Crustal structure and seismotectonics of northern Baja California. *Gulf Penins. Prov. Californias*, pp. 261–283.
- Frez, J., González, J. J., Acosta, J. G., Nava, F. A., Méndez, I., Carlos, J., García-Arthur, R. E., y Álvarez, M. (2000). A detailed microseismicity study and current stress regime in the peninsular ranges of northern Baja California, Mexico: The Ojos Negros region. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **90**(5): 1133–1142.
- Gold, P. O., Behr, W. M., Fletcher, J. M., Rockwell, T. K., y Figueiredo, P. M. (2020). Time-invariant late quaternary slip rates along the Agua Blanca fault, northern Baja California, Mexico. *Tectonics*, **39**(9): 1–26.
- González-Ortega, J. A., González-García, J. J., y Sandwell, D. T. (2018). Interseismic velocity field and seismic moment release in northern Baja California, Mexico. *Seismological Research Letters*, **89**(2A): 526–533.
- González-Huizar, H. y Fletcher, J. M. (2020). Baja quakes highlight seismic risk in northern Mexico. Recuperado el: 16/10/2020 de <https://temblor.net/earthquake-insights/baja-quakes-highlight-seismic-risk-in-northern-mexico-11715/>.
- González-Ortega, A., Fialko, Y., Sandwell, D., Nava-Pichardo, A., Fletcher, J., González-García, J., Lipovsky, B., Floyd, M., y Funning, G. (2014). El Mayor-Cucapah (Mw 7.2) earthquake: Early near-field postseismic deformation from InSAR and GPS observations. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **119**(2): 1482–1497.
- Hagstrum, J. y Filmer, P. (1990). Paleomagnetic and tectonic constraints on the late cretaceous to early tertiary northward translation of the Baja California peninsula. *Geofísica Int.*, **29**(4): 175–184.
- Hanks, T. C. y Kanamori, H. (1979). A moment magnitud scale. *J. Geophys. Res.*, **84**(9): 2348–2350.
- Hauksson, E., Stock, J., Hutton, K., Yang, W., Vidal-Villegas, J. A., y Kanamori, H. (2011). The 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake sequence, Baja California, Mexico and southernmost California, USA: Active seismotectonics along the mexican pacific margin. *Pure Appl. Geophys.*, **168**(8-9): 1255–1277.
- Hernández Flores, A. P. (2015). *Paleosismología del sistema de fallas imbricado en la sierra Cucapah, Baja California, México*. Tesis de maestría, CICESE.
- Hirabayashi, C. K., Rockwell, T. K., Wesnousky, S. G., Stirling, M. W., y Suárez-Vidal, F. (1996). A neotectonic study of the San Miguel-Vallecitos fault, Baja California, Mexico. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **86**(6): 1770–1783.
- Hutton, K., Woessner, J., y Hauksson, E. (2010). Earthquake monitoring in southern california for seventy-seven years (1932–2008). *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(2): 423–446.

- Jaeger, J. C. (1987). Strain. En: *Structural geology and tectonics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 738–743.
- Klein, E., Métois, M., Meneses, G., Vigny, C., y Delorme, A. (2018). Bridging the gap between north and central Chile: Insight from new GPS data on coupling complexities and the Andean sliver motion. *Geophys. J. Int.*, **213**(3): 1924–1933.
- Li, Y., Song, X., Shan, X., Qu, C., y Wang, Z. (2016). Locking degree and slip rate deficit distribution on MHT fault before 2015 Nepal Mw 7.9 earthquake. *J. Asian Earth Sci.*, **119**: 78–86.
- Li, Y., Zhang, G., Shan, X., Liu, Y., Wu, Y., Liang, H., Qu, C., y Song, X. (2018). GPS-derived fault coupling of the Longmenshan Fault associated with the 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake and its tectonic implications. *Remote Sens.*, **10**(5): 1–15.
- Manaker, D. M., Calais, E., Freed, A. M., Ali, S. T., Przybylski, P., Mattioli, G., Jansma, P., Prépetit, C., y De Chabaliér, J. B. (2008). Interseismic plate coupling and strain partitioning in the northeastern Caribbean. *Geophys. J. Int.*, **174**(3): 889–903.
- Marco Sanjuán, F. J. (2020). Intervalo de confianza. Recuperado el: 25/07/2020 de <https://economipedia.com/definiciones/intervalo-de-confianza.html>.
- McCaffrey, R. (2002). Crustal block rotations and plate coupling. *Am. Geophys. Union*.
- McCaffrey, R. (2005). Block kinematics of the Pacific-North America plate boundary in the southwestern United States from inversion of GPS, seismological, and geologic data. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **110**(7): 1–27.
- McCaffrey, R. (2009). Time-dependent inversion of three-component continuous GPS for steady and transient sources in northern Cascadia. *Geophys. Res. Lett.*, **36**(7).
- McCaffrey, R. (2013). Crustal block rotations and plate coupling. (March 2013): 101–122.
- McCaffrey, R., Qamar, A. I., King, R. W., Wells, R., Khazaradze, G., Williams, C. A., Stevens, C. W., Vollick, J. J., y Zwick, P. C. (2007). Fault locking, block rotation and crustal deformation in the Pacific northwest. *Geophys. J. Int.*, **169**(3): 1315–1340.
- McQuarrie, N. (2005). An animated tectonic reconstruction of southwestern North-America since 36 Ma. *Geosphere*, **1**(3): 147.
- Meade, B. J. y Hager, B. H. (2005). Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **110**(3): 1–19.
- Meade, B. J. y Loveless, J. P. (2009). Block modeling with connected fault-network geometries and a linear elastic coupling estimator in spherical coordinates. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **99**(6): 3124–3139.
- Mueller, K. J. y Rockwell, T. K. (1995). Late quaternary activity of the Laguna Salada fault in northern Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **107**(1): 8–18.
- Murray-Moraleda, J. (2009). GPS: Applications in crustal deformation monitoring. *Encyclopedia of Complexity and Systems Science*, pp. 4249–4283.
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **75**(4).
- Ortega-Rivera, A., Suárez-Vidal, F., Mendoza-Borunda, R., y de la O, M. (2018). A multidisciplinary approach to estimate slip rate-magnitude and recurrence time for a segment of a major active fault. Case study: The Agua Blanca fault, Valle de Agua Blanca, B.C., Mexico. *J. South Am. Earth Sci.*, **88**(May): 1–15.

- Petersen, M. D. y Wesnousky, S. G. (1994). Fault slip rates and earthquake histories for active faults in southern California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **84**(5): 1608–1649.
- Petersen, M. D., Bryant, W. A., Cramer, C. H., Cao, T., Reichle, M. S., Frankel, A. D., Lienkaemper, J. J., McCrory, P. A., y Schwartz, D. P. (1996). Probabilistic seismic hazard assessment for the state of California. Reporte técnico.
- Pratt-Sitaula, B., Resor, P., Douglas, B., y Charlevoix, D. (2019). *Using Global Positioning System (GPS) data in structural geology to better understand tectonic motions and earthquake hazards*, Vol. 5. Elsevier Inc., primera edición. pp. 43–55. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-814048-2.00003-X>.
- Prawirodirdjo, L., Bock, Y., McCaffrey, R., Genrich, J., Calais, E., Stevens, C., Puntodewo, S. S. O., Subarya, C., Rais, J., Zwick, P., y Fauzi, R. M. (1997). Geodetic observations of interseismic strain segmentation at the Sumatra subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, **24**(21): 2601–2604.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., y Flannery, B. P. (2007). *Numerical recipes: The art of scientific computing*. Cambridge University Press, tercera edición.
- REGNOM (2017). Red Géodesica del Noroeste de México, Departamento de Sismología del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada. Baja California, México. Recuperado el: 20/05/2020 de <http://regnom.cicese.mx/index.html>.
- RESNOM (2019). Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada Baja California, México. Recuperado el: 15/09/2019 de <http://resnom.cicese.mx/sitio/>.
- Savage, J. C. (1983). A dislocation model of strain accumulation and release at a subduction zone. *J. Geophys. Res.*, **88**(3): 4984–4996.
- Segall, P. (2010). Elastic block models. En: *Earthq. volcano Deform.*. capítulo 12, pp. 378–379.
- Shen, Z. K., King, R. W., Agnew, D. C., Wang, M., Herring, T. A., Dong, D., y Fang, P. (2011). A unified analysis of crustal motion in southern California, 1970–2004: The SCEC crustal motion map. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **116**(11): 1–19.
- Spinler, J. C., Bennett, R. A., Anderson, M. L., McGill, S. F., Hreinsdóttir, S., y McCallister, A. (2010). Present-day strain accumulation and slip rates associated with southern San Andreas and eastern California shear zone faults. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **115**(11): 1–29.
- Stein, S. y Gordon, R. G. (1984). Statistical tests of additional plate boundaries from plate motion inversions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **69**(2): 401–412.
- Suárez-Vidal, F., Mendoza-Borunda, R., Nafarrete-Zamarripa, L. M., Ramírez, J., y Glowacka, E. (2008). Shape and dimensions of the Cerro Prieto pull-apart basin, Mexicali, Baja California, Mexico, based on the regional seismic record and surface structures. *Int. Geol. Rev.*, **50**(7): 636–649.
- Suárez-Vidal, F., Armijo, R., Morgan, G., Bodin, P., y Gastil, R. G. (1991). Framework of recent and active faulting in northern Baja California. *Gulf Penins. Prov. Californias*, pp. 285–300.
- Tracy, B. Y., Madrid, J., y Koczyński, T. (1976). A study of microseismicity in northern Baja California, Mexico. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **66**(6): 1921–1929.
- UNAVCO (2019). Network Of The Americas. Recuperado el: 28/09/2020 de <https://www.unavco.org/projects/past-projects/pbo/pbo.html>.

- U.S. Geological Survey y California Geological Survey (2015). Interactive Fault map. Recuperado el: 20/03/2020 de https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/faults?qt-science_support_page_related_con=4#qt-science_support_page_related_con.
- USGS (2020). Search earthquake catalog. Recuperado el 10/10/2019 de <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- Velázquez Zaguilan, A. (2020). *Tasas de deslizamiento de las principales fallas del Valle de Mexicali, Baja California, México, utilizando datos de GPS*. Tesis de doctorado, CICESE.
- Vidal-Villegas, J. A., Munguía, L., González-Ortega, J. A., Nuñez-Leal, M. A., Ramírez, E., Mendoza, L., Castro, R. R., y Wong, V. (2018). The northwest Mexico seismic network: Real-time seismic monitoring in northern Baja California and northwestern Sonora, Mexico. *Seismological Research Letters*, **89**(2A): 324–337.
- Wallace, L. M., Beavan, J., McCaffrey, R., y Darby, D. (2004). Subduction zone coupling and tectonic block rotations in the North Island, New Zealand. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **109**(12): 1–21.
- Wetmore, P. H., Malservisi, R., Fletcher, J. M., Alsleben, H., Wilson, J., Callihan, S., Springer, A., González-Yajimovich, O., y Gold, P. O. (2019). Slip history and the role of the Agua Blanca fault in the tectonics of the North American-Pacific plate boundary of southern California, USA and Baja California, Mexico. *Geosphere*, **15**(1): 119–145.
- Yang, H., Yao, S., He, B., Newman, A. V., y Weng, H. (2019). Deriving rupture scenarios from interseismic locking distributions along the subduction megathrust. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **124**(10): 10376–10392.
- Zeng, Y. y Shen, Z.-K. (2014). Fault network modeling of crustal deformation in California constrained using GPS and geologic observations. *Tectonophysics*, **612**: 1–17.