

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



---

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

---

Tasas de deslizamiento de las principales fallas del Valle de Mexicali, Baja California, México, utilizando datos de GPS.

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

Presenta:

**Arisai Velazquez Zaguilan**

Ensenada, Baja California, México  
2020

Tesis defendida por  
**Arisai Velazquez Zaguilan**

y aprobada por el siguiente Comité

---

**Dr. Javier Alejandro González Ortega**  
Director de tesis

Miembros del comité asesor:

**Dr. John Mackrain Fletcher**

**Dr. Carlos Eduardo Reinoza Gómez**

**Dr. Jaime Sánchez García**



---

**Dr. Efraín Gómez Arias**  
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

---

**Dra. Rufina Hernández Martínez**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Arisai Velazquez Zaguilan** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con Orientación en Sismología.

**Tasas deslizamiento de las principales fallas del Valle de Mexicali, Baja California, México, utilizando datos de GPS.**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Javier Alejandro González Ortega  
**Director de tesis**

El Valle de Mexicali, Baja California, México es una zona sísmicamente activa que presenta sismos de magnitud considerable como el evento El Mayor-Cucapah  $M_w 7.2$  ocurrido en el 2010. Utilizando datos de estaciones de Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) temporales y permanentes durante el 2011 hasta 2019, se estimaron las tasas de deslizamiento para las principales fallas de la región: Cerro Prieto, Imperial, Indiviso, así como de la zona de deformación Sierra Cucapah-Laguna Salada. Las series de tiempo GPS se calculan con el programa GAMIT/GLOBK en el marco de referencia ITRF2008-Norteamérica. Posteriormente, las velocidades de cada uno de los sitios geodésicos se calculan por medio del ajuste lineal de mínimos cuadrados con errores y se proyectan al rumbo de las fallas. Los gradientes de velocidad transversales a las fallas se modelan como una dislocación en un semiespacio elástico y homogéneo que describe la acumulación de deformación elástica para obtener las tasas de deslizamiento. La tasa de deslizamiento para la falla Imperial es  $32.7 \pm 0.9$  mm/año, para la Cerro Prieto  $28.2 \pm 1.2$  mm/año y  $10.7 \pm 0.9$  mm/año para la Indiviso; todas con profundidad de bloqueo entre 5-6 km, encontrándose que la relajación posísmica de El Mayor-Cucapah no afecta significativamente en la estimación de las tasas de deslizamiento. Con dichos valores, parámetros geométricos de las fallas y sismicidad reciente, la acumulación de momento sísmico en la falla Imperial es  $3.67 \times 10^{24} \pm 5.97 \times 10^{23}$  dinas·cm/año y en la falla Cerro Prieto  $4.69 \times 10^{24} \pm 7.64 \times 10^{23}$  dinas·cm/año, lo suficiente como para producir sismicidad con magnitud 6.7. Dichos valores pueden coadyuvar a la estimación del peligro sísmico en la región del Valle de Mexicali.

**Palabras clave:** Tasa de deslizamiento, Valle de Mexicali, GPS, Profundidad de bloqueo, Momento sísmico.

Abstract of the thesis presented by **Arisai Velazquez Zaguilan** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth's Sciences with orientation in Seismology.

**Slip rates of the main faults of the Mexicali Valley, Baja California, Mexico, using GPS data.**

Abstract approved by:

---

Dr. Javier Alejandro González Ortega  
**Thesis Director**

Mexicali Valley, Baja California, Mexico is a seismically active zone with recent considerable earthquakes magnitude such as the El Mayor-Cucapah  $M_w 7.2$  occurred in 2010. Using temporary and permanent data from Global Positioning System (GPS) during 2011 to 2019, the slip rates were estimated for the main faults in the region: Cerro Prieto, Imperial, Indiviso, as well as the Sierra Cucapah-Laguna Salada deformation zone. The GPS time series are calculated with the GAMIT/GLOBK program in the ITRF2008-North America reference frame. Subsequently, the velocities of each of the geodesic sites by means of the linear adjustment of least squares with errors and are projected to the direction of the faults. Velocity gradients across fault are modeled as a dislocation in an elastic and homogeneous half-space that describes the accumulation of elastic deformation in order to obtain slip rates. The slip rate for the Imperial fault is  $32.7 \pm 0.9$  mm/year, for Cerro Prieto fault  $28.2 \pm 1.2$  mm/year and  $10.7 \pm 0.9$  mm/year for the Indiviso fault; all with locking depth between 5-6 kilometers, finding that the postseismic relaxation of El Mayor-Cucapah does not significantly affect the estimation of slip rates. With these values, geometric parameters of the faults and recent seismicity, the accumulation of seismic moment in the Imperial fault is  $3.67 \times 10^{24} \pm 5.97 \times 10^{23}$  dynes-cm/year and in the Cerro Prieto fault  $4.69 \times 10^{24} \pm 7.64 \times 10^{23}$  dynes-cm/year, enough to produce a magnitude 6.7 earthquake. These values can be used in the estimation of seismic hazard assessment in Mexicali Valley.

**Keywords: Slip rate, Mexicali Valley, GPS, Locking deep, Seismic moment.**

## Dedicatoria

*A mis padres Ana María y Saidiel.*

*A mis hermanos Francisco, Saidiel y Everardo.*

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios y crecer académicamente.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado para solventar los gastos de mi estancia en la maestría.

Al proyecto interno Estudios de geodesia espacial (GNSS e InSAR) en el norte de Baja California, COF 166, y al proyecto externo Ensamble del modelo geodésico comunitario y estudios de GPS en las fallas Imperial y Cerro Prieto, COE1000.

A mi director de tesis Dr. J. Alejandro González Ortega por su tiempo y dedicación para inducirme en el mundo de la geodesia.

A los miembros del comité asesor, Dr. John Fletcher, Dr. Carlos Reinoza y al Dr. Jaime Sánchez por su sabia orientación y el tiempo brindado para la revisión de este trabajo.

A mis profesores que, en cada una de sus clases compartieron parte de su gran conocimiento y con ello elevar mi conocimiento en el área de la sismología.

A todos los investigadores, técnicos y compañeros estudiantes por hacer posible la recolección de datos GPS temporales.

A mis padres y hermanos por siempre animarme a seguir superándome como ser humano y profesionista.

A mi tío Antonio por brindarme su apoyo y hacer más llevadera mi estancia en Ensenada.

A mis amigos en Chiapas, Vivi, Dorian, Itzetzl y Jon que a pesar de la distancia siempre he contado con su apoyo incondicional.

A mis compañeros de clase y amigos en esta aventura, especialmente a Rosa, Halia, Liza y Fabián.

## Tabla de contenido

Resumen en español .....	i
Resumen en inglés .....	ii
Dedicatoria .....	iii
Agradecimientos .....	iv
Lista de figuras .....	vii
Lista de tablas.....	x
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes. ....	1
1.2. Justificación. ....	4
1.3. Hipótesis.....	4
1.4. Objetivos. ....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
Capítulo 2. Marco Teórico.....	6
2.1. Área de estudio. ....	6
2.2. El ciclo sísmico.....	8
2.2.1. Tasas de deslizamiento. ....	10
2.2.2. Acumulación del momento sísmico. ....	10
2.3. Modelo de dislocación. ....	12
2.4. Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS). ....	15
2.4.1. Segmentos GNSS .....	16
Capítulo 3. Metodología.....	17
3.1. Adquisición de datos. ....	17
3.1.1. Continuos. ....	17

3.1.2. Temporales.....	18
3.2. Señales GPS y cálculo de posición.....	22
3.3. Estimación de posición por dobles diferencias.....	25
3.3.1. Estabilización de la red GPS.....	29
3.4. Estimación de las velocidades.....	32
3.4.1. Proyección de las velocidades al rumbo de la falla y cálculo de incertidumbre.....	34
4.5. Modelado directo del modelo de dislocación en un semiespacio homogéneo. ....	36
Capítulo 4. Resultados.....	38
4.1. Campo de velocidades y relajación posísmica.....	38
4.2. Gradientes de velocidad a través de las fallas.....	44
4.3. Inversión del modelo de dislocación en un semiespacio homogéneo. ....	47
4.3.1. Tasa de deslizamiento y profundidad de bloqueo en Cerro Prieto – Indiviso.....	48
4.3.2. Tasas de deslizamiento y profundidad de bloqueo en Imperial-Sierra Cucapah-Laguna Salada. 50	
4.4. Tasa de momento sísmico.....	54
Capítulo 5. Discusiones.....	58
Capítulo 6. Conclusiones y trabajo a futuro.....	64
Literatura citada.....	66



## Lista de figuras

- Figura 1.** Campo de velocidades para el sur de California y norte de Baja California. Figura tomada de Bennett et al., (1996). ..... 2
- Figura 2.** Deslizamiento asísmico de la falla Imperial en el Valle Imperial. a). Muestra la ubicación del tramo de la falla Imperial analizada. b). Distribución de los puntos de medición GPS utilizados para determinar el deslizamiento asísmico de la zona. Figura tomada de Lyons, (2002). ..... 3
- Figura 3.** Marco tectónico del norte de Baja California. Se muestra la distribución de las principales fallas y la sismicidad histórica e instrumental para sismos  $M_w > 5.0$  (círculos en color negro). La localización de estaciones GPS continuas están indicadas en cuadros en color naranja, amarillo y azul. Las estaciones GPS temporales se muestran en círculos color azul. La figura insertada en el mapa muestra la macro localización de la región de estudio. .... 7
- Figura 4.** Esquema de la teoría de rebote elástico. a) Línea de carretera atravesada perpendicularmente por una falla, la cual se encuentra a inicio del ciclo sísmico por lo que la carretera no presenta deformación alguna. b) Línea de carretera atravesada perpendicularmente por una falla, en esta parte el ciclo sísmico se encuentra en la parte intersísmica (acumulando energía) por lo que la carretera se está deformando paulatinamente conforme la falla acumula energía. c) Línea de carretera atravesada perpendicularmente por una falla justo después de un evento sísmico, se puede apreciar que la línea de carretera se desplazó debido a la ruptura del terreno por la liberación de energía en la falla. Figura modificada de Hough, (2010). d) Evolución del desplazamiento durante el ciclo sísmico. El ciclo sísmico está compuesto de 3 etapas: intersísmica, cosísmica y posísmica. .... 8
- Figura 5.** a) Secuencia regular del ciclo sísmico. b) Secuencia irregular del ciclo sísmico. Figura modificada de Kanamory y Brodsky (2004). ..... 9
- Figura 6.** Modelo de dislocación. V se refiere a la tasa de deslizamiento de las fallas y D la profundidad de bloqueo. Modificada de Smith-Konter et al., (2011). ..... 13
- Figura 7.** Efecto del ángulo de echado en una falla hipotética. Se utiliza la ecuación 4, considerando profundidad de bloqueo de 12 km, tasa de deslizamiento 10 mm/año, un ángulo de echado de  $60^\circ$  en dirección este (línea azul) y oeste (línea roja), además de la falla vertical (línea negra), la línea verde punteada representa la ubicación de la falla. .... 14
- Figura 8.** Estación GPS de monitoreo continuo en Cañada David Este (DAEX). Vista hacia el Valle de Mexicali. .... 17
- Figura 9.** Mapa de ubicación de la zona de estudio. En el recuadro de la izquierda muestra la ubicación de todas las estaciones GPS/GNSS permanentes localizadas en Baja California y el sur de California, los recuadros pequeños a la derecha muestran los perfiles de medición GPS temporales y su distribución por campaña anual. .... 19

- Figura 10.** Estación de adquisición de datos GPS temporal. Se muestra la instalación típica de una estación GPS sobre la losa de concreto de un canal de riego agrícola en el Valle de Mexicali. La estación consiste en un equipo receptor para almacenar los datos de las señales recibidas de los satélites, una antena anillada y una batería de 12 V..... 18
- Figura 11.** Efecto de trayectoria múltiple. Para una buena precisión en las mediciones GNSS, la señal emitida de los satélites debe viajar directamente al receptor, pero en muchas ocasiones la señal es reflejada por superficies reflectantes o refractantes; en las situaciones donde la señal presenta reflexiones o refracciones, la pseudodistancia que llega al receptor es más grande que la pseudodistancia real..... 23
- Figura 12.** a) Esquema de la relación vectorial de los parámetros orbitales ( $s$ ), la diferencia del satélite al receptor ( $r$ ) y la posición del receptor con respecto al centro de la Tierra ( $u$ ). b) Esquema que relaciona los valores del tiempo GNSS involucrados en la estimación de la posición del satélite, receptor y el sistema. .... 24
- Figura 13.** Diagrama de flujo simple en el que se muestra el proceso que se realiza dentro del GAMIT/GLOBK para obtener como resultado final las series de tiempo de cada uno de los sitios de observación GPS. Herring et al., (2015a)..... 26
- Figura 14.** Esquema ilustrativo de dobles diferencias. Para eliminar los errores asociados al desfase de tiempo entre satélite y receptor se calcula la diferencia de fase entre el receptor a y el b que observan al satélite G1 a un determinado tiempo, esto elimina los posibles errores asociados al reloj satelital; si los receptores a y b observan un segundo satélite (G2) al mismo tiempo, se calcula la diferencia de fase para el satélite G2, esto con el objetivo de eliminar los errores asociados al reloj del receptor. .... 28
- Figura 15.** Estabilización de una red de estaciones geodésica. Los recuadros muestran estaciones permanentes utilizadas como estabilizadoras de una red y los círculos denotan estaciones temporales. a) Red de estaciones estabilizadoras con buena distribución, lo que permite una buena solución de la posición. b) red de estaciones estabilizadoras con una mala distribución, lo cual produce un sesgo en la posición de la estación temporal. .... 29
- Figura 16.** Esquemas de estabilización. En el mapa se muestra la ubicación y nombre de las estaciones utilizadas en cada estabilización de la red GPS, Est1: BLYT, MONP y PLTX, Est2: BLYT, MONP, PLTX y P003, Est3: P003, BLYT, IID2, PLPX, P500, PLTX, P496, PJZX, P066 y MONP. También se muestra la ubicación de todas las estaciones continuas ubicadas en el norte de Baja California y sur de California, así como las estaciones de observación temporal utilizadas en este trabajo..... 30
- Figura 17.** Ajuste mediante regresión lineal de la serie de posición en sus tres componentes N, E y H, para la estación QUEX. .... 33
- Figura 18.** Resultados del modelado de datos sintéticos. a) Resultado de la inversión de datos sintéticos con errores de hasta 3 mm; del lado izquierdo de la figura se muestra el ajuste con datos cada 2.5 km y del lado derecho el ajuste con menor número de datos y distribuidos azarosamente. b) Resultado de la inversión de datos sintéticos con errores de hasta 15 mm; del lado izquierdo de la figura se muestra el ajuste con datos cada 2.5 km y del lado derecho el ajuste con menor número de datos y distribuidos al azar. .... 37

- Figura 19.** Mapa de velocidades proyectadas en SNARF. Los vectores en color negro corresponden a las velocidades de estaciones permanentes y los de color azul a las estaciones temporales. .... 38
- Figura 20.** Errores de posición para la componente norte con respecto al tiempo de observación. Los números en color negro muestran el tiempo de medición en horas para diversas estaciones GPS y los números en color azul muestran el error asociado. .... 42
- Figura 21.** a) Serie de tiempo de la componente norte de la estación permanente NAYX. El círculo en color rojo indica la relajación posísmica del sismo El Mayor-Cucapah. b). Ajustes de la serie de tiempo de la componente norte de estación temporal CC08. Se muestran las velocidades considerando la relajación posísmica (línea color verde) y sin considerar la relajación posísmica (línea color rojo) a partir del 2013. .... 43
- Figura 22.** Gradientes de velocidad paralela a las fallas Cerro Prieto-Indiviso (CP-In) e Imperial-Sierra Cucapah-Laguna Salada (Im-SC-LG). a) Gradiente de velocidad para el perfil CP-In. b) Gradiente de velocidad para el perfil Im-SC-LG. Los círculos en color negro indican la velocidad de las estaciones permanentes. Los círculos en rojo indican la velocidad de las estaciones con mediciones de 2013 a 2019 para el perfil CP-In y de 2012 a 2019 para el perfil Im-SC-LG y los círculos en color azul, la velocidad de estaciones con observaciones de 2016 a 2019. .... 47
- Figura 23.** a) Mejor ajuste de tasa de deslizamiento y profundidad de bloqueo resueltos de manera simultánea. b) Sensibilidad de la tasa de deslizamiento con respecto a la profundidad de bloqueo. c) Curvas de nivel de Chi-cuadrado para las variaciones de la tasa de deslizamiento y profundidad de bloqueo. .... 49
- Figura 24.** Curva de deformación en la falla para las fallas Cerro Prieto e Indiviso. .... 50
- Figura 25.** Gradiente de velocidad para el perfil Im-SC-LG. La línea amarilla muestra la ubicación del salto de velocidad y su posible relación al trazo de la Falla Michoacán. .... 51
- Figura 26.** a) Mejor ajuste de tasa de deslizamiento y profundidad de bloqueo resueltos de manera simultánea. b) Sensibilidad de la tasa de deslizamiento con respecto a la profundidad de bloqueo. c) curvas de nivel de Chi-cuadrado para las variaciones de tasa de deslizamiento y profundidad de bloqueo. .... 53
- Figura 27.** Curva de deformación en la falla para las fallas Imperial y para la Zona de Deformación Sierra Cucapah-Laguna Salada. .... 54
- Figura 28.** Mapa de sismicidad en el Valle de Mexicali. Los círculos en color negro muestran la sismicidad tomada de Hauksson et al., (2012),  $M_w > 3.0$ . Los círculos en color rojo representan los sismos de mayor magnitud registrados históricamente en la región, tomados de González-Ortega et al., (2018). Los círculos en color azul muestran la distribución de las estaciones GPS temporales. La línea en color verde representa la longitud y ubicación del perfil sísmico de la Figura 29 vista en planta y las líneas punteadas representan el ancho del perfil. .... 55

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Características orbitales de las principales plataformas satelitales del Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS). Jin et al., (2014). .....	15
<b>Tabla 2.</b> Estaciones GNSS/GPS de registro continuo y temporal utilizadas para obtener el campo de velocidades del Valle de Mexicali. ....	20
<b>Tabla 3.</b> Valores promedio de las diferentes estabilizaciones Est1, Est2 y Est3 para las componentes N, E y H. ....	31
<b>Tabla 4.</b> Velocidades norte y este con sus respectivas incertidumbres utilizadas para construir el campo de velocidades de la región del Valle de Mexicali. Las velocidades se encuentran en ITRF2008. ....	39
<b>Tabla 5.</b> Velocidades estimadas con y sin relajación posísmica para las estaciones del perfil Cerro Prieto-Indiviso. ....	44
<b>Tabla 6.</b> Velocidades paralelas y perpendiculares a las principales fallas del Valle de Mexicali: Imperial y Cerro Prieto. * Distancia de la estación al trazo de la falla. ....	45
<b>Tabla 7.</b> Resultados de la inversión para las tasas de deslizamiento empleado el modelo de dislocación en un semiespacio elástico y homogéneo. *Profundidad de bloqueo y tasa de deslizamiento resuelta de manera simultánea. ....	48
<b>Tabla 8.</b> Resultados de la inversión para las tasas de deslizamiento empleando el modelo de dislocación en un semiespacio elástico y homogéneo. ....	52
<b>Tabla 9.</b> Momento sísmico acumulado y magnitud momento para las fallas Cerro Prieto, Imperial e Indiviso. <b>PB</b> hace referencia a la profundidad de boqueo obtenida por medio de los datos geodésicos, <b>ZS</b> hace referencia a la profundidad de la capa sismogénica de la región determinada a partir de datos de profundidad sísmica. La columna de tiempo se refiere al número de años transcurridos desde el último evento registrado. ....	57

## Capítulo 1. Introducción.

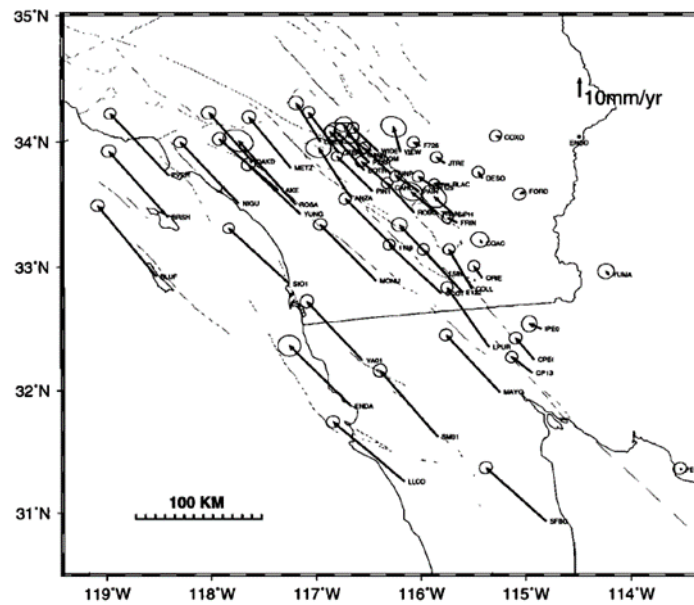
---

### 1.1. Antecedentes.

Por medio de la Geodesia Espacial, en particular con el uso del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés), se puede estimar la deformación que se localiza dentro de un polígono o red de puntos de observación GNSS. Parte de esta deformación elástica acumulada puede liberarse de forma sísmica, más aun, las tasas de deslizamiento en las fallas, profundidad de bloqueo o espesor de capa sismogénica y longitud de falla, pueden ser empleados para estimar el potencial sísmico de una región (Stein, 2008; Smith-Konter et al., 2011; Field et al., 2015; Resor et al., 2018).

El termino tasa de deslizamiento se refiere a la velocidad promedio en el que las fallas se mueven con respecto al campo lejano siguiendo en movimiento tectónico de las placas (Hough, 2010). Por otro lado, el deslizamiento asísmico es un proceso de ruptura sin presencia de eventos sísmicos, debido al comportamiento viscoelástico del material presente en la zona de fallamiento (Steinbrugge y Zacher, 1960), ocurre de manera continua o episódica y puede detectarse por medio de GNSS e Interferometría de Imágenes de Radar de Apertura Sintética (InSAR, por sus siglas en inglés) (Lyons, 2002; Galehouse y Lienkaemper, 2003).

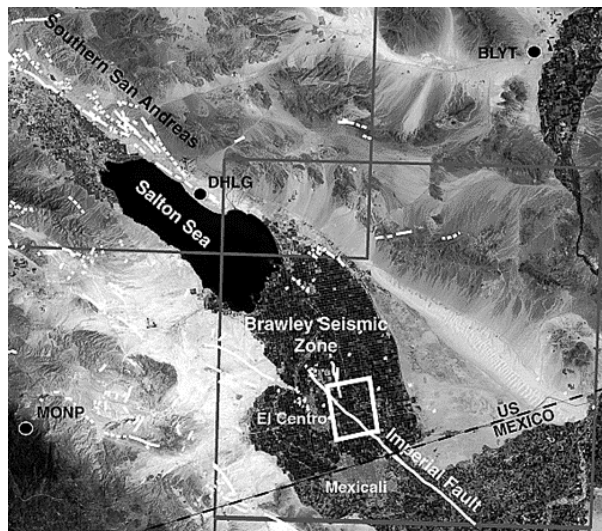
Uno de los primeros estudios sobre tasas de deslizamiento en Baja California, fue el realizado por Bennett et al., (1996), en donde estimaron la tasa de movimiento relativo entre la placa Pacífico y la placa Norteamericana y la tasa de deslizamiento para la falla San Andrés, San Jacinto, Elsinore, Cerro Prieto e Imperial; estos valores se determinaron utilizando datos GPS de aproximadamente 50 estaciones de observación distribuidas alrededor de las fallas antes mencionadas (Figura 1). Sin embargo, para el caso de las fallas localizadas en el Valle de Mexicali y al oeste del norte de Baja California, solamente se contaron con 10 estaciones de observación. Con ello, la tasa de deslizamiento para las fallas Cerro Prieto e Imperial se calcularon en  $42 \pm 1$  mm/año y  $35 \pm 2$  mm/año, respectivamente, y representa el 86% del total del movimiento relativo entre las placas Pacífico y Norteamérica.



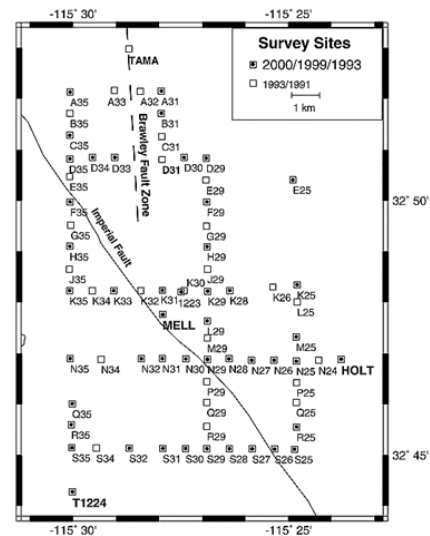
**Figura 1.** Campo de velocidades para el sur de California y norte de Baja California. Figura tomada de Bennett et al., (1996).

En contraste, Lyons, (2002) encontró que para la sección de la falla Imperial localizada en el Valle Imperial (Figura 2) las tasas de deslizamiento asísmico son de 9 mm/año entre 1990-2000; estos resultados en comparación con los obtenidos en los estudios previos realizados por Lisowski y Presscot, (1981) y Langbein et al., (1983), indican que la tasa de deslizamiento asísmico ha incrementado, debiéndose principalmente a dos factores: 1) una mejor distribución y densidad de instrumentos de medición en la falla, lo que ha permitido mejor cuantía en los resultados obtenidos con respecto a estudios anteriores y 2) una subestimación de las tasas de deslizamiento debido al uso de extensómetros contra las mediciones geodésicas.

A



b



**Figura 2.** Deslizamiento asísmico de la falla Imperial en el Valle Imperial. a). Muestra la ubicación del tramo de la falla Imperial analizada. b). Distribución de los puntos de medición GPS utilizados para determinar el deslizamiento asísmico de la zona. Figura tomada de Lyons, (2002).

En trabajos más recientes en la región, González-Ortega et al., (2014) utilizando datos de GPS e InSAR, se modeló y analizó el desplazamiento cosísmico y posísmico generado por el sismo El Mayor-Cucapah  $M_w$  7.2 de 2010. Los valores estimados para el desplazamiento posísmicos en la cuenca Laguna Salada son de ~10 cm de contracción, que contribuye a la subsidencia observada en esta cuenca; para la Falla Indiviso, la contracción normal de ésta se encuentra a lo largo de la fractura localizada entre los 5 y 10 km de profundidad. El modelo de deslizamiento continuo en la falla explica los desplazamientos en el campo cercano <25 km de la ruptura principal, sin embargo, para desplazamientos >25 km de la ruptura principal, el mecanismo de relajación posísmica más adecuado es un modelo viscoelástico. Con ello, una de las interrogantes que no se abordaron en dicho trabajo fue la posible afectación de las tasas de deslizamiento contemporáneas en las fallas Imperial y Cerro Prieto debido a la relajación posísmica del sismo El Mayor-Cucapah (EMC).

Finalmente, de acuerdo con el trabajo de Xu et al., (2017), se estableció que la Falla Imperial no distribuye uniformemente los 40 mm/año del movimiento relativo en la región y hay una deformación significativa en fallas no mapeadas en la parte occidental del Valle de Mexicali. En este análisis se muestra la presencia de movimiento significativo a través de la Falla Indiviso, esto podría deberse a la continuación del desplazamiento posísmico del sismo El Mayor-Cucapah.

## **1.2. Justificación.**

La tasa de deslizamiento es un parámetro fundamental para el potencial sísmico de una región, sí se considera que parte de la energía elástica acumulada se puede liberar de forma sísmica. Por ello, es importante estimar los valores de tasa de deslizamiento contemporáneo para las fallas localizadas en el Valle de Mexicali, por medio de un arreglo denso de estaciones de observación temporal y continúa GPS.

## **1.3. Hipótesis.**

Las tasas de deslizamiento de las fallas del valle de Mexicali han sido perturbadas por los desplazamientos posísmicos generados por el sismo El Mayor-Cucapah  $M_w$  7.2 del 2010, ello da como resultado valores menores del momento sísmico acumulado en la región.

## **1.4. Objetivos.**

### **1.4.1. Objetivo general.**

Estimar las tasas de deslizamiento de las principales fallas del Valle de Mexicali, Baja California, México.



#### **1.4.2. Objetivos específicos.**

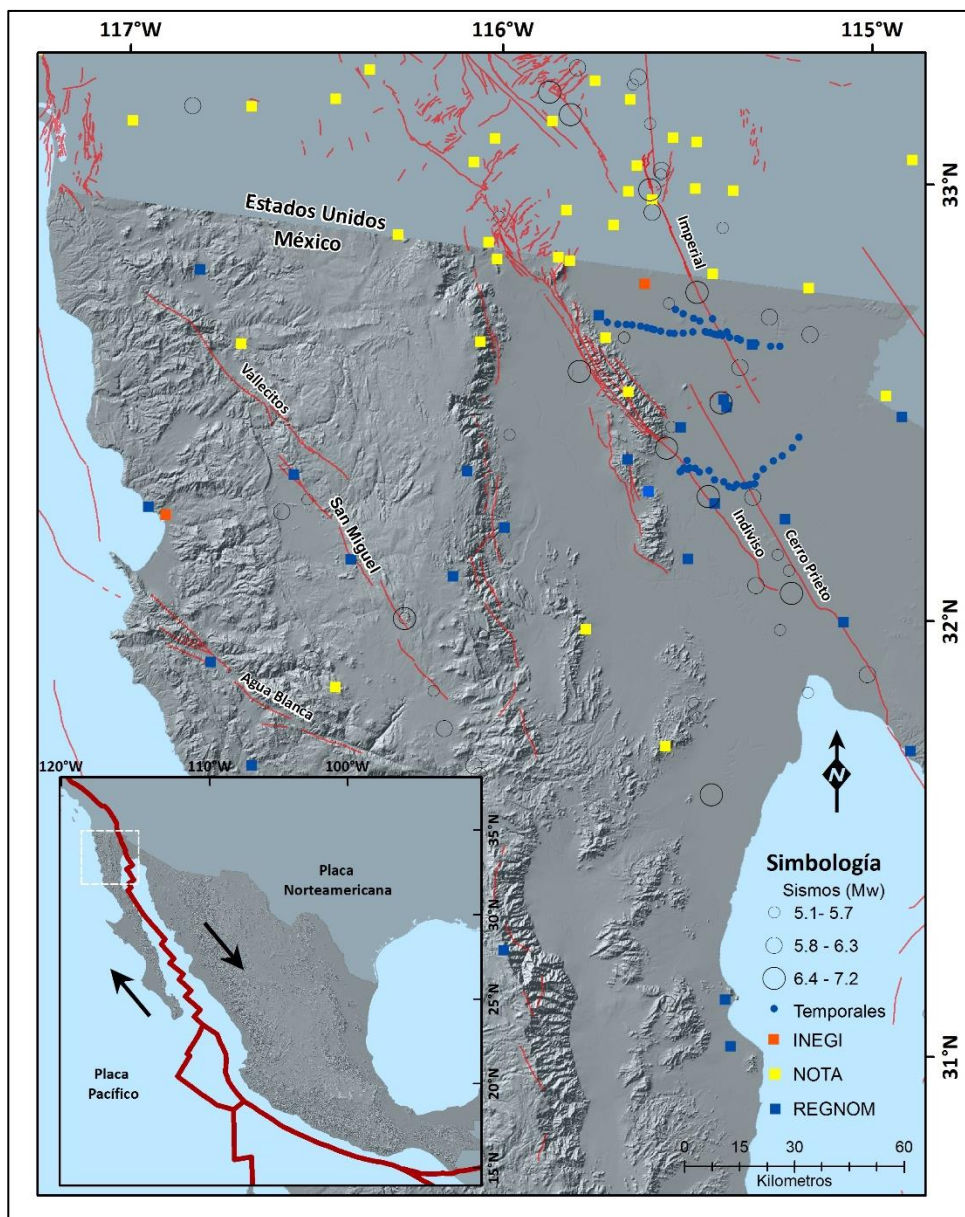
1. Realizar una campaña de observación GPS en el Valle de Mexicali.
2. Procesar datos GPS con el software GAMIT/GLOBK y obtener las velocidades en cada uno de los sitios de observación.
3. Estimar las tasas de deslizamiento de las fallas: Cerro Prieto e Imperial, y obtener valores preliminares de las tasas de deslizamiento para las fallas Indiviso y Tulecheck y/o Michoacán, utilizando un modelo de deformación elástica en semiespacio homogéneo.
4. Determinar la posible influencia de la relajación posísmica de El Mayor-Cucapah, 2010 en la estimación de las tasas de deslizamiento.
5. Estimar la acumulación del momento sísmico a partir de las tasas de deslizamiento.

## Capítulo 2. Marco Teórico.

---

### 2.1. Área de estudio.

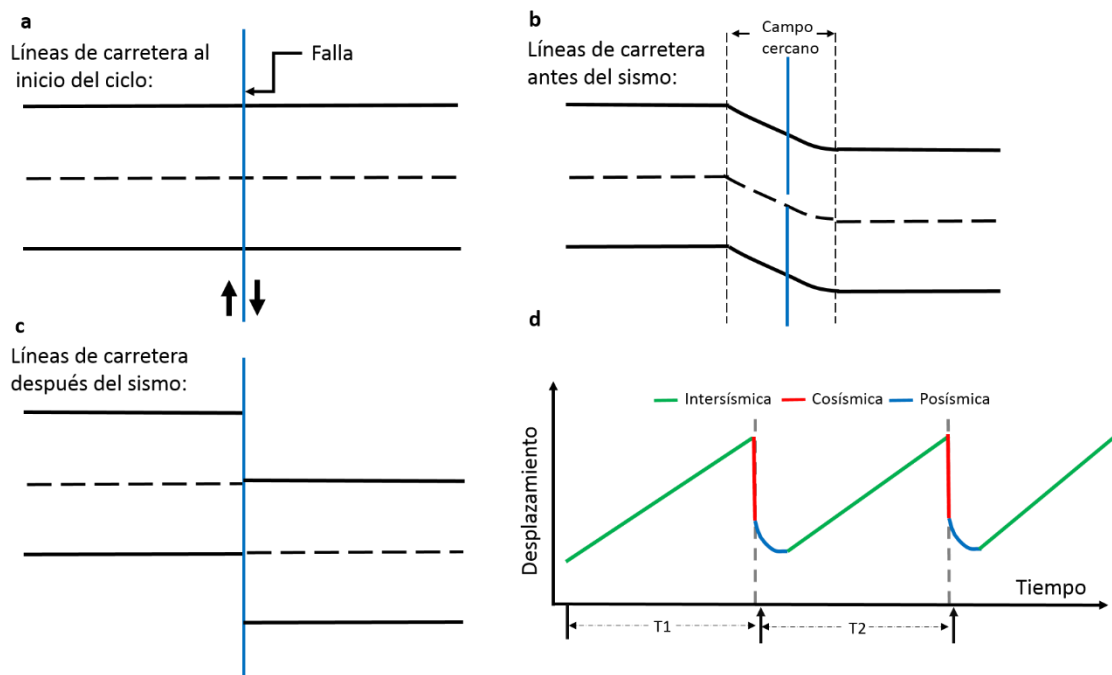
El Valle de Mexicali se encuentra en la porción noreste del estado de Baja California en el delta del río Colorado, es una región sísmicamente activa debido al movimiento relativo entre la placa Pacífico y la placa Norteamericana (Figura 3). El movimiento tectónico principal es de rumbo y presenta varios sistemas de fallas escalonadas con movimiento predominante lateral derecho (Lomnitz et al., 1970; Anderson y Bodin, 1987; Frez y González, 1991; Fletcher et al., 2009; González-García et al., 2010). La actividad sísmica de mayor importancia de la región se resume con los siguientes sismos: el sismo de 1892 de la falla Laguna Salada de  $M_w \sim 7.2$ , el sismo de 1934 con  $M_w$  7.0, el sismo de El Centro de 1940 con  $M_w$  6.9, el sismo del Valle Imperial con  $M_w$  6.5 y el sismo de Cerro Prieto con  $M_w$  6.3 (Frez y González, 1991), y el más reciente, el sismo El Mayor-Cucapah de magnitud 7.2  $M_w$  ocurrido en 2010 (González-Ortega et al., 2014; Fletcher et al., 2014).



**Figura 3.** Marco tectónico del norte de Baja California. Se muestra la distribución de las principales fallas y la sismicidad histórica e instrumental para sismos  $M_w > 5.0$  (círculos en color negro). La localización de estaciones GPS continuas están indicadas en cuadros en color naranja, amarillo y azul. Las estaciones GPS temporales se muestran en círculos color azul. La figura insertada en el mapa muestra la macro localización de la región de estudio.

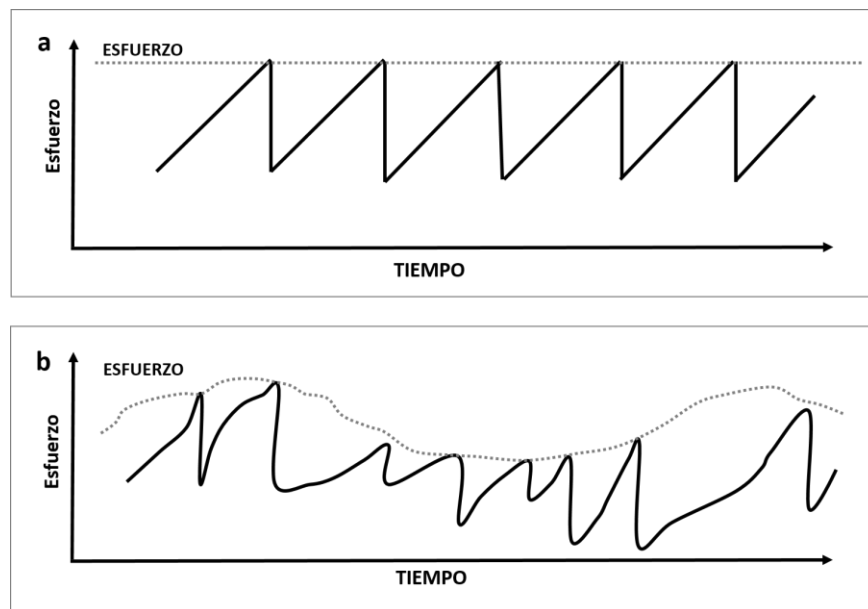
## 2.2. El ciclo sísmico.

El concepto del ciclo sísmico fue desarrollado por Henry Reid en 1910, al analizar las características del sismo de San Francisco  $M_w$  7.8 de 1906. Henry Reid sugirió la hipótesis de que los sismos ocurren como consecuencia de la liberación del esfuerzo acumulado en una zona de falla después de un largo periodo de tiempo, dando lugar a la conocida teoría del rebote elástico (Figura 4) (McGuire, 2008). Cuando la acumulación de la deformación elástica excede la resistencia de las rocas a lo largo de la falla, la energía acumulada se libera súbitamente en forma de ondas sísmicas, calor y fracturas en las rocas.



**Figura 4.** Esquema de la teoría de rebote elástico. a) Línea de carretera atravesada perpendicularmente por una falla, la cual se encuentra a inicio del ciclo sísmico por lo que la carretera no presenta deformación alguna. b) Línea de carretera atravesada perpendicularmente por una falla, en esta parte el ciclo sísmico se encuentra en la parte intersísmica (acumulando energía) por lo que la carretera se está deformando paulatinamente conforme la falla acumula energía. c) Línea de carretera atravesada perpendicularmente por una falla justo después de un evento sísmico, se puede apreciar que la línea de carretera se desplazó debido a la ruptura del terreno por la liberación de energía en la falla. Figura modificada de Hough, (2010). d) Evolución del desplazamiento durante el ciclo sísmico. El ciclo sísmico está compuesto de 3 etapas: intersísmica, cosísmica y posísmica.

En una primera aproximación, el ciclo sísmico puede ser visto como una secuencia regular, donde el esfuerzo se acumula en el plano de falla hasta que alcanza la resistencia de rotura de la roca, con lo cual se genera un sismo, después de esto el esfuerzo se relaja y, comienza un ciclo de nuevo (Figura 5a). Sin embargo, uno de los factores que hacen complejo el ciclo sísmico es el cambio de estado de esfuerzos debido a la ocurrencia de sismos en la región (Stein, 2003; Toda, et al., 2005), a lo que se le denomina secuencia irregular. Por ejemplo, un sismo de gran magnitud en un segmento de falla puede cambiar el estado de esfuerzos en fallas aledañas, ya sea de forma estática o dinámica, y puede acelerar o desacelerar la actividad sísmica dependiendo la geometría de los segmentos de falla activados (Figura 5b) (Kanamori y Brodsky, 2004; McGuire, 2008).



**Figura 5.** a) Secuencia regular del ciclo sísmico. b) Secuencia irregular del ciclo sísmico. Figura modificada de Kanamori y Brodsky (2004).

La evolución del desplazamiento durante el ciclo sísmico está compuesto por tres fases, la primera llamada desplazamiento cosísmico, en esta etapa se presenta la liberación de esfuerzo de manera repentina y abrupta. Después de que cesa la ruptura, los movimientos transitorios “posísmicos” pueden continuar durante años o décadas. La deformación intersísmica es constante y ocurre

durante todo el ciclo, incluso mientras permanecen los movimientos transitorios. La acumulación de deformación intersísmica vuelve a cargar de energía la falla, la cual se deslizará eventualmente cuando los esfuerzos superen la resistencia de la falla, y el ciclo se repita (Field y Thatcher, 2006).

### **2.2.1. Tasas de deslizamiento.**

El término tasa de deslizamiento hace referencia al promedio en el cual una falla se mueve con respecto al campo lejano siguiendo el movimiento de las placas (Hough, 2010). Las placas tectónicas se desplazan como un bloque de material continuo a una velocidad constante, este proceso tiene como consecuencia la acumulación de esfuerzos en los límites de placas. Cabe aclarar que el límite entre placas no es una línea bien definida, es más bien una zona de transición o deformación, por lo que, el límite entre una placa y otra suele estar delimitado por sistemas de fallas, tal como sucede en límite de las placas Pacífico y Norte América. Estos valores pueden ser estimados a través de: a) medios geológicos, al estimar las edades y características de los desplazamientos de terremotos pasados o durante varios ciclos sísmicos (Rockwell et al., 1984; Hough, 2010; Field et al., 2015) y b) mediante el modelado de datos geodésicos al medir el desplazamiento paralelo a la dirección del deslizamiento predominante (Stein, 2007; Smith-Konter et al., 2011).

El establecimiento de redes geodésicas densas, de funcionamiento continuo y temporal de GPS e InSAR han mejorado en gran medida la estimación de las tasas de deslizamiento para los sistemas de fallas que contienen múltiples segmentos (Resor et al., 2018).

### **2.2.2. Acumulación del momento sísmico.**

Utilizando los valores de las tasas de deslizamiento se puede realizar una estimación de momento sísmico acumulado, considerando que la mayor parte de la energía elástica acumulada se libera de forma sísmica. Tal como se muestra en la ecuación 1 el momento sísmico ( $M_0$ ) es la cantidad de energía liberada durante el sismo (Hanks y Wyss, 1972; Hanks y Kanamori, 1979; Well y

Coppersmith, 1994), siendo un enlace físicamente significativo entre el tamaño del sismo y los parámetros de ruptura de la falla.

$$M_o = \mu AD \quad (1)$$

Donde  $\mu$  es el módulo de rigidez de la roca,  $A$  es el área de ruptura producida por el sismo y  $D$  es el desplazamiento promedio del terreno.

La tasa de acumulación del momento sísmico ( $\dot{M}_o$ ) puede ser considerada como una medida del potencial sísmico de una región sísmicamente activa. En términos de la tasa de deslizamiento, la ecuación (1) se modifica de la siguiente manera (ecuación 2):

$$\dot{M}_o = \mu LDV \quad (2)$$

Donde el área de ruptura  $A$  está determinado por  $L$  (longitud de falla) y  $D$  (profundidad de la capa sísmogénica), y el deslizamiento promedio de la falla ( $D$ ) queda dado por  $V$  (tasa de deslizamiento en la falla) (Smith-Konter et al., 2011).

Considerando el momento sísmico acumulado se calcula la magnitud aproximada que tendría el sismo generado durante cierto periodo de tiempo; para estimar la magnitud momento ( $M_w$ ) de un sismo se utiliza la ecuación 3 (Hanks y Kanamori, 1979).

$$M_w = \frac{2}{3}(\log_{10} M_o) - 10.73 \quad (3)$$

Al conocer la magnitud aproximada del sismo que podría presentarse en cierto lapso, puede utilizarse como restricción adicional a los modelos de peligro sísmico. El Pronóstico Uniforme de Ruptura de Terremoto de California, versión 3 (UCERF3 por sus siglas en inglés) utiliza modelos de peligro sísmico en el cual se contempla el modelado de fallas, deformación, tasa de sismicidad y

probabilidad de ocurrencia de sismos para estimar la magnitud, localización y periodo de retorno en el que se puede presentar un sismo potencialmente destructivo en California (Field et al., 2014).

### 2.2.3. Deformación intersísmica.

La ecuación 4 muestra cómo se calcula la tasa de deformación intersísmica utilizando la tasa de deslizamiento y la profundidad de bloqueo de las fallas.

$$\dot{\epsilon}(x) = \frac{V}{\pi D} \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{D}\right)^2} \right] \quad (4)$$

Donde  $V$  es la tasa de deslizamiento,  $D$  es la profundidad de bloqueo y  $x$  es la distancia perpendicular de la estación GPS a la falla (Segall, 2010).

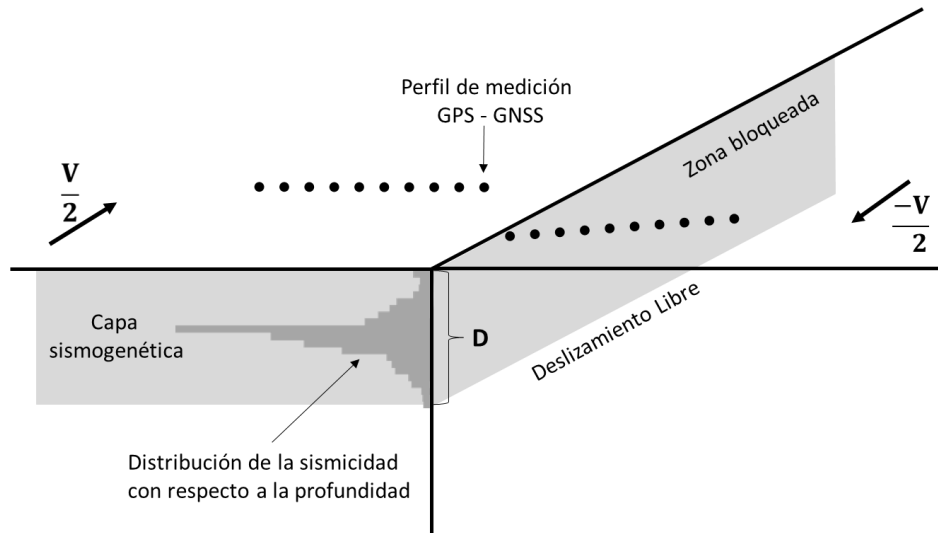
### 2.3. Modelo de dislocación.

Para la estimación de las tasas de deslizamiento, se emplea un modelo de dislocación en un semiespacio elástico y homogéneo (Savage y Burford, 1973; Dixon et al., 2002; Smith-Konter et al., 2011) que describe la acumulación de deformación elástica a lo largo de una falla vertical o inclinada (Figura 6). La ecuación principal del modelo de dislocación a partir del perfil de velocidad perpendicular a la falla está dada por:

$$v(x) = -\frac{V}{\pi} \tan^{-1} \left( \frac{x}{D} \right) \quad (5)$$



Donde  $v$  es la velocidad por cada posición con respecto a  $x$ ,  $V$  es la velocidad en el campo lejano,  $x$  es la distancia horizontal perpendicular a la falla y  $D$  es la profundidad de bloqueo efectiva.



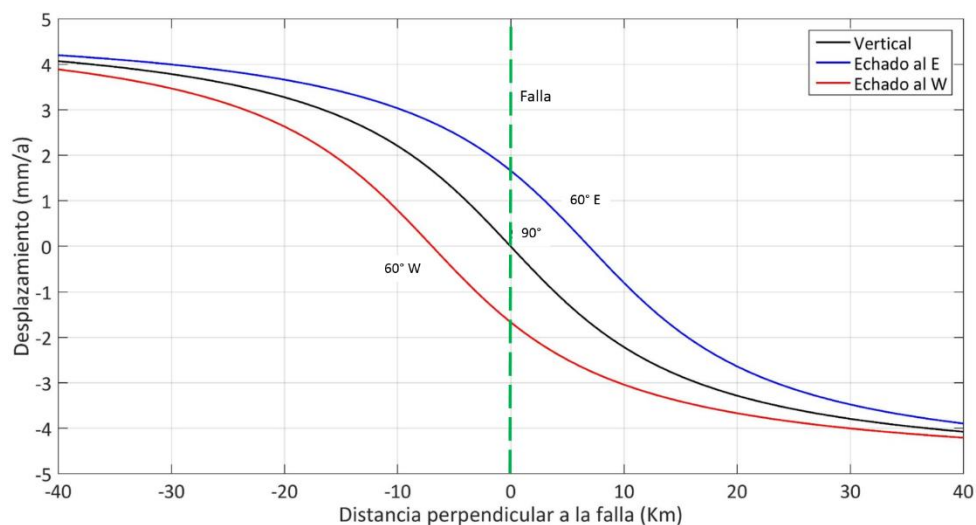
**Figura 6.** Modelo de dislocación.  $V$  se refiere a la tasa de deslizamiento de las fallas y  $D$  la profundidad de bloqueo. Modificada de Smith-Konter et al., (2011).

Le ecuación descrita anteriormente es para una falla vertical con una profundidad de bloqueo constante desde la superficie hasta la base de la corteza sismogénica. El caso más general de la ecuación (4) (Savage y Lisowski 1993; Sandwell, 2001) considera la falla inclinada o con ángulo de echado y con deslizamiento asísmico superficial. El deslizamiento asísmico ocurre cuando disminuye el esfuerzo normal efectivo en una falla, esto puede deberse a factores como: la baja resistencia a la fricción de la roca en las fallas, baja tensión normal que actúa sobre la falla en la corteza superficial y presiones de fluidos de poro elevadas (Savage y Lisowsky, 1993; Lyons, 2002).

$$v(x) = \left[ \tan^{-1} \left( \frac{x \cos^2 \alpha}{(D - d) - x \operatorname{sen} \alpha \operatorname{cosec} \alpha} \right) - \alpha \right] \quad (6)$$

Donde  $\alpha$  se refiere al ángulo de echado del plano de falla en grados y  $d$  es la profundidad de capa con deslizamiento asísmico (Cohen, 1999; Sandwell, 2001; Lyons, 2002).

La influencia que el ángulo de echado tiene en la ecuación 4, es el de una traslación en la distancia perpendicular a la falla de cada sitio de observación, con valor de  $D \tan \alpha$  (Sandwell, 2001), para el caso de la figura 7 el corrimiento aplicado a los datos es de ~6 km hacia la derecha, suponiendo que el ángulo de echado de la falla en cuestión está orientado hacia el este y para el caso de una falla con ángulo de echado hacia el oeste el corrimiento en los datos se presenta hacia la izquierda.



**Figura 7.** Efecto del ángulo de echado en una falla hipotética. Se utiliza la ecuación 4, considerando profundidad de bloqueo de 12 km, tasa de deslizamiento 10 mm/año, un ángulo de echado de 60° en dirección este (línea azul) y oeste (línea roja), además de la falla vertical (línea negra), la línea verde punteada representa la ubicación de la falla.

Para resolver la ecuación 4 y 5 en un esquema de inversión para estimar la tasa de deslizamiento y la profundidad de bloqueo de manera simultánea, se utiliza el algoritmo de Levenberg-Marquardt (L-M), el cual resulta de la combinación de los métodos de Gauss-Newton y el Descenso del gradiente. Este método fue propuesto por Levenberg, (1944) y Marquardt, (1973) como alternativa para resolver problemas de mínimos cuadrados no lineales utilizados para el ajuste de datos.

Cuando la solución del problema se encuentra lejos del mínimo local, el algoritmo se comporta como el método del máximo descenso: lento, pero garantiza convergencia. Sin embargo, cuando la solución está cercana al mínimo local, el método presenta un comportamiento parecido a Gauss-Newton exhibiendo una rápida convergencia (Levenberg, 1944; Marquardt, 1963; More, 1977; Cornejo Zúñiga, Rebolledo Vega, 2016).

## 2.4. Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS).

GNSS se refiere a la constelación de satélites artificiales que orbitan la Tierra, los cuales envían señales que transmiten datos de posición y tiempo a receptores GNSS. Este conjunto de satélites proporcionan cobertura global e incluye varias constelaciones satelitales (Tabla 1) pertenecientes a diferentes regiones del mundo tales como: Europa (Galileo), Estados Unidos de América (Sistema de Posicionamiento Global GPS/NAVSTAR; esta constelación satelital es la utilizada para este trabajo), Rusia (Sistema de Navegación Global por Satélite Global'Naya GLONASS), China (Sistema de Navegación por Satélite BeiDou/COMPAS), además de otras constelaciones regionales (Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Jin et al., 2014)

**Tabla 1.** Características orbitales de las principales plataformas satelitales del Sistema Global de Navegación Satelital (GNSS). Jin et al., (2014).

Sistema	Satélites en orbita	Inclinación (grados)	Planos orbitales	Periodo orbital (Horas)	Altura (Km)
GPS	31	55	6	12	20,200
Galileo	30	56	6	14	23,200
GLONASS	24	65	3	11.25	19,100
BeiDou/COMPAS	35	55	6	12	21,150

### **2.4.1. Segmentos GNSS**

GNSS está compuesto de cuatro segmentos principales, segmento de Espacial, segmento de Control, segmento Usuario y segmento de aumento, a continuación, se describe brevemente la función de cada uno de los antes mencionados.

El segmento espacial consiste en la constelación de satélites artificiales que orbita la Tierra entre los 20, 000 y 30, 000 km de altura, estos están equipados con relojes atómicos precisos, antenas de navegación, etc. Para proporcionar posicionamiento global continuo, la constelación de satélites está diseñada de tal forma que en cualquier sitio de la superficie terrestre se observen al menos 4 satélites. Estos, transmiten los códigos de alcance en dos portadoras de radiofrecuencia, lo que permite determinar las ubicaciones de los receptores con distintos grados de precisión. El segmento de control tiene como función dirigir todo el sistema y comprende de una estación maestra, estaciones de monitoreo y antenas telemétricas terrestres distribuidas en todo el mundo. Las tareas principales de este segmento son: medir la posición de cada satélite y controlar su estado y órbita, monitorear las señales emitidas por los satélites, enviar información a los satélites para una buena sincronía de los relojes y mensajes de navegación. El segmento usuario consiste en los receptores GNSS que reciben la señal de los satélites para poder estimar la posición del usuario. Tiene como funciones identificar los satélites a los cuales tiene línea de vista sin obstrucción y estimar la distancia entre usuario (antena receptora) y los satélites.

Finalmente, el segmento de aumento incluye equipamiento adicional como estaciones base GNSS, que envían correcciones de posición a través de satélites geoestacionarios y estos a su vez las reenvían a los usuarios, permitiendo mejores servicios de localización o precisión de la posición del usuario. Algunos ejemplos de nuevas funciones son GPS diferencial (DGPS), GPS de área local (LGPS), GPS de área amplia (WGPS), WAAS (Sistema de aumento de área amplia), GDGPS (GPS diferencial global) por la NASA, MSAS (Sistema de aumento de satélite multifunción) por Japón y EGNOS (Sistema de Superposición global europea de navegación) por la Unión Europea (Jin et al., 2014).

## Capítulo 3. Metodología.

---

### 3.1. Adquisición de datos.

Los datos GPS utilizados en este trabajo de tesis se clasifican en dos tipos, temporales y permanentes. Los datos temporales se obtuvieron mediante campañas anuales desde 2011 hasta 2019 en el Valle de Mexicali, a través del proyecto binacional del Southern California Earthquake Center (SCEC) entre Scripps Institution of Oceanography (SIO), y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE); mientras que los datos continuos se obtuvieron de redes como Consorcio NAVSTAR (UNAVCO), Red Geodésica del Noreste de México (REGOM) y la red del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

#### 3.1.1. Continuos.

En total se utilizaron los datos de 36 estaciones GPS de monitoreo continuo localizadas en el noroeste de México, de las cuales 11 estaciones son administradas por Network of the Americas (NOTA, por sus siglas en Inglés), 23 son parte de REGNOM y 2 estaciones forman parte de la red geodésica activa del INEGI. En la Figura 8 se observa la estación permanente Cañada David Este, está equipada con un receptor GNSS y una antena receptora satelital, esta estación se abastece de energía a través de paneles solares.



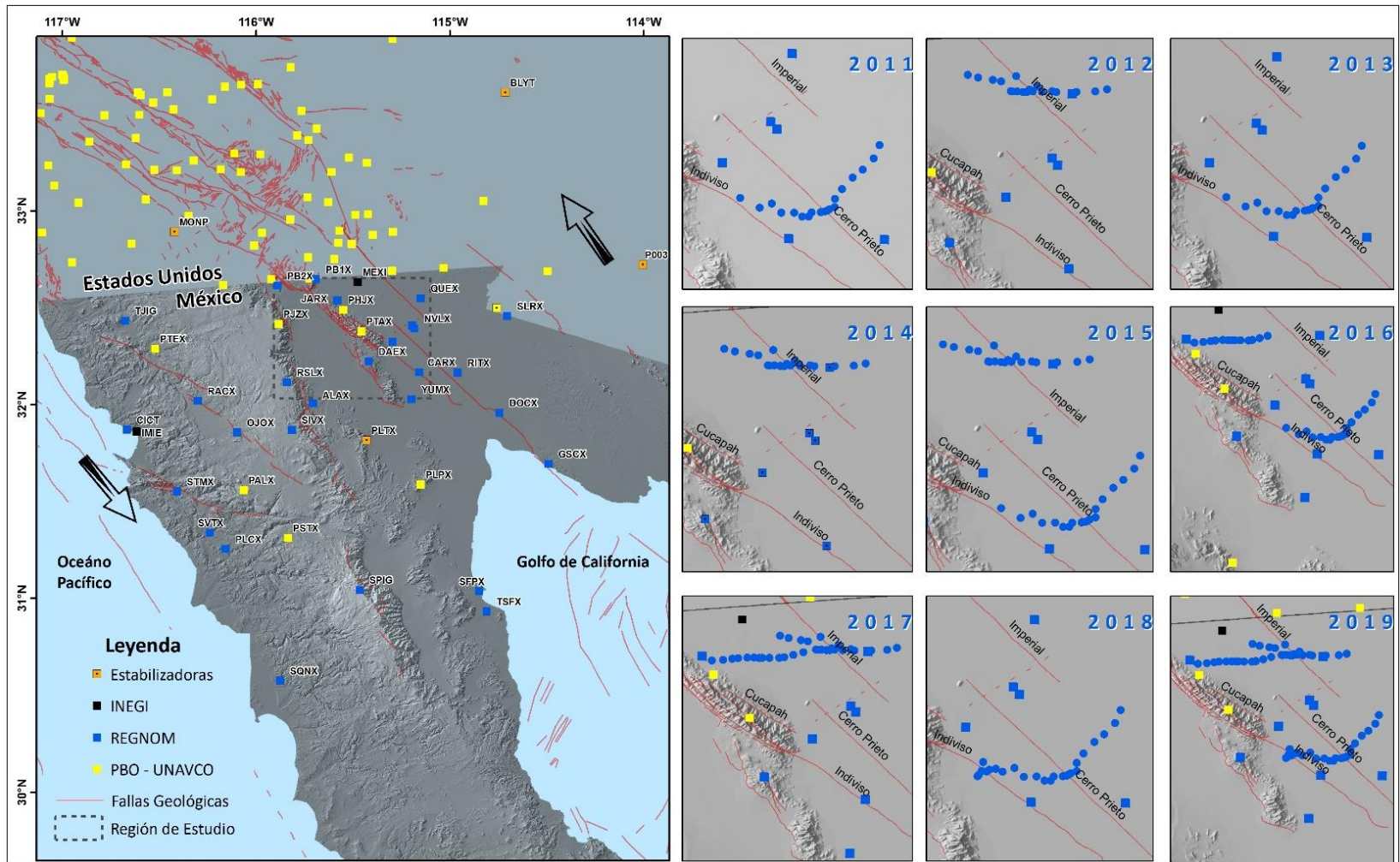
**Figura 8.** Estación GPS de monitoreo continuo en Cañada David Este (DAEX). Vista hacia el Valle de Mexicali.

### 3.1.2. Temporales.

La adquisición de los datos GPS temporales consistió en campañas anuales intercaladas entre perfiles perpendiculares a las principales fallas del Valle de Mexicali. De los 69 puntos de observación, 39 pertenecen al perfil de Cerro Prieto – Indiviso y 30 corresponden al perfil Imperial – Tulecheck; los perfiles Cerro Prieto e Imperial se midieron a partir de los años 2011 y 2012 respectivamente, mientras que Indiviso y Tulecheck se midieron a partir del año 2016. La Figura 9 muestra la distribución espacial y temporal de las mediciones de cada uno de los perfiles GPS temporales. La instalación de las estaciones GPS temporales consiste en atornillar una antena tipo anillada a un perno empotrado en una estructura de concreto estable (canales de riego agrícola y/o puentes de paso vehicular). La forma anillada de la antena tiene como función minimizar el ruido en la señal GPS producida por objetos que produzcan multireflejo en la superficie terrestre. La antena se orienta hacia el norte y se conecta al receptor GPS donde se almacenan los datos; para la alimentación de energía se utiliza una batería de 12 voltios (Figura 10). Una vez instalado el equipo de deja midiendo por lapsos de tiempo mayores a 2 horas, esto con el objetivo de reducir el error en la posición final. La Tabla 2, enlista las estaciones de adquisición continua y temporal utilizadas durante el desarrollo de este trabajo de tesis.



**Figura 9.** Estación de adquisición de datos GPS temporal. Se muestra la instalación típica de una estación GPS sobre la losa de concreto de un canal de riego agrícola en el Valle de Mexicali. La estación consiste en un equipo receptor para almacenar los datos de las señales recibidas de los satélites, una antena anillada y una batería de 12 V.



**Figura 10.** Mapa de ubicación de la zona de estudio. En el recuadro de la izquierda muestra la ubicación de todas las estaciones GPS/GNSS permanentes localizadas en Baja California y el sur de California, los recuadros pequeños a la derecha muestran los perfiles de medición GPS temporales y su distribución por campaña anual.



**Tabla 2.** Estaciones GNSS/GPS de registro continuo y temporal utilizadas para obtener el campo de velocidades del Valle de Mexicali.

Estación	Tipo	Longitud (°)	Latitud (°)	Años de medición
CCS1	Temporal	-114.970505	32.360229	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CCS2	Temporal	-114.982448	32.333025	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CCS3	Temporal	-115.004936	32.309817	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC04	Temporal	-115.025696	32.293621	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC05	Temporal	-115.048120	32.269482	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC06	Temporal	-115.062800	32.249727	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC07	Temporal	-115.062899	32.232248	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC08	Temporal	-115.074715	32.227789	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC09	Temporal	-115.078480	32.225451	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC10	Temporal	-115.083672	32.223418	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC11	Temporal	-115.091645	32.221950	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC12	Temporal	-115.110644	32.221328	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC13	Temporal	-115.117028	32.212838	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC14	Temporal	-115.129978	32.212777	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC15	Temporal	-115.146595	32.221134	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CC19	Temporal	-115.258387	32.251273	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CN16	Temporal	-115.173189	32.220962	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CN17	Temporal	-115.192860	32.239479	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
CN18	Temporal	-115.217958	32.231074	2011, 2013, 2015, 2016, 2018, 2019
DAEX	Continuo	-115.419100	32.224400	2011-2019
IID2	Continuo	-115.032000	32.706000	2011-2019
MEXI	Continuo	-115.476000	32.633000	2011-2019
PUAS	Continuo	-115.343600	32.161600	2011-2019
PLTX	Continuo	-115.430900	31.816300	2011-2019
P796	Continuo	-114.759300	32.497900	2011-2019
PALX	Continuo	-116.063800	31.559100	2011-2019
P500	Continuo	-115.300000	32.690000	2011-2019
P496	Continuo	-115.596000	32.751000	2011-2019
P494	Continuo	-115.732065	32.759655	2011-2019
PBX1	Continuo	-115.692458	32.647969	2011-2019
PBX2	Continuo	-115.889400	32.613800	2011-2019
PHJX	Continuo	-115.550500	32.490100	2011-2019
PJZX	Continuo	-115.883700	32.417000	2011-2019
YUMX	Continuo	-115.199190	32.027678	2011-2019
NAYX	Continuo	-115.295510	32.324286	2011-2019
PTAX	Continuo	-115.456600	32.377900	2011-2019
QUEX	Continuo	-115.153241	32.549213	2011-2019
YUGH	Continuo	-115.922000	32.648000	2011-2019



SGLG	Continuo	-115.726000	32.649000	2011-2019
NVLX	Continuo	-115.183229	32.393537	2011-2019
DD01	Temporal	-115.100675	32.554220	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD02	Temporal	-115.141882	32.552785	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD03	Temporal	-115.185531	32.552840	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD04	Temporal	-115.194455	32.555150	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD05	Temporal	-115.215950	32.553600	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD06	Temporal	-115.226933	32.565133	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD07	Temporal	-115.236750	32.554383	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD08	Temporal	-115.243950	32.557967	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD09	Temporal	-115.249952	32.553144	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD10	Temporal	-115.258269	32.553359	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD11	Temporal	-115.270860	32.554610	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD12	Temporal	-115.281750	32.554106	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD13	Temporal	-115.284746	32.554799	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD14	Temporal	-115.305830	32.576329	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD15	Temporal	-115.323984	32.579456	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD16	Temporal	-115.355663	32.584632	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
DD17	Temporal	-115.378274	32.590381	2012, 2014, 2015, 2017, 2019
TL01	Temporal	-115.554424	32.526180	2016, 2017, 2019
TL02	Temporal	-115.525297	32.527766	2016, 2017, 2019
TL03	Temporal	-115.501735	32.530872	2016, 2017, 2019
TL04	Temporal	-115.486489	32.532846	2016, 2017, 2019
TL05	Temporal	-115.462508	32.534142	2016, 2017, 2019
TL06	Temporal	-115.445375	32.534006	2016, 2017, 2019
TL07	Temporal	-115.431988	32.533410	2016, 2017, 2019
TL08	Temporal	-115.423712	32.533352	2016, 2017, 2019
TL09	Temporal	-115.405703	32.533146	2016, 2017, 2019
TL10	Temporal	-115.380133	32.532977	2016, 2017, 2019
TL11	Temporal	-115.367715	32.534642	2016, 2017, 2019
TL12	Temporal	-115.343755	32.540688	2016, 2017, 2019
TL13	Temporal	-115.317830	32.547680	2016, 2017, 2019
IC01	Temporal	-115.232060	32.237570	2016, 2018, 2019
IC02	Temporal	-115.245870	32.235800	2016, 2018, 2019
IC03	Temporal	-115.251170	32.231600	2016, 2018, 2019
IC04	Temporal	-115.261820	32.233200	2016, 2018, 2019
IC05	Temporal	-115.26760	32.224660	2016, 2018, 2019
IC06	Temporal	-115.270440	32.222120	2016, 2018, 2019
IN01	Temporal	-115.245650	32.332750	2016, 2018, 2019
IN02	Temporal	-115.251670	32.324070	2016, 2018, 2019
IN03	Temporal	-115.264210	32.297980	2016, 2018, 2019

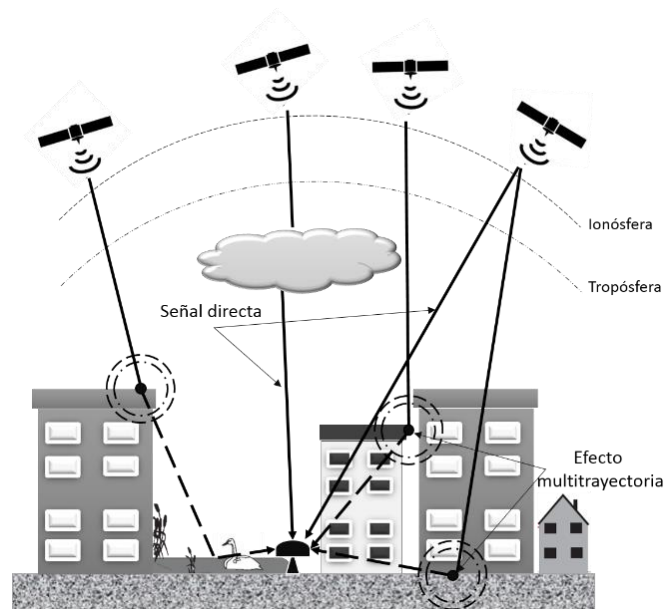
IN04	Temporal	-115.276010	32.291360	2016, 2018, 2019
IN05	Temporal	-115.288960	32.276450	2016, 2018, 2019
IN06	Temporal	-115.281500	32.263610	2016, 2018, 2019
IN07	Temporal	-115.285710	32.256120	2016, 2018, 2019
IN08	Temporal	-115.288410	32.252000	2016, 2018, 2019
IN09	Temporal	-115.293400	32.242910	2016, 2018, 2019
IN10	Temporal	-115.293900	32.227770	2016, 2018, 2019
IN11	Temporal	-115.277720	32.224120	2016, 2018, 2019
IN12	Temporal	-115.301850	32.226430	2016, 2018, 2019
IN13	Temporal	-115.302830	32.213100	2016, 2018, 2019
IN14	Temporal	-115.318930	32.212990	2016, 2018, 2019
IN15	Temporal	-115.325280	32.198250	2016, 2018, 2019

### 3.2. Señales GPS y cálculo de posición.

Los satélites GPS transmiten continuamente señales electromagnéticas que llevan códigos de rango (distancia entre el satélite y usuario) y mensajes de navegación (parámetros orbitales del satélite). La frecuencia fundamental de transmisión es 10.23 MHz; a partir de esta se derivan dos señales L1 y L2. La banda L1 con tiene una longitud de onda de  $\sim 19$  cm y la L2 una longitud de onda de  $\sim 24$  cm. Los mensajes de navegación incluyen los datos utilizados para calcular la posición del satélite individual en órbita en el momento de la transmisión de la señal (efemérides), el tiempo al cual se realiza la medición, así como el estado de toda la constelación de satélites (Hofmann-Wellenhof et al., 2008; Jin et al., 2014; González-Ortega, 2014).

En cada una de las señales L1 y L2, se transmiten códigos de ruido pseudoaleatorio (PRN) para la identificación de cada satélite. Entre los códigos transmitidos se encuentra el de adquisición imprecisa (C/A), este es el código de rango para uso civil y es modulado sólo en L1. Otro es el código de rango de precisión pseudoaleatorio (P) y modulado en ambas señales (Jin et al., 2014; González-Ortega, 2014). El PRN es una señal binaria con propiedades similares al ruido aleatorio, que se genera mediante un algoritmo matemático o "código", y consiste en un patrón repetido de 1 y 0 (Jin et al., 2014).

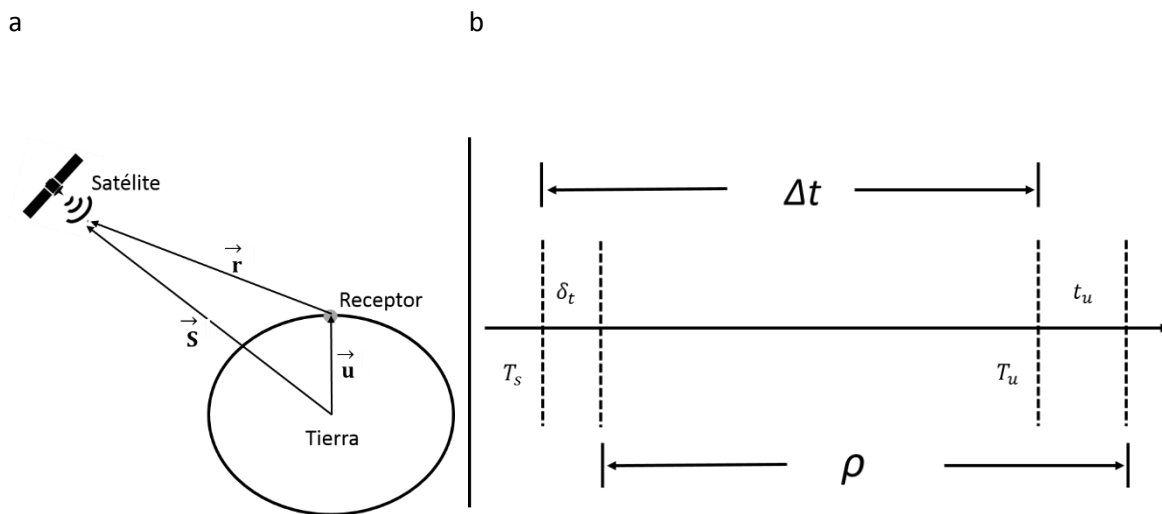
La precisión en la posición derivada de las mediciones GPS está sujeta a errores que degradan la calidad de las observaciones; las señales GPS a lo largo del viaje satélite-receptor se ven afectadas por múltiples fuentes de error, tales como: error de los relojes del receptor y satélite, error en las orbitas del satélite, efectos atmosféricos (ionosfera, troposfera), trayectoria múltiple (señal reflejada de superficies cerca al receptor (Figura 11), fase de la antena central, presión de la radiación solar, geometría satelital, efectos relativistas, ruido del receptor, obstrucción de la señal (Awange, 2012; Jin et al., 2014). Cada una de las fuentes de error influye en diferente medida la estimación de la posición final, por lo que es necesario implementar técnicas que ayuden a la minimización y/o eliminación de estos.



**Figura 11.** Efecto de trayectoria múltiple. Para una buena precisión en las mediciones GNSS, la señal emitida de los satélites debe viajar directamente al receptor, pero en muchas ocasiones la señal es reflejada por superficies reflectantes o refractantes; en las situaciones donde la señal presenta reflexiones o refracciones, la pseudodistancia que llega al receptor es más grande que la pseudodistancia real.

El principio básico para estimar la posición a través de satélites es la triangulación, junto con la sincronización de los tiempos entre el tiempo satelital, tiempo del sistema GNSS y el tiempo del receptor; por lo cual es necesario recibir la señal de cuatro satélites en el mismo receptor al mismo

tiempo, esto para calcular las tres incógnitas de posición (X, Y y H) y una para tiempo (error del reloj). Para obtener la posición se calcula el tiempo que tarda la señal en llegar del satélite al receptor (Figura 12a). El receptor al recibir la señal genera un código PRN correspondiente a cada satélite, con este calcula el tiempo de viaje desde el satélite al receptor. Al multiplicar el tiempo por la velocidad de propagación de la onda electromagnética, se obtiene la distancia satélite-receptor, denominada pseudodistancia ( $\rho$ ), este contiene errores de los relojes del satélite y receptor (Figura 12b), (González-Ortega, 2014).



**Figura 12.** a) Esquema de la relación vectorial de los parámetros orbitales ( $s$ ), la diferencia del satélite al receptor ( $r$ ) y la posición del receptor con respecto al centro de la Tierra ( $u$ ). b) Esquema que relaciona los valores del tiempo GNSS involucrados en la estimación de la posición del satélite, receptor y el sistema.

La relación satélite receptor (figura 12a) está dada por:

$$|\vec{r}| = |\vec{s}| - |\vec{u}| = |c\Delta t| \quad (7)$$

Donde  $r$  es la distancia del satélite al receptor,  $s$  es la localización espacial del satélite (efemérides),  $u$  es la posición del receptor que será calculada,  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $\Delta t$  es el tiempo de viaje.

Considerando las variables de la Figura 12b, tenemos:

$$r = c(T_u - T_s) = c\Delta t \quad (8)$$

$$\rho = r + c(t_u - \delta t) \quad (9)$$

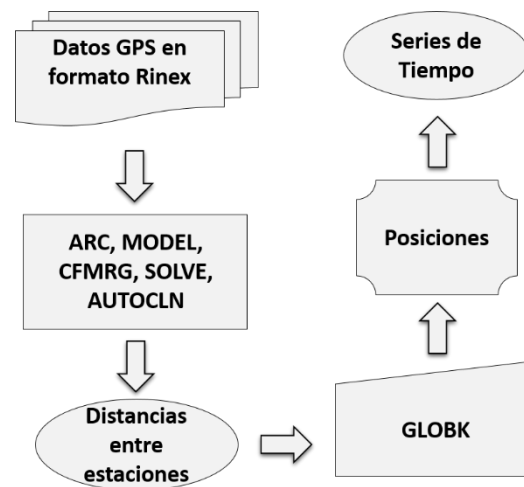
Donde  $T_u$  el tiempo del Sistema GPS al llegar la señal al receptor,  $T_s$  es el tiempo del Sistema GNSS,  $t_u$  es la diferencia entre el tiempo del Sistema GNSS y el tiempo del reloj del receptor,  $\delta t$  es la diferencia entre el tiempo del Sistema GNSS y el tiempo del reloj del satélite (calculada por el centro de control). Las mediciones geodésicas de precisión milimétrica en la posición requieren de la fase de las señales  $L_1$  y  $L_2$ , el procesamiento para el cálculo de la posición se realiza mediante diferencia dobles satélite-receptor para eliminar errores (Herring et al., 2015c; González-Ortega, 2014).

### 3.3. Estimación de posición por dobles diferencias.

En este trabajo de tesis se utiliza GAMIT/GLOBK, el cual es un conjunto de programas para el procesamiento de datos del GNSS. GAMIT es una colección de módulos que tienen como función principal procesar la fase de onda para estimar las posiciones relativas entre estaciones geodésicas y satélites, así como retrasos atmosféricos. GLOBK es un filtro Kalman que tiene como objetivo principal combinar las posiciones relativas entre cada una de las estaciones dentro de un marco de referencia tectónico global. El filtro de Kalman es un algoritmo que estima el estado de un sistema a partir de datos medidos, en un proceso de dos pasos: 1) predice el estado del sistema y 2) utiliza las mediciones de ruido para ajustar la estimación del estado del sistema (Herring et al., 2015b). Las posiciones (coordenadas X, Y y H) obtenidas del procesamiento en GAMIT/GLOBK están dadas en

términos del Servicio Internacional de GPS (IGS, por sus siglas en inglés) y del marco Internacional de Referencia Terrestre 2008 (ITRF2008, por sus siglas en inglés; Altamimi et al., 2012).

Para obtener la posición (coordenadas) de cada una de las estaciones GPS es necesario realizar una serie de pasos dentro de los módulos de cada subprograma, por lo que a continuación se muestra un diagrama de flujo general del procesado de datos GPS dentro de GAMIT/GLOBK (Figura 13).



**Figura 13.** Diagrama de flujo simple en el que se muestra el proceso que se realiza dentro del GAMIT/GLOBK para obtener como resultado final las series de tiempo de cada uno de los sitios de observación GPS. Herring et al., (2015a).

El insumo principal para el GAMIT son archivos Rinex (Receiver INdependent EXchange) que almacenan información recibida de los satélites, como datos de pseudodistancia y fase del satélite, así como, de la identidad de la estación GPS – GNSS, nombre, ubicación geográfica inicial, tipo de equipo y antena, altura de la antena respecto a la marca de observación geodésica. El módulo ARC tiene como función principal realizar un modelo orbital de los satélites a partir de las orbitas finales IGS para crear un archivo de efemérides (orbitas) tabuladas con las coordenadas de los satélites para cada tiempo de observación. La función del módulo MODEL es crear un archivo que los residuales de observación respecto a orbitas finales del IGS y archivos de navegación que se utilizarán en la resolución de las posiciones. CFMRG, SOLVE y AUTOCLN se encargan de mantener

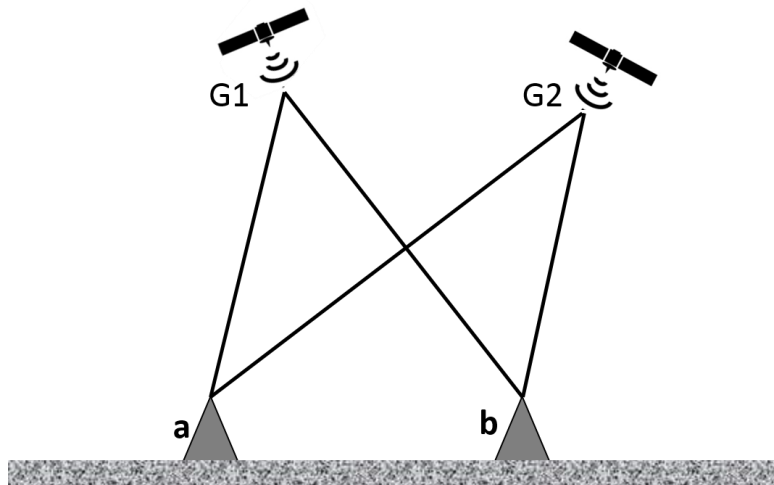
actualizados los datos de los archivos C (valores observados y calculados), M (controla la función de los archivos de datos para resolver y editar programas), L (contiene coordenadas de las estaciones), G (condiciones iniciales orbitales y valores de parámetros gravitacionales) y los datos del archivo I (parámetros del polinomio de segundo orden para el reloj del receptor) para cada tiempo de observación o época, por ejemplo cada segundo (Herring et al., 2015b).

Como se muestra en la ecuación (9), GAMIT utiliza datos de la fase dentro de un esquema de dobles diferencias entre satélites GPS/GNSS y estaciones receptoras para resolver las coordenadas de posición (este – oeste, norte – sur y altura) de cada estación, retraso atmosférico y número de ciclos  $N$  o ambigüedad para un tiempo considerable de observación, preferentemente de varias horas, con el fin de obtener una precisión de unos cuantos milímetros (Herring et al., 2015c).

$$\Phi = \rho + (dt - dT) + \lambda N + d_{ionosfera} + d_{troposfera} + \varepsilon_{multipath} \quad (10)$$

Donde  $\Phi$  es la fase,  $\rho$  la pseudodistancia,  $dt$  es el tiempo del receptor y  $dT$  el tiempo del satélite al momento de realizar la observación,  $N$  el número de ciclos,  $\lambda$  es la longitud de onda para L1 y L2,  $d$  son retrasos producidos en el viaje de la señal GPS en el medio y  $\varepsilon$  son los efectos multitrayectoria producidos por la obstrucción de la señal debido a objetos terrestres.

Los errores producidos por el desfase de tiempo entre receptor-satélite ( $dt - dT$ ) son eliminadas mediante las dobles diferencias (Herring et al., 2015c), mientras que los efectos de multitrayectoria son reducidos de manera considerable por el uso de antenas tipo anilladas (Braasch, 1994) y los retrasos atmosféricos, específicamente los de la ionosfera son reducidos considerablemente al utilizar las señales L1 y L2. Para minimizar los errores producidos por la troposfera se modela su índice de refracción, utilizando una capa seca y otra húmeda, de la cual el 90% del retraso de la señal se debe a la capa seca.



**Figura 14.** Esquema ilustrativo de dobles diferencias. Para eliminar los errores asociados al desfase de tiempo entre satélite y receptor se calcula la diferencia de fase entre el receptor a y el b que observan al satélite G1 a un determinado tiempo, esto elimina los posibles errores asociados al reloj satelital; si los receptores a y b observan un segundo satélite (G2) al mismo tiempo, se calcula la diferencia de fase para el satélite G2, esto con el objetivo de eliminar los errores asociados al reloj del receptor.

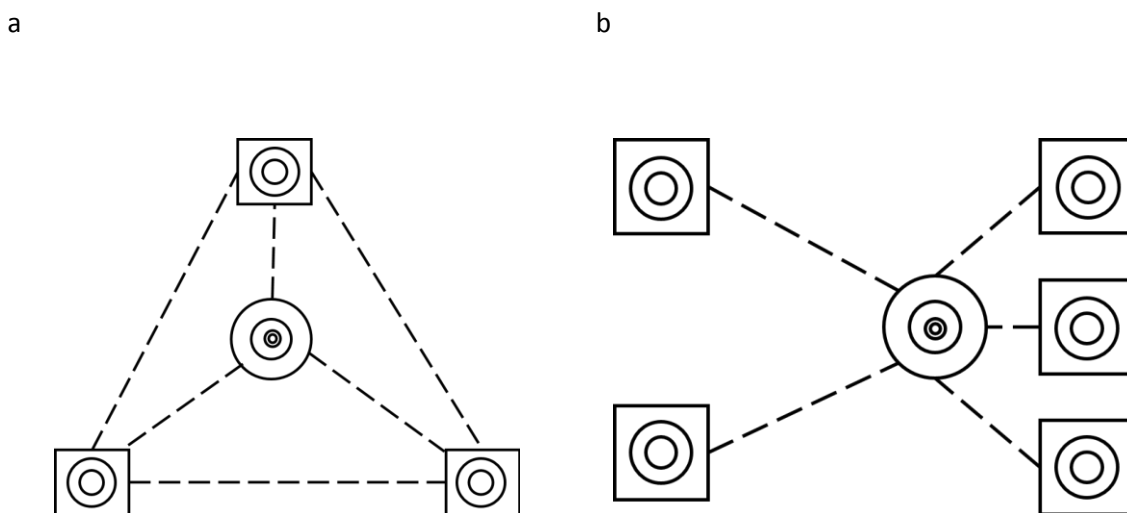
Una vez que se obtienen las distancias entre estaciones el software GLOBK estima las velocidades combinando la solución débilmente restringida con el IGS y la solución de Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) para todos los sitios medidos en el marco de referencia ITRF2008 (Herring et al., 2015c).

Finalmente, las velocidades de cada uno de los sitios de observación se estiman mediante un ajuste lineal de mínimos cuadrados a la variación temporal de las coordenadas para cada estación (González-Ortega et al., 2018).



### 3.3.1. Estabilización de la red GPS.

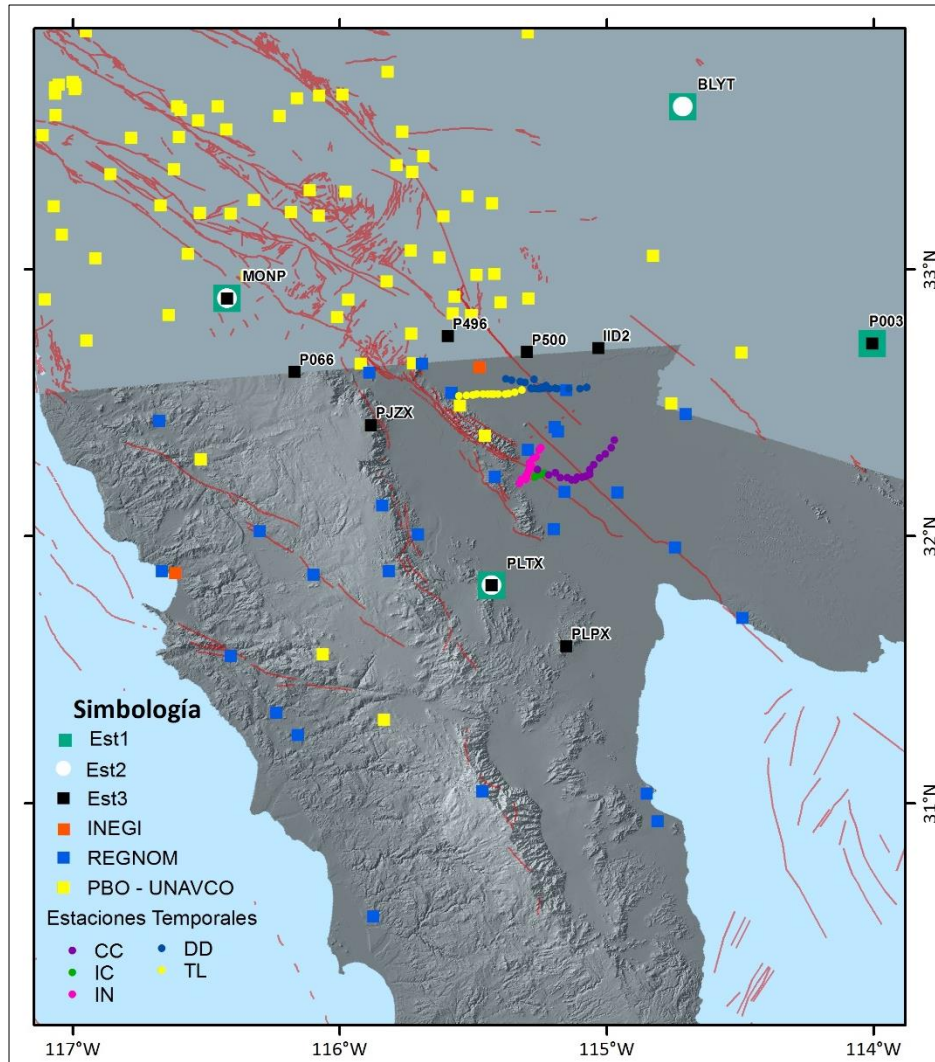
Estabilizar una red GPS se refiere a determinar el esquema geográfico de estaciones con mediciones permanentes que permitan la mejor solución de las posiciones, ya que de no tener un buen esquema de estaciones estabilizadoras los resultados obtenidos podrían presentar corrimiento o sesgo relacionado con la distribución geográfica de las estaciones GPS (Figura 15).



**Figura 15.** Estabilización de una red de estaciones geodésica. Los recuadros muestran estaciones permanentes utilizadas como estabilizadoras de una red y los círculos denotan estaciones temporales. a) Red de estaciones estabilizadoras con buena distribución, lo que permite una buena solución de la posición. b) red de estaciones estabilizadoras con una mala distribución, lo cual produce un sesgo en la posición de la estación temporal.

Para establecer la red de estaciones es la que mejor constriñe la precisión de las posiciones resultantes de cada punto de medición GPS se realizaron pruebas con tres diferentes esquemas de estabilización, para el primer esquema (Est1) se consideran tres estaciones, BLYT, MONP y PLTX, para el segundo (Est2) se consideran cuatro estaciones BLYT, MONP, PLTX y P003 y el tercero (Est3) incluye diez estaciones P003, BLYT, IID2, PLPX, P500, PLTX, P496, PJZX, P066 y MONP, las estaciones se no encuentran distribuidas uniformemente; se busca que las estaciones se encuentren ubicadas relativamente apartadas del área de estudio para que no sean afectadas por las condiciones

tectónicas locales, en la Figura 16 se muestra la ubicación geográfica de cada una de las estaciones mencionadas anteriormente.



**Figura 16.** Esquemas de estabilización. En el mapa se muestra la ubicación y nombre de las estaciones utilizadas en cada estabilización de la red GPS, Est1: BLYT, MONP y PLTX, Est2: BLYT, MONP, PLTX y P003, Est3: P003, BLYT, IID2, PLPX, P500, PLTX, P496, PJZX, P066 y MONP. También se muestra la ubicación de todas las estaciones continuas ubicadas en el norte de Baja California y sur de California, así como las estaciones de observación temporal utilizadas en este trabajo.

Como resultado de las estabilizaciones se obtuvieron valores de posición norte (N), este (E) y altura (H) para cada una de las estaciones GPS utilizadas y errores promedio. Para comparar los resultados, se toma como base los valores de Est1 y así observar el comportamiento de Est2 y Est3 con respecto a Est1. Los resultados de las estabilizaciones Est1 y Est2 en las posiciones de cada componente (N, E y H) no varían sustancialmente, mientras que para Est1 y Est3, Est3 presenta corrimiento preferencial hacia el este para la componente este de las estaciones temporales (Tabla 3). Las posiciones finales para cada estación se obtuvieron utilizando la estabilización Est2.

**Tabla 3.** Valores promedio de las diferentes estabilizaciones Est1, Est2 y Est3 para las componentes N, E y H.

REGNOM- NOTA	CONTINUAS					
	Est1-Est2			Est1-Est3		
	N (mm)	E (mm)	H (mm)	N (mm)	E (mm)	H (mm)
	0.1	0.2	0.3	0.2	0.8	1.1
	TEMPORALES					
	Cerro Prieto-Indiviso					
<b>CC</b>	0.4	0.6	0.9	0.5	1.5	1.2
<b>IN</b>	1.5	1.1	1.9	1.1	5.6	4.7
<b>IC</b>	2.2	2.6	5.2	1.0	22.4	8.2
	Imperial-Tulecheck					
<b>DD</b>	0.4	0.4	1.3	0.6	0.6	2.1
<b>TL</b>	3.6	2.4	3.5	4.3	32.5	16.6

Los sesgos más pronunciados están en las componentes este y altura, en el caso de la altura la diferencia entre las estabilizaciones se debe a que los receptores solo reciben señales de los satélites que se encuentran entre los 10° y 80° de inclinación, esto genera grandes incertidumbres desde la adquisición de los datos. Los sesgos en la componente este se deben a dos factores, 1) la distribución de las estaciones GPS estabilizadoras con respecto al resto de las estaciones GPS y 2) el número de muestreos realizados. Por ejemplo, en el caso de las estaciones continuas el sesgo para la componente este es de 0.6 mm entre estabilizaciones, esto se debe a la distribución geográfica de las estaciones estabilizadoras, para las estaciones que conforman el perfil CC y DD el sesgo en la componente este es de 0.9 mm y 0.2 mm respectivamente, al igual que para las estaciones continuas el sesgo se debe a la distribución geográfica de las estaciones estabilizadoras, mientras que para los

perfiles IN, IC y TL el sesgo se debe a la mala distribución de las estaciones estabilizadoras y al poco número de mediciones realizadas para estas estaciones, dando como resultado sesgos mayores al centímetro.

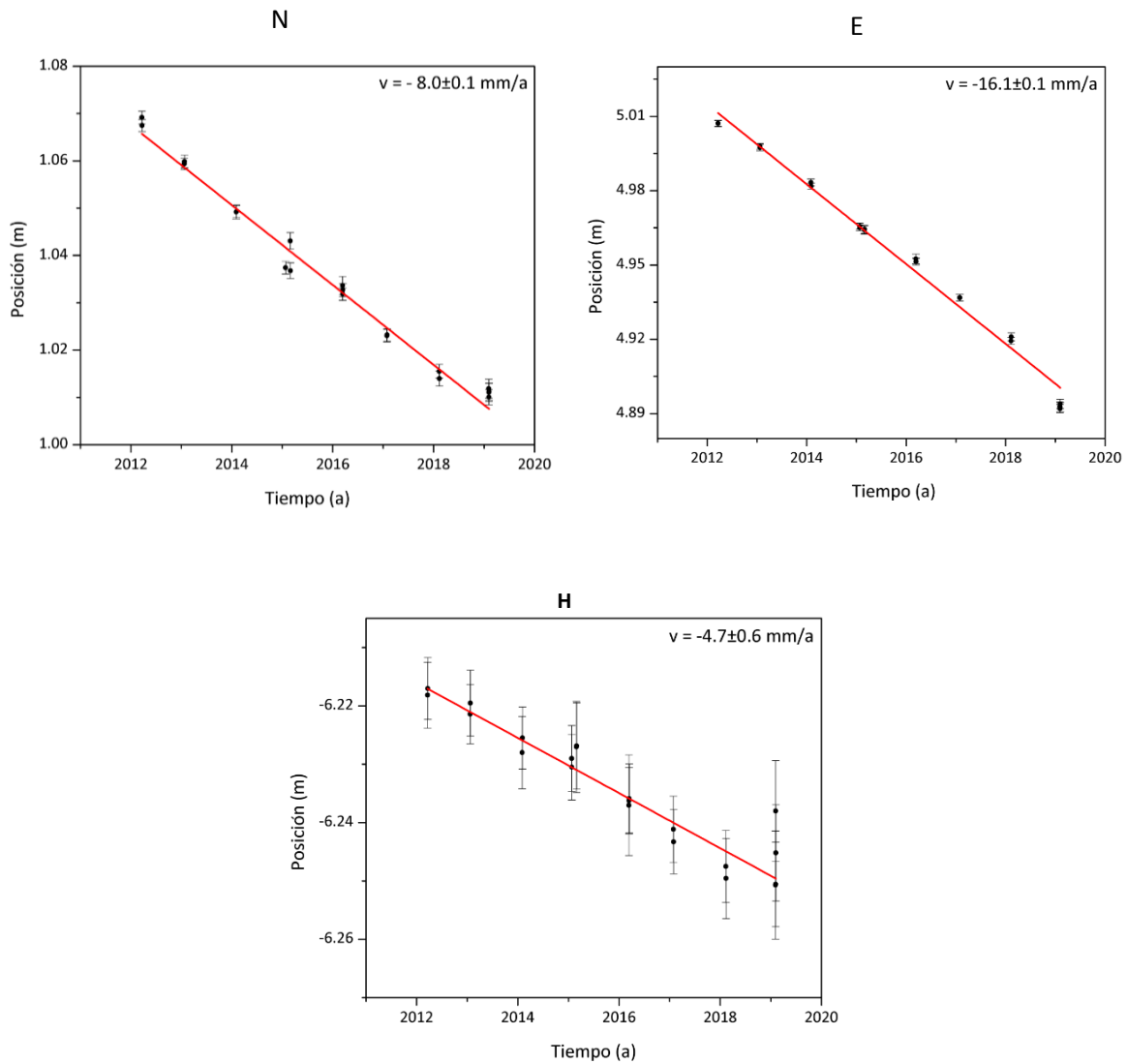
### 3.4. Estimación de las velocidades.

A las series de tiempo de posición de cada uno de las componentes horizontales (norte, este) y de altura de cada sitio de observación GPS temporal y permanente se les realiza un ajuste de regresión lineal con errores para obtener la velocidad de desplazamiento con,

$$P = I + Vt \quad (11)$$

Donde  $P$  es la posición (norte, este, altura),  $I$  es la intersección con el eje  $P$  al tiempo cero,  $V$  es la velocidad (norte, este, altura) y  $t$  es tiempo (años).

En la Figura 17 se observa los ajustes aplicados mediante la regresión lineal a las series de tiempo de 2011 a 2019 para los componentes horizontales y el vertical de la estación QUEX.



**Figura 17.** Ajuste mediante regresión lineal de la serie de posición en sus tres componentes N, E y H, para la estación QUEx.

A la par del cálculo de las velocidades se estima la desviación estándar ( $S_{b1}$ ) para cada componente da cada uno de los puntos de observación.

$$S_{b1} = \frac{s}{\sqrt{\sum(x_i - x)^2}} \quad (12)$$

Donde  $s$  se refiere al error estándar del ajuste mediante la regresión lineal simple,  $x_i$  es el valor de la variable independiente en la  $i$ -ésima observación y  $x$  es el valor de la variable independiente inicial.

Para estimar la incertidumbre de la posición ( $b_i$ ) de las estaciones con más de tres observaciones se multiplica la desviación estándar ( $Sb_i$ ) con los valores de la significancia ( $t$ ) obtenidos de la tabla  $t$  de Student de acuerdo con el grado de libertad que le corresponde a cada sitio de observación (ecuación 13). La confianza de los ajustes a los datos en los componentes horizontales se encuentra en los  $\pm 2$  mm/año para sitios de observación GPS temporal y  $\pm 1$  mm/año para sitios permanentes, mientras que en la componente de altura es  $\pm 5$  mm/año en sitios temporales y  $\pm 3$  mm/año permanentes.

$$b_1 \pm sb_1 t \quad (13)$$

Para las estaciones con tres observaciones se emplea la ecuación (14) tomada de Crowell, et al., (2013).

$$\sigma_{N,E} = \sqrt{\frac{\sigma_{N1,E1}^2 + \sigma_{N2,E2}^2}{t}} \quad (14)$$

Donde  $\sigma_{N,E}$  son las incertidumbres de velocidad,  $\sigma_{N1,E1}^2$  y  $\sigma_{N2,E2}^2$  son las incertidumbres posicionales individuales, y  $t$  es el tiempo entre observaciones en años (Lyons, 2002; Crowell et al., 2013).

### 3.4.1. Proyección de las velocidades al rumbo de la falla y cálculo de incertidumbre.

Considerando que las velocidades obtenidas de la sección anterior se encuentran en un plano coordenado norte-sur y este-oeste y que las fallas no siguen esta condición es necesario proyectar los vectores de velocidad hacia la dirección o rumbo de las fallas. Para proyectar las velocidades se

utiliza la ecuación 15 la cual es una matriz de rotación en dos dimensiones. Como resultado, se obtiene la velocidad paralela y velocidad perpendicular a la falla.

$$\begin{bmatrix} v_{\parallel} \\ v_{\perp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_n \\ v_e \end{bmatrix} \quad (15)$$

Donde  $v_{\parallel}$  es la velocidad paralela a la falla,  $v_{\perp}$  es la velocidad perpendicular a la falla,  $v_n$  es la velocidad norte,  $v_e$  es la velocidad este y  $\theta$  se refiere al ángulo de rotación o rumbo de la falla al cual se proyecta la velocidad.

$$v_{\parallel} = \cos \theta v_n - \sin \theta v_e \quad (16)$$

$$v_{\perp} = \sin \theta v_n + \cos \theta v_e \quad (17)$$

Los errores asociados a las velocidades paralela y perpendicular a la falla se obtuvieron mediante la propagación de errores (Ku, 1966) de la ecuación (18), considerando errores en las velocidades norte y este, así como en el ángulo o rumbo de la falla.

$$\delta v_{\parallel} = -v_e \sin \theta \delta \theta + \delta v_e \cos \theta - [v_n \cos \theta \delta \theta + \delta v_n \sin \theta] \quad (18)$$

$$\delta v_{\perp} = v_e \cos \theta \delta \theta + \delta v_e \sin \theta + [v_n \sin \theta \delta \theta - \delta v_n \cos \theta] \quad (19)$$

Los errores resultantes para la componente paralela y perpendicular de las estaciones continuas es 1 mm/año, para las estaciones temporales con 4 o más mediciones es hasta 3 mm/año y para las estaciones temporales con menos de 4 mediciones hasta 4 mm/año. Cabe mencionar que se utilizan únicamente las velocidades paralelas a la falla ya que estas velocidades describen la cinemática transcurrente de las fallas analizadas.

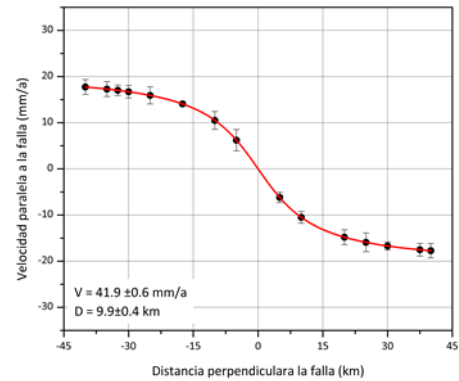
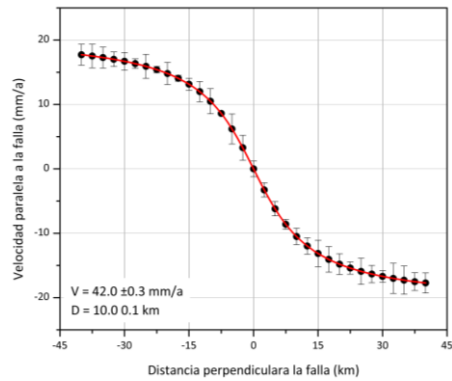
#### **4.5. Modelado directo del modelo de dislocación en un semiespacio homogéneo.**

Todos los modelos matemáticos representan de forma confiable el fenómeno físico para el cual fueron propuestos, esto sí todos los parámetros a considerar son ideales, por el contrario si las condiciones no son las esperadas por el modelo se pueden presentar sesgos o errores en los resultados. Para conocer las bondades de ajuste al modelo de dislocación se realiza el modelado directo de la ecuación (4) (generación de datos sintéticos) para conocer la influencia de cada uno de los parámetros en el modelo y sus limitaciones en el modelado inverso.

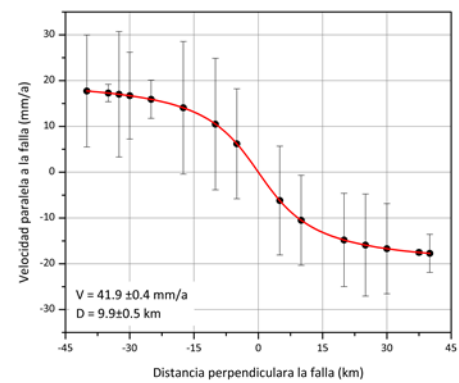
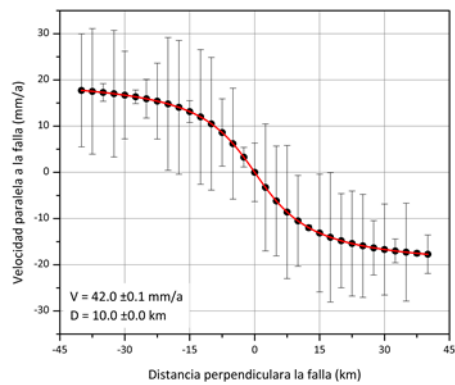
En la Figura 18 se muestran los resultados del modelado de datos sintéticos en los que se consideró una falla vertical con una profundidad de bloqueo de 10 km, los datos se distribuyeron con una separación de 2.5 km entre sí abarcando perpendicularmente 40 km de cada lado de la falla, además se tomaron en consideración errores de 3, 5 y 10 mm para cada dato. Los resultados de la inversión muestran que el modelo de dislocación es robusto en cuanto a la poca influencia que tienen la cantidad y distribución de datos y los errores asociados a estos.



a



b

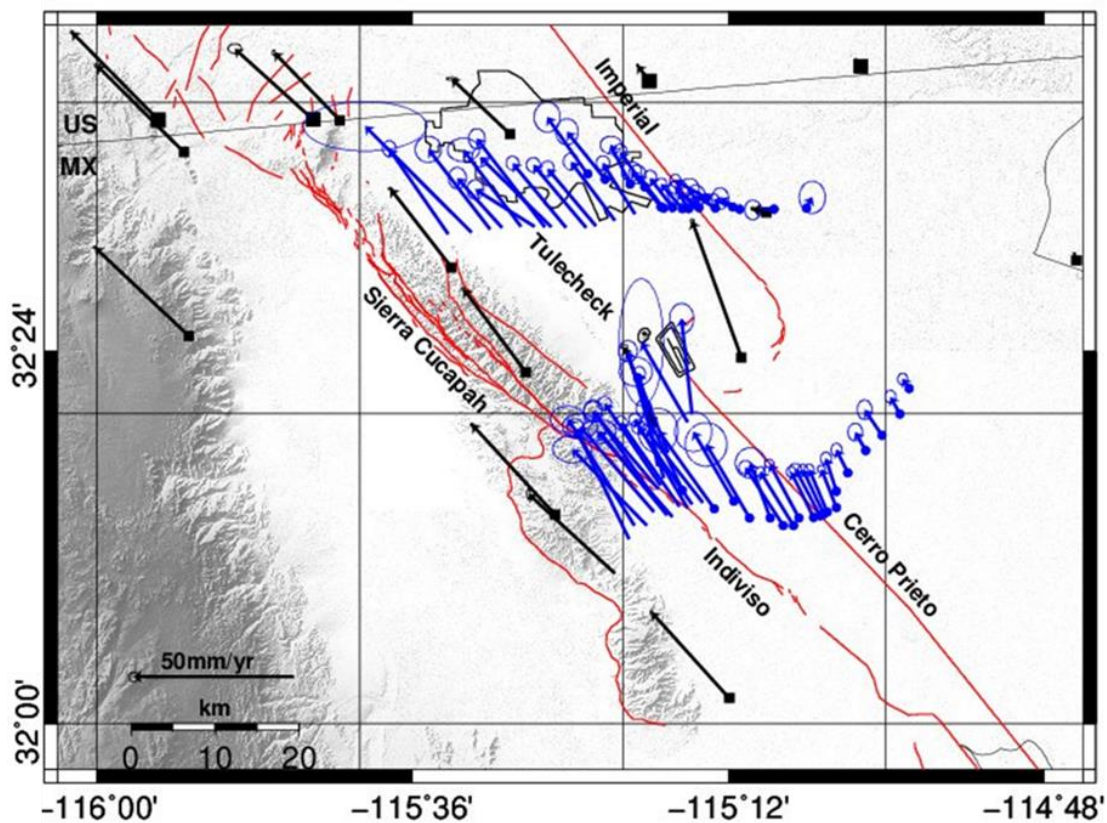


**Figura 18.** Resultados del modelado de datos sintéticos. a) Resultado de la inversión de datos sintéticos con errores de hasta 3 mm; del lado izquierdo de la figura se muestra el ajuste con datos cada 2.5 km y del lado derecho el ajuste con menor número de datos y distribuidos azarosamente. b) Resultado de la inversión de datos sintéticos con errores de hasta 15 mm; del lado izquierdo de la figura se muestra el ajuste con datos cada 2.5 km y del lado derecho el ajuste con menor número de datos y distribuidos al azar.

## Capítulo 4. Resultados.

### 4.1. Campo de velocidades y relajación posísmica.

Con los valores de los componentes norte (N) y este (E) y sus respectivas incertidumbres se calcularon los vectores de velocidad para cada una de las estaciones con lo cual se construyó el campo de velocidades de la región. El campo de velocidades obtenido se encuentra dado en el Marco de referencia estable de América del Norte (SNARF; Blewitt et al., 2005) por lo que los vectores de velocidad localizados sobre la placa norteamericana tienden a cero mientras que los vectores localizados en la placa pacífico muestran el movimiento relativo de esta placa con respecto a la otra (Figura 19).



**Figura 19.** Mapa de velocidades proyectadas en SNARF. Los vectores en color negro corresponden a las velocidades de estaciones permanentes y los de color azul a las estaciones temporales.

Las velocidades norte y este, así como sus respectivos errores estimados se muestran en la Tabla 4. Los valores de la tabla están en el marco de referencia ITRF2008, las velocidades proyectadas en el mapa mostrado en la Figura 18 están dadas en SNARF. La transformación de velocidades en ITRF2008 a SNARF consiste en sumar o restar la influencia que tiene la rotación de la placa norteamericana sobre las velocidades de cada una de las estaciones GPS.

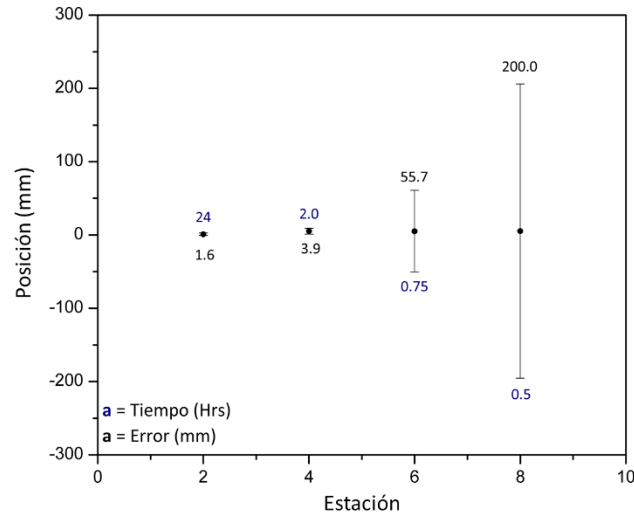
**Tabla 4.** Velocidades norte y este con sus respectivas incertidumbres utilizadas para construir el campo de velocidades de la región del Valle de Mexicali. Las velocidades se encuentran en ITRF2008.

Estacion	vN	$\sigma$ N	vE	$\sigma$ E
CCS1	-6.6	1.2	-14.3	1.0
CCS2	-4.2	1.3	-15.2	1.1
CCS3	-1.6	2.0	-17.7	1.5
CC04	-3.9	1.8	-15.5	1.5
CC05	-2.4	1.3	-15.8	1.1
CC06	0.6	1.3	-15.5	1.1
CC07	2.4	0.8	-16.9	0.8
CC08	3.6	1.0	-17.8	1.0
CC09	4.2	1.0	-18.8	1.0
CC10	4.9	1.2	-19.9	1.2
CC11	4.5	1.1	-19.2	1.0
CC12	7.2	0.9	-21.3	0.9
CC13	7.0	1.1	-22.5	1.0
CC14	8.5	1.4	-24.0	1.4
CC15	7.5	3.1	-18.4	3.1
CC16	11.1	9.6	-19.2	7.9
CC17	8.8	17.3	-17.4	15.1
CC18	15.2	9.2	-16.4	7.9
CC19	15.6	1.9	-24.1	1.6
CN16	13.3	4.5	-25.7	4.3
CN17	11.9	4.1	-24.8	3.8
CN18	14.6	4.6	-29.6	4.1
DAEX	18.3	0.3	-38.1	0.3
IID2	-7.6	0.2	-13.9	0.2
MEXI	7.5	0.3	-30.5	0.3
PUAS	15.0	1.1	-39.1	1.1
PLTX	19.7	0.2	-39.5	0.2
P796	-7.4	0.2	-12.8	0.2
PALX	20.1	0.2	-42.3	0.2

P500	-4.8	0.2	-16.0	0.2
P496	9.2	0.3	-29.3	0.3
P494	10.6	0.3	-34.3	0.3
PBX1	11.2	0.6	-32.7	0.6
PBX2	17.1	0.4	-39.3	0.4
PHJX	14.7	0.3	-31.3	0.3
PJZX	17.6	0.2	-41.4	0.2
YUMX	16.9	0.3	-36.2	0.3
NAYX	13.7	0.4	-21.1	0.7
PTAX	16.1	0.3	-31.6	0.3
QUEX	-8.5	0.3	-16.1	0.3
NVLX	32.9	0.4	-27.6	0.4
YUHG	17.4	0.7	-39.2	0.7
SGLG	12.2	2.5	-36.7	3.6
DD01	-6.4	3.3	-10.5	2.7
DD02	-9.9	2.0	-18.9	1.7
DD03	-6.4	2.2	-18.3	1.7
DD04	-7.4	1.2	-18.2	1.1
DD05	-5.9	2.3	-18.4	1.9
DD06	-4.4	1.3	-22.1	1.1
DD07	-3.8	2.1	-15.2	1.9
DD08	-4.4	1.3	-18.2	1.2
DD09	-4.6	2.5	-15.6	2.2
DD10	-2.0	1.2	-18.9	1.2
DD11	-0.5	1.5	-19.2	1.4
DD12	0.7	1.9	-20.5	1.8
DD13	1.4	2.0	-21.6	2.1
DD14	1.3	1.5	-20.0	1.5
DD15	2.5	1.8	-18.3	2.2
DD16	5.1	2.7	-24.2	2.3
DD17	8.0	3.1	-24.8	2.7
TL01	16.8	1.6	-30.7	1.4
TL02	23.3	5.1	-45.4	12.7
TL03	15.2	2.7	-31.5	2.7
TL04	5.7	2.2	-26.2	1.8
TL05	14.1	2.4	-30.2	3.3
TL06	1.8	2.0	-30.7	1.7
TL07	17.8	2.1	-33.5	1.7
TL08	12.1	2.0	-34.5	1.7
TL09	10.3	1.4	-28.9	1.3
TL10	9.8	1.5	-28.7	1.4

TL11	8.1	1.6	-27.3	1.4
TL12	8.6	1.7	-26.0	1.5
TL13	6.1	1.5	-22.3	1.4
IC01	12.8	1.2	-29.8	1.2
IC02	14.5	1.5	-28.9	1.4
IC03	17.9	1.3	-28.6	1.3
IC04	16.4	1.4	-30.4	1.3
IC05	20.9	2.0	-32.8	1.8
IC06	17.0	2.0	-35.7	1.7
IN01	20.1	3.1	-15.5	2.5
IN02	15.2	13.1	-26.6	4.6
IN03	2.5	1.5	-23.5	1.5
IN04	15.5	3.0	-22.3	3.4
IN05	19.3	1.4	-18.0	1.2
IN06	29.9	2.2	-23.4	1.9
IN07	15.8	1.4	-29.6	1.3
IN08	14.4	2.1	-32.6	2.0
IN09	17.5	2.1	-31.3	1.9
IN10	16.9	2.6	-35.3	3.6
IN11	16.4	2.5	-33.4	3.6
IN12	15.9	2.0	-36.6	2.2
IN13	14.1	2.8	-35.5	4.0
IN14	23.4	2.7	-32.9	3.6
IN15	24.9	1.9	-28.9	1.7

Los errores asociados a las mediciones GPS de las estaciones temporales con respecto a las continuas varían en función del tiempo de medición. Por ejemplo, observaciones menores a 2 horas tienen errores considerablemente altos, de varios centímetros (20 cm); pero al aumentar el tiempo de observación los errores obtenidos son de algunos cuantos milímetros (4 mm). Al comparar los errores para cada una de las estaciones temporales con respecto al tiempo que fueron medidas, se necesita un mínimo de 2 horas de medición para que los errores se encuentren por debajo del centímetro (Figura 20).



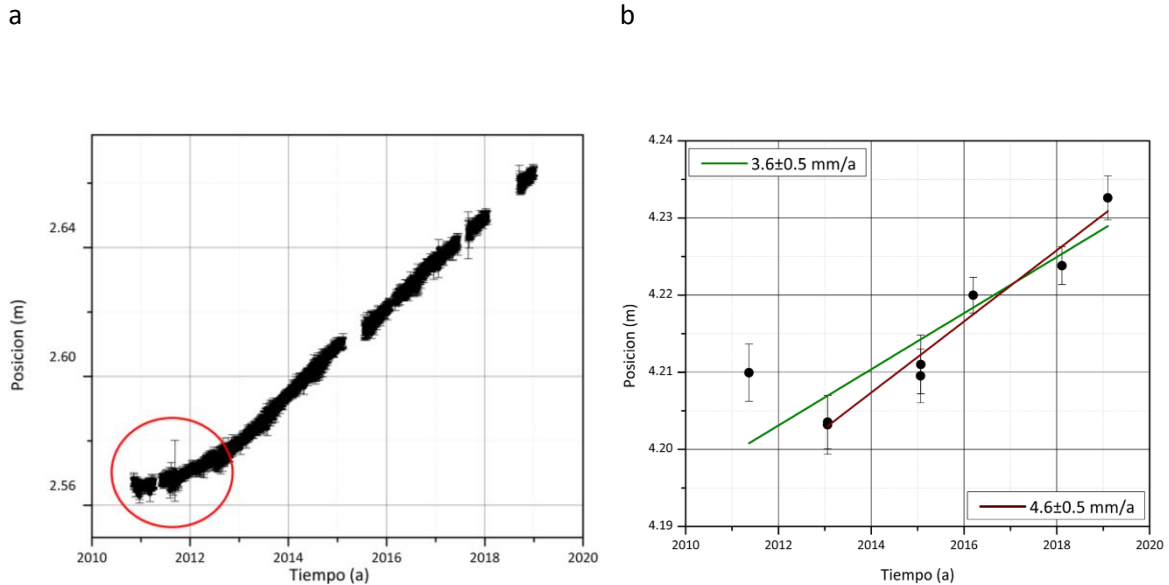
**Figura 20.** Errores de posición para la componente norte con respecto al tiempo de observación. Los números en color negro muestran el tiempo de medición en horas para diversas estaciones GPS y los números en color azul muestran el error asociado.

Al analizar las series de tiempo de cada estación GPS, las posiciones no siguen una tendencia lineal durante todo el periodo de observación (2011-2019). En las estaciones temporales más cercanas a la traza de falla del perfil Cerro Prieto-Indiviso, se observa un cambio de tendencia en la pendiente de las series de tiempo, esta variación podría estar relacionada con la relajación posísmica de la región debido al sismo EMC de 2010. Para el perfil Imperial-Sierra Cucapah-Laguna Salada no se presentan dichos cambios, esto puede deberse a que las mediciones de este perfil se iniciaron a principios del año 2012.

Para determinar si las tasas de deslizamiento están influenciadas por la relajación posísmica del EMC, se analizaron las series de tiempo de estaciones permanentes con datos de 2011 al 2019 de las estaciones localizadas en la cercanía a la zona de ruptura del EMC. En estas estaciones, se observa un cambio de la tendencia lineal en la velocidad durante 2010-2011 (Figura 21), ello sugiere que el campo cercano aun presenta relajación posísmica durante los primeros dos años posteriores al sismo EMC (González-Ortega et al., 2014).

Cabe mencionar que las campañas de medición para el perfil Cerro Prieto-Indiviso se iniciaron a partir del año 2011 (Tabla 2), por cual se omitió esta observación para la estimación de las

velocidades donde claramente presentan una tendencia lineal a partir del año 2013 como se muestra en la Figura 21.



**Figura 21.** a) Serie de tiempo de la componente norte de la estación permanente NAYX. El círculo en color rojo indica la relajación posísmica del sismo El Mayor-Cucapah. b). Ajustes de la serie de tiempo de la componente norte de estación temporal CC08. Se muestran las velocidades considerando la relajación posísmica (línea color verde) y sin considerar la relajación posísmica (línea color rojo) a partir del 2013.

La Tabla 5 muestra las velocidades estimadas para el periodo de 2011-2019 (con relajación posísmica) y 2013-2019 (sin relajación posísmica) de los sitios de observación del perfil de la falla Cerro Prieto-Indiviso. En promedio se obtiene una diferencia de 0.6 mm/año. Este valor, como veremos más adelante, no afecta significativamente las tasas de deslizamiento obtenidas con o sin relajación posísmica de campo cercano; se utiliza la ecuación (13) de proyección de velocidades para mostrar dicho efecto de relajación.

**Tabla 5.** Velocidades estimadas con y sin relajación posísmica para las estaciones del perfil Cerro Prieto-Indiviso.

Estación	2011-2019		2013-2019		Diferencia entre Velocidades (mm/año)
	Velocidad Paralela (mm/año)	$\sigma$	Velocidad paralela(mm/año)	$\sigma$	
CCS1	3.6	1.6	4.0	2.1	0.4
CCS2	5.9	1.8	5.9	2.0	0.0
CCS3	9.5	2.6	9.5	3.1	0.0
CC04	6.4	2.5	7.7	3.5	1.3
CC05	7.7	1.8	7.9	2.3	0.3
CC06	9.6	1.8	9.9	2.6	0.3
CC07	11.8	1.3	12.8	1.7	1.0
CC08	13.3	1.7	14.7	2.1	1.3
CC09	14.5	1.7	15.2	2.0	0.7
CC10	15.7	2.0	16.5	2.4	0.8
CC11	15.0	1.8	15.9	2.3	0.9
CC12	18.4	1.6	18.9	1.8	0.6
CC13	19.1	1.8	19.1	2.0	0.0
CC14	21.2	2.3	21.3	2.6	0.1
PUAS	36.5	1.6	35.0	4.5	1.6
P796	1.9	0.3	2.9	0.5	1.0
DAEX	38.2	1.1	38.0	1.2	0.2
PLTX	40.2	1.6	40.0	0.9	0.2
YUMX	35.8	1.0	35.8	1.1	0.1
NAYX	22.8	1.2	23.6	3.8	0.8

## 4.2. Gradientes de velocidad a través de las fallas.

Ahora bien, utilizando el campo de velocidades de la sección anterior, se obtienen las velocidades paralelas a las fallas, esto, rotando los vectores de velocidad en la dirección rumbo  $\sim 43^\circ$  hacia el oeste a partir del norte geográfico (Frez y González, 1991; Mueller y Rockwell, 1991; Cruz-Castillo, 2002). El cálculo de las velocidades paralelas a la falla de cada una de las estaciones GPS se realizó mediante el uso de la ecuación (16). En la Tabla 6 se muestra las velocidades paralelas con sus respectivas incertidumbres para cada uno de los puntos que conforman los perfiles de medición GPS de las fallas estudiadas.



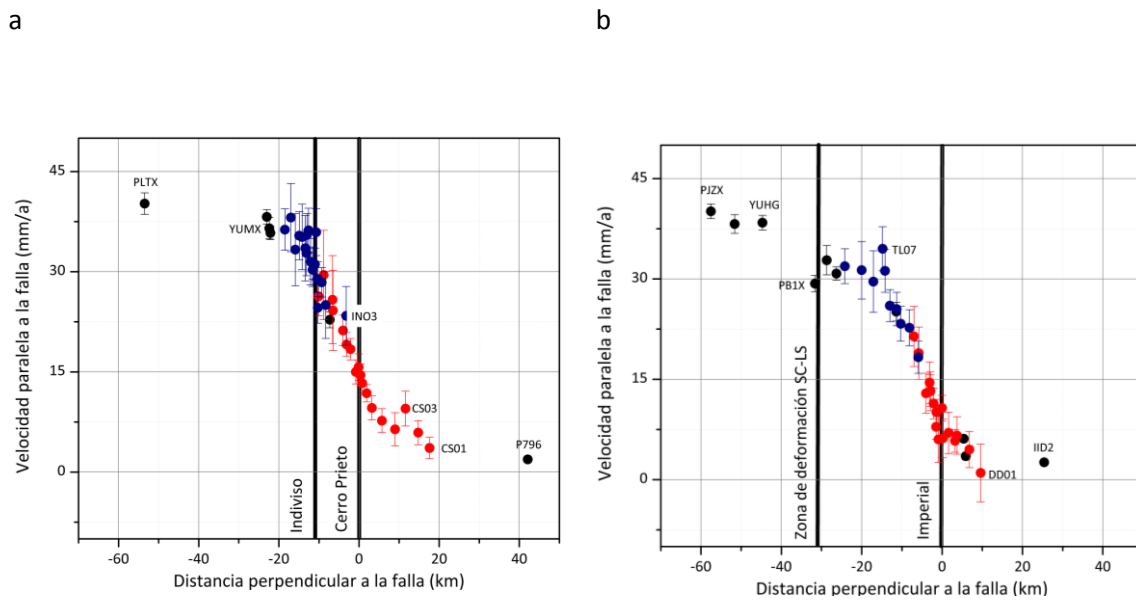
**Tabla 6.** Velocidades paralelas y perpendiculares a las principales fallas del Valle de Mexicali: Imperial y Cerro Prieto. \* Distancia de la estación al trazo de la falla.

Cerro Prieto-Indiviso				Imperial-Sierra Cucapah-Laguna Salada			
Estación	Distancia (km)	$v_{\parallel}$ (mm/año)	$\sigma_{\parallel}$ (mm/año)	Estación	Distancia (km)	$v_{\parallel}$ (mm/año)	$\sigma_{\parallel}$ (mm/año)
CCS1	17.63	3.6	1.6	DD01	-4.39	1	4.3
CCS2	14.8	5.9	1.8	DD02	-1.56	4.5	2.7
CCS3	11.58	9.5	2.6	DD03	1.53	6.6	2.8
CC04	8.99	6.4	2.5	DD04	2.01	5.8	1.7
CC05	5.69	7.7	1.8	DD05	3.64	7	3.1
CC06	3.24	9.6	1.8	DD06	5.18	10.7	1.9
CC07	1.93	11.8	1.3	DD07	5.04	6.2	2.9
CC08	0.81	13.3	1.7	DD08	6.68	7.9	1.9
CC09	0.38	14.5	1.7	DD09	6.12	6	3.4
CC10	-0.11	15.7	2	DD10	6.61	10.1	1.9
CC11	-0.75	15	1.8	DD11	7.32	11.4	2.3
CC12	-2.06	18.4	1.6	DD12	8.11	13.2	2.9
CC13	-3.12	19.1	1.8	DD13	8.27	14.5	3.1
CC14	-4.01	21.2	2.3	DD14	8.14	13.3	2.4
CC15	-4.65	16.5	4.6	DD15	9.21	12.9	3
CC19	-10.07	26.3	2.9	DD16	10.98	18.9	3.9
CN16	-6.59	25.8	6.6	DD17	12.22	21.4	4.5
CN17	-6.45	24.2	6	TL01	29.37	31.9	2.6
CN18	-8.78	29.5	6.7	TL02	27.06	46.8	13.4
IC01	-9.27	28.4	2.2	TL03	25.15	31.3	4.3
IC02	-10.34	28.9	2.6	TL04	23.91	20.8	3.2
IC03	-11.01	31.1	2.4	TL05	22.28	29.6	4.6
IC04	-11.62	31.3	2.4	TL06	20.97	21.2	3
IC05	-12.64	36.2	3.3	TL07	20.01	34.5	3.3
IC06	-13.02	35.5	3.2	TL08	19.41	31.2	3.2
IN01	-3.21	23.4	4.4	TL09	18.15	26	2.4
IN02	-4.25	27.8	13	TL10	16.47	25.5	2.5
IN03	-7.03	16.6	2.4	TL11	15.47	23.3	2.6
IN04	-8.31	25	5	TL12	13.34	22.7	2.7
IN05	-10.29	24.6	2.3	TL13	11.05	18.3	2.4
IN06	-10.73	35.9	3.5	QUEX	-0.69	3.5	0.5
IN07	-11.57	30.3	2.5	IID2	-20.16	2.6	0.4
IN08	-12.05	31.5	3.5	PB1X	36.79	29.3	1.2
IN09	-13.06	32.8	3.4	PB2X	56.8	38.2	1.4
IN10	-14.21	35.2	4.9	MEXI	16.57	25.1	1.4

IN11	-13.37	33.5	4.9	PHJX	31.49	30.8	1
IN12	-14.85	35.4	3.6	PJZX	62.68	40.1	1.1
IN13	-15.9	33.3	5.4	P500	-0.17	6.1	0.4
IN14	-16.99	38.1	5.1	YUGH	49.9	38.4	1.1
IN15	-18.51	36.3	3.1	SGLG	33.9	32.8	2.2
PUAS	-22.44	36.5	1.6	P496	27.6	25.5	0.8
P796	42.14	1.9	0.3				
DAEX	-23	38.2	1.1				
PLTX	-53.51	40.2	1.6				
YUMX	-22.14	35.8	1				
NAYX	-7.25	22.8	1.2				

Con las velocidades paralelas se obtienen los gradientes de velocidad para las fallas Cerro Prieto-Indiviso (CP-In) e Imperial – Sierra Cucapah - Laguna Salada (Im-SC-LG), como se muestran en la Figura 22. Los gradientes de velocidad de cada perfil indican que la velocidad distribuida es de ~35 mm/año, en una distancia de 40 km alrededor de la falla Cerro Prieto y ~30 mm/año en 40 km para la falla Imperial.

Para representar de manera porcentual la distribución espacial de la velocidad en las fallas del Valle de Mexicali, se considera a la estación CIC1 (Ensenada), en el extremo oeste de la península de Baja California con velocidad de ~42 mm/año representa el 100% del movimiento de la Placa Pacífico con respecto a la Placa Norteamérica, entonces la región donde se encuentran las fallas Cerro Prieto e Indiviso absorben el ~84% del total de la velocidad distribuida hasta Ensenada y ~72%, para el caso de la región de la falla Imperial-Sierra Cucapah-Laguna Salada. Dichos valores reflejan de manera general, la cantidad de deformación que es absorbida solo en el Valle de Mexicali respecto al movimiento relativo entre las Placas Pacífico y Norteamérica.



**Figura 22.** Gradientes de velocidad paralela a las fallas Cerro Prieto-Indiviso (CP-In) e Imperial-Sierra Cucapah-Laguna Salada (Im-SC-LG). a) Gradiente de velocidad para el perfil CP-In. b) Gradiente de velocidad para el perfil Im-SC-LG. Los círculos en color negro indican la velocidad de las estaciones permanentes. Los círculos en rojo indican la velocidad de las estaciones con mediciones de 2013 a 2019 para el perfil CP-In y de 2012 a 2019 para el perfil Im-SC-LS y los círculos en color azul, la velocidad de estaciones con observaciones de 2016 a 2019.

### 4.3. Inversión del modelo de dislocación en un semiespacio homogéneo.

Para la estimación de las tasas de deslizamiento y la profundidad de bloqueo en cada falla, se utilizan las velocidades paralelas dentro de un esquema de inversión que emplea el algoritmo de Levenberg-Marquardt (L-M); este algoritmo puede resolver de manera simultánea la tasa de deslizamiento y la profundidad de bloqueo (Smith-Konter et al., 2011). También, para corroborar que los valores de las tasas de deslizamiento fueron los mejores estimados por el modelo de acuerdo al ajuste de chi cuadrada (prueba estadística que indica hasta qué punto los valores observados se apartan significativamente o no de los valores esperados), se realizaron 10 inversiones de los datos para cada gradiente de velocidad, variando los parámetros  $V$  y  $D$  de la ecuación 5 y la constante de integración ( $C$ ) del algoritmo de inversión. Para realizar la inversión se utilizó el programa OriginLab que ya tiene integrado el algoritmo L-M.

A continuación, se describe de manera individual los resultados obtenidos para la inversión de los gradientes de velocidad CP-In e Im-SC-LG.

#### 4.3.1. Tasa de deslizamiento y profundidad de bloqueo en Cerro Prieto – Indiviso.

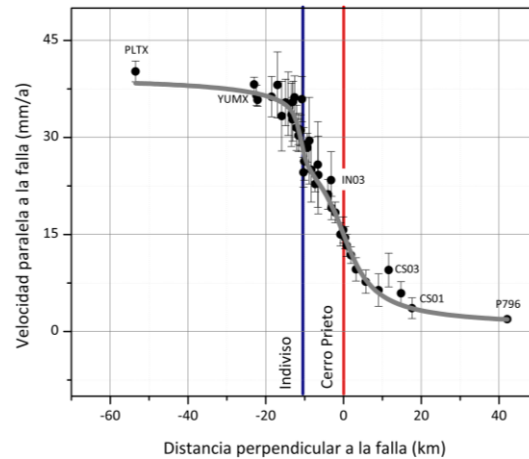
Dentro del modelo de inversión utilizado en este caso, se considera que los valores de los datos del gradiente de velocidad Cerro Prieto-Indiviso son el resultado de dos fallas verticales las cuales tienen una separación de 11.8 km. Las profundidades de bloqueo se fijaron desde 1 km hasta los 10 km, para estimar la variación de las tasas de deslizamiento y obtener los parámetros del modelo que mejor ajustan los datos. Las fallas que componen el gradiente de velocidad Cerro Prieto-Indiviso se consideraron verticales debido a que la sección atravesada perpendicularmente por el perfil de levantamiento GPS no muestra algún indicio de presentar ángulo de echado (González-Ortega et al., 2014; Huang et al., 2016). En la Tabla 7 se muestran los valores de profundidad de bloqueo, tasa de deslizamiento, errores asociados y el análisis estadístico resultado de la modelación.

**Tabla 7.** Resultados de la inversión para las tasas de deslizamiento empleado el modelo de dislocación en un semiespacio elástico y homogéneo. \*Profundidad de bloqueo y tasa de deslizamiento resuelta de manera simultánea.

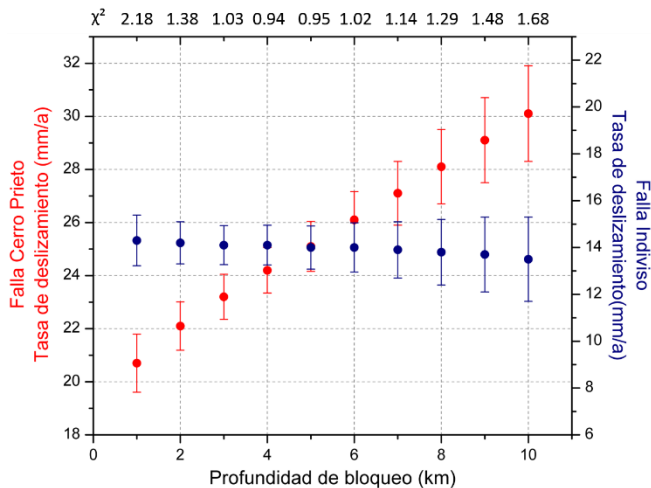
D (Km)	Cerro Prieto		Indiviso		Análisis estadístico
	V (mm/año)	$\sigma$ (mm/año)	V(mm/año)	$\sigma$ (mm/año)	$\chi^2$
1.0	20.7	1.1	14.3	1.1	2.2
2.0	22.1	0.9	14.2	0.9	1.3
3.0	23.2	0.9	14.1	0.8	1.0
4.0	24.2	0.9	14.1	0.9	0.9
5.0	25.1	0.9	14.0	0.9	1.0
6.0	26.1	1.1	14.0	1.1	1.0
5.9±0.7*	28.2	1.2	10.7	0.9	0.9
7.0	27.1	1.2	13.9	1.2	1.1
8.0	28.1	1.4	13.8	1.4	1.3
9.0	29.1	1.6	13.7	1.6	1.5
10.0	30.1	1.8	13.5	1.8	1.7

De acuerdo con la Tabla 7, el mejor ajuste de los datos ocurre a profundidad de  $5.8 \pm 0.7$  km y tasa de deslizamiento para la falla Cerro Prieto de  $28.2 \pm 1.2$  mm/año y para la falla Indiviso de  $10.7 \pm 0.9$  mm/año (Figura 23a). En el modelado de los datos se puede apreciar que la tasa de deslizamiento es sensible a la variación de la profundidad de bloqueo, esto para el caso de la falla principal (Cerro Prieto) mientras que para la falla secundaria (Indiviso) no tiene sensibilidad (Figura 23b).

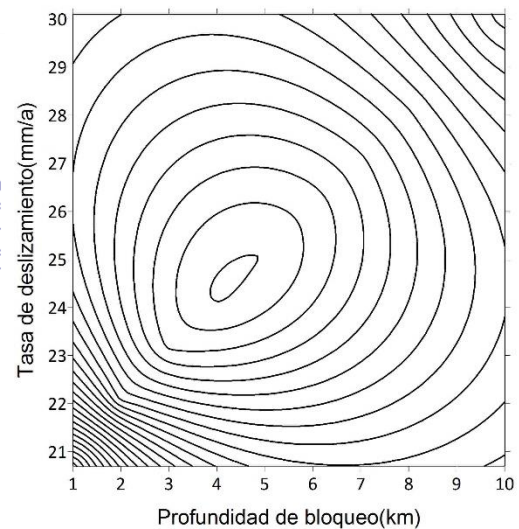
a



b

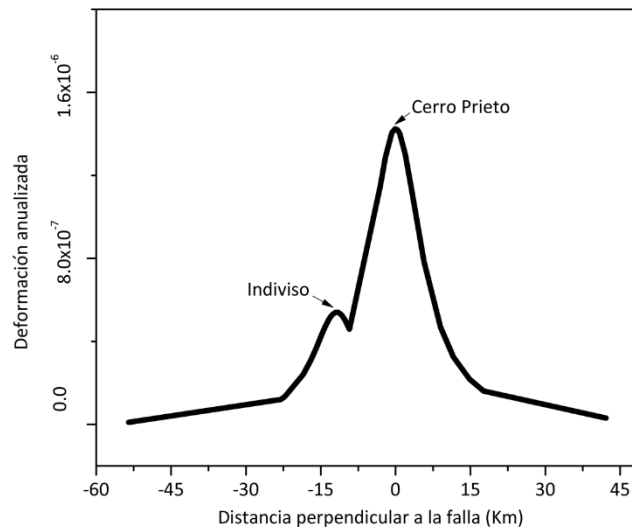


c



**Figura 23.** a) Mejor ajuste de tasa de deslizamiento y profundidad de bloqueo resueltos de manera simultánea. b) Sensibilidad de la tasa de deslizamiento con respecto a la profundidad de bloqueo. c) Curvas de nivel de Chi-cuadrado para las variaciones de la tasa de deslizamiento y profundidad de bloqueo.

Utilizando la tasa de deslizamiento es posible conocer la tasa de deformación presente en cada una de las fallas, tal como lo describe la ecuación (4). En la Figura 24 se observa la distribución de la deformación en cada una de las fallas; los valores más altos de deformación son: para la falla Cerro Prieto  $1.42 \times 10^{-6}$  la tasa de deformación es de y para la falla Indiviso es de  $5.40 \times 10^{-7}$ .

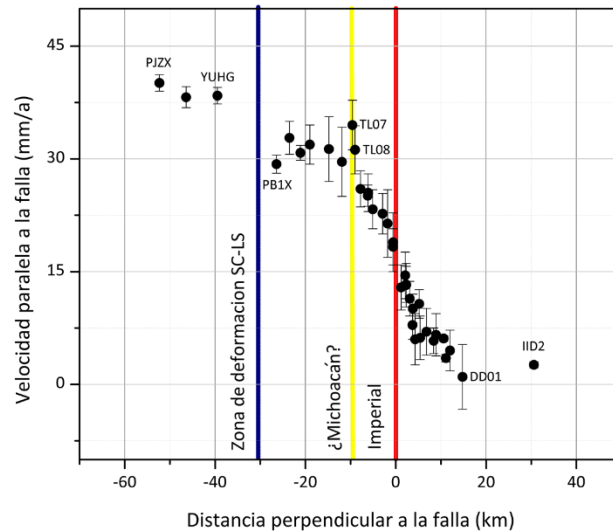


**Figura 24.** Curva de deformación en la falla para las fallas Cerro Prieto e Indiviso.

#### 4.3.2. Tasas de deslizamiento y profundidad de bloqueo en Imperial-Sierra Cucapah-Laguna Salada.

En un principio se propuso modelar la falla Tulecheck/Michoacán en conjunto con la falla Imperial pero por inconvenientes descritos a continuación, se tomó la decisión de no modelar la presencia de una falla en la zona donde se encuentren las fallas Tulecheck/Michoacán, en cambio se modela la zona de deformación SC-LS. Como se puede observar en el perfil Imperial (Im)-Zona de deformación Sierra Cucapah (SC)-Laguna Salada (LG), los datos GPS de los puntos TL07 y TL08 muestran lo que al parecer es una discontinuidad o salto en el perfil de velocidad (Figura 25). Este tipo de saltos se pueden asociar a una zona de deslizamiento asísmico (Lyons, 2002); sin embargo,

debido al poco número de mediciones, aunado a los errores estimados, no permiten afirmar o desestimar el posible deslizamiento asísmico.



**Figura 25.** Gradiente de velocidad para el perfil Im-SC-LG. La línea amarilla muestra la ubicación del salto de velocidad y su posible relación al trazo de la Falla Michoacán.

Para el perfil Im-zona de deformación SC-LG se realizaron varias inversiones utilizando los modelos de falla vertical (ecuación 4) y falla inclinada (ecuación 5), además la profundidad de bloqueo se fue variando cada kilómetro de 1 a 10 km al igual que en el perfil Cerro Prieto-Indiviso, la separación entre la falla Imperial y la zona de deformación SC-LG es de 30.8 km.

Las inversiones realizadas para el modelo en el cual se consideran dos fallas verticales, tal como en el caso de Cerro Prieto-Indiviso, fueron realizadas sin éxito, ya que los resultados del modelo no se ajustan a los datos del perfil de velocidades. Luego entonces, se modelaron los datos considerando la falla Imperial inclinada (ecuación 5), sin embargo, los resultados no fueron totalmente satisfactorios, debido a la no-linealidad para estimar el parámetro del ángulo de inclinación de la falla de la ecuación (5) con el algoritmo de inversión.

Los resultados del modelo para una falla inclinada permiten observar que la falla Imperial presenta un echado hacia el oeste, por lo que es necesario remover la influencia del ángulo de inclinación de la falla al recorrer el perfil de velocidades por la cantidad  $D \tan \alpha$ , para posteriormente modelarla como una falla vertical (Sandwell, 2001). Para el caso de la inversión de la falla Imperial da como resultado una profundidad de bloqueo de 4.8 km y una inclinación de  $\sim 45^\circ$  hacia el oeste, considerando estos valores tenemos que el corrimiento aplicado a los datos es de 5.2 km hacia el este. El corrimiento en los datos consiste en sumar (o restar según sea el caso) los 5.2 km a la distancia perpendicular a la cual se encuentran las estaciones del perfil con respecto a la falla.

Una vez que se recorrieron los valores de las distancias en cada una de las estaciones del perfil Im-zona de deformación SC-LG se modelan de nuevo los datos considerando ahora la falla Imperial como vertical, de lo cual se obtienen las tasas de deslizamiento con respecto a profundidades de bloqueo de 1 a 10 km. En la Tabla 8 se muestran los valores de profundidad de bloqueo, tasa de deslizamiento, errores asociados y el análisis estadístico resultado de la modelación.

**Tabla 8.** Resultados de la inversión para las tasas de deslizamiento empleando el modelo de dislocación en un semiespacio elástico y homogéneo.

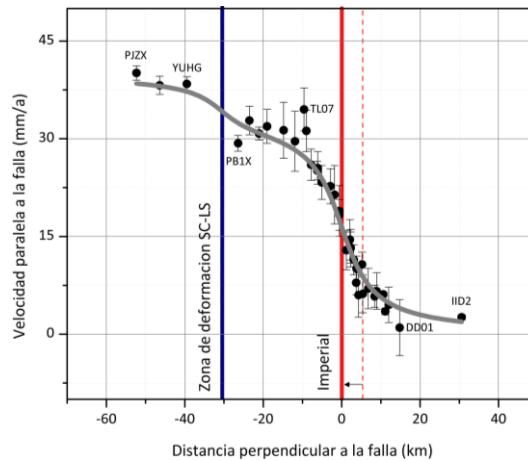
D (Km)	Imperial		Zona de Deformación		Análisis estadístico
	V(mm/año)	$\Sigma$	V(mm/año)	$\sigma$	$\chi^2$
1.0	25.9	1.1	7.0	1.1	3.3
2.0	27.6	1.0	6.9	0.9	2.1
3.0	29.0	0.9	7.0	0.8	1.5
4.0	30.4	0.8	7.3	0.7	1.2
5.0	31.6	0.8	7.6	0.7	1.1
6.0	32.7	0.9	8.0	0.8	1.2
7.0	33.7	1.0	8.5	0.9	1.4
8.0	34.7	1.2	9.0	1.0	1.7
9.0	35.6	1.4	9.5	1.1	2.1
10.0	36.4	1.5	10.1	1.2	2.5

De acuerdo con la Tabla 8, el mejor ajuste de los datos ocurre a profundidad de 6 km y tasas de deslizamiento de  $32.6 \pm 0.9$  mm/año para la falla Imperial y de  $7.3 \pm 0.7$  mm/año para la zona de deformación SC-LG (Figura 26a). En el modelado de los datos se puede apreciar que la tasa de

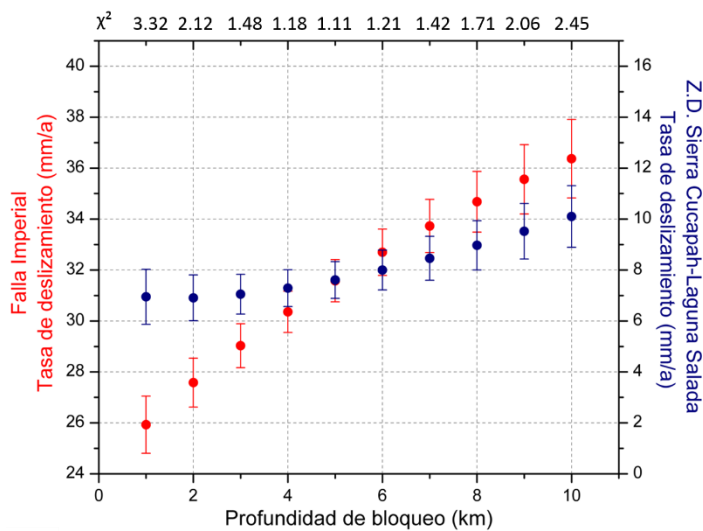


deslizamiento es sensible a la variación de la profundidad de bloqueo, esto para el caso de la falla principal (Imperial) y en menor medida para la zona de deformación SC-LG (Figura 26b).

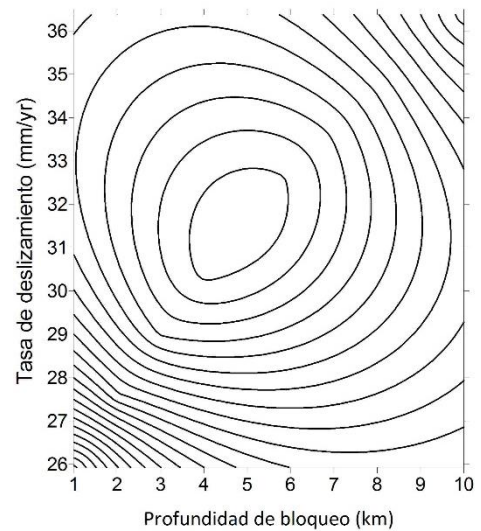
a



b



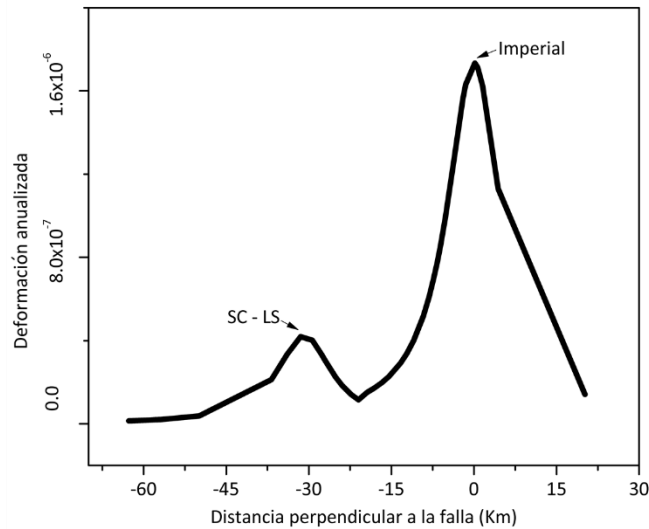
c



**Figura 26.** a) Mejor ajuste de tasa de deslizamiento y profundidad de bloqueo resueltos de manera simultánea. b) Sensibilidad de la tasa de deslizamiento con respecto a la profundidad de bloqueo. c) curvas de nivel de Chi-cuadrado para las variaciones de tasa de deslizamiento y profundidad de bloqueo.

Utilizando la tasa de deslizamiento es posible conocer la tasa de deformación presente en cada una de las fallas, tal como lo describe la ecuación (4). En la Figura 27 se observa cómo se encuentra

distribuida la deformación en cada una de las fallas; para la falla Imperial la tasa de deformación es de  $1.73 \times 10^{-6}$ , mientras que la zona de deformación LS-SC presenta una deformación tasa de deformación de  $4.18 \times 10^{-7}$ .

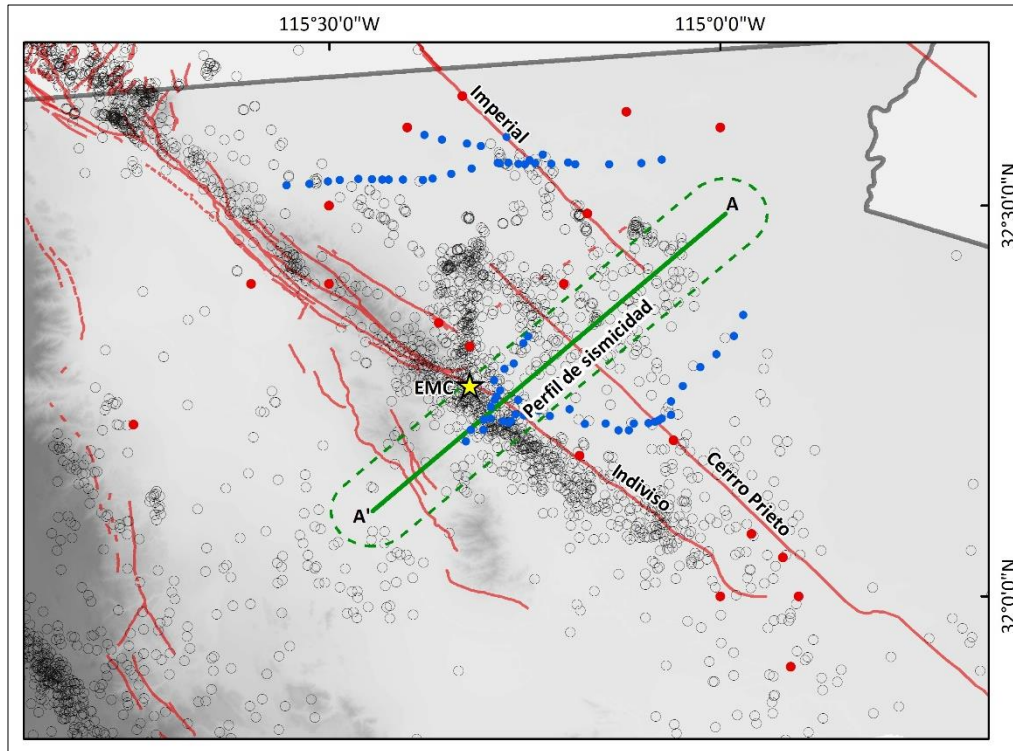


**Figura 27.** Curva de deformación en la falla para las fallas Imperial y para la Zona de Deformación Sierra Cucapah-Laguna Salada.

#### 4.4. Tasa de momento sísmico.

El momento sísmico acumulado en las fallas se puede estimar utilizando las tasas de deslizamiento, al considerar que parte de la energía elástica acumulada se puede liberar de forma sísmica. Utilizando la ecuación 2, se calcula la tasa de acumulación de momento sísmico ( $\dot{M}$ ) para las profundidades de bloqueo y espesor de capa sismogénica. Las profundidades de bloqueo geodésicas se determinaron mediante el modelado de los datos de velocidad sobre los perfiles de cada falla, mientras que, la profundidad de la capa sismogénica se estima con el catálogo de sismicidad histórica e instrumental registrada en el Valle de Mexicali (Hauksson et al., 2012; González-Ortega et al., 2018), además consideramos las réplicas del sismo EMC (Figura 29a) para

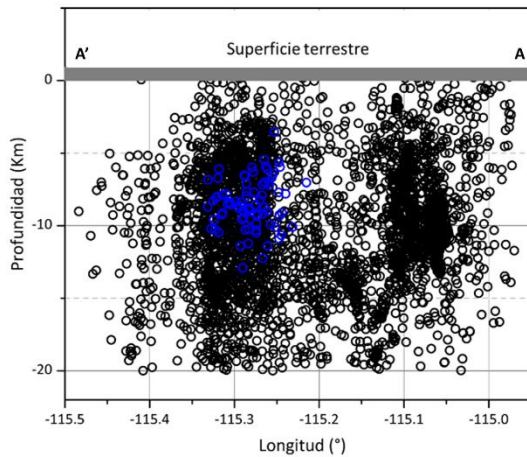
compararlas con profundidad máxima de la sismicidad histórica (Castro et al., 2012). La Figura 28, muestra la sismicidad de la región de estudio.



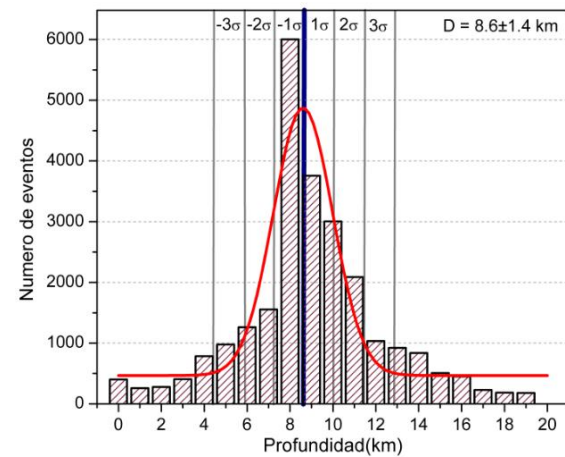
**Figura 28.** Mapa de sismicidad en el Valle de Mexicali. Los círculos en color negro muestran la sismicidad tomada de Hauksson et al., (2012),  $M_w > 3.0$ . Los círculos en color rojo representan los sismos de mayor magnitud registrados históricamente en la región, tomados de González-Ortega et al., (2018). Los círculos en color azul muestran la distribución de las estaciones GPS temporales. La línea en color verde representa la longitud y ubicación del perfil sísmico de la Figura 29 vista en planta y las líneas punteadas representan el ancho del perfil.

El análisis estadístico, considerando un ajuste de distribución normal al histograma de la profundidad de la sismicidad, indica que la mayor parte de los sismos ocurren a profundidad de  $8.6 \pm 1.4$  km, por lo cual este valor es el que se considera como profundidad de la capa sismogénica (Figura 29b).

a



b



**Figura 29.** a) Profundidad de los eventos sísmicos del perfil A-A' de la Figura 28. Los círculos en color negro representan la sismicidad antes del sismo El Mayor-Cucapah (EMC) tomada de Hauksson et al., (2012), los círculos en color azul indican la ubicación de las réplicas del EMC tomadas de Castro et al., (2012). b) Histograma de la distribución de la sismicidad a profundidad en la sección A-A', utilizando la base de datos sísmica de Hauksson et al., (2012).

En la Tabla 9 se muestran las tasas de acumulación de momento sísmico y la magnitud momento resultante para cada segmento de falla analizado en este trabajo. Las tasas de momento sísmico utilizando la profundidad de la capa sismogénetica ( $8.6 \pm 1.4$  km) para las fallas Cerro Prieto e Imperial son de  $4.69 \times 10^{24} \pm 7.64 \times 10^{23}$  dina-cm/año y  $3.67 \times 10^{24} \pm 5.97 \times 10^{23}$  dina-cm/año respectivamente. Para la falla Indiviso el valor de la acumulación de momento es de  $1.66 \times 10^{24} \pm 2.70 \times 10^{23}$  dina-cm/año, esto debido a la baja tasa de deslizamiento presente en cada falla. Los valores de momento sísmico acumulado utilizando la profundidad de bloqueo se localizan dentro del margen menor de los errores para los valores obtenidos con la capa sismogénetica.

**Tabla 9.** Momento sísmico acumulado y magnitud momento para las fallas Cerro Prieto, Imperial e Indiviso. **PB** hace referencia a la profundidad de boqueo obtenida por medio de los datos geodésicos, **ZS** hace referencia a la profundidad de la capa sísmogenética de la región determinada a partir de datos de profundidad sísmica. La columna de tiempo se refiere al número de años transcurridos desde el último evento registrado.

	Falla	L (km)	Prof. (km)	$\mu$ (dina/cm <sup>2</sup> )	V (mm/año)	$\dot{M}_0$ (dina·cm/año)	Tiempo (años)	$M_w$	
<b>PB</b>	Cerro Prieto	64.5	6.0	$3 \times 10^{11}$	28.2±1.2	3.27x10 <sup>24</sup>	40	6.7	
	Imperial	43.5			32.7±0.9	2.56x10 <sup>24</sup>		6.6	
	Indiviso	60			10.7±0.9	1.16 x 10 <sup>24</sup>	10	6.0	
<b>ZS</b>	Cerro Prieto	64.5	8.6±1.4		$3 \times 10^{11}$	28.2±1.2	4.69x10 <sup>24</sup>	40	6.8
	Imperial	43.5				32.7±0.9	3.67x10 <sup>24</sup>		6.7
	Indiviso	60				10.7±0.9	1.66x10 <sup>24</sup>	10	6.1

Para la estimación del momento sísmico acumulado en las fallas se tomaron como referencia los últimos eventos de magnitud considerable registrados en las fallas analizadas. Para las fallas Cerro Prieto e Imperial se consideraron el sismo de 1979  $M_w$  6.5 de la falla Imperial y el sismo de 1980  $M_w$  6.3 de la falla Cerro Prieto, hace aproximadamente 40 años, para el caso de la falla Indiviso se considera el sismo EMC de 2010. Con base en lo anterior, la magnitud de momento sísmico es de  $6.7 \pm 0.1$  para la falla Cerro Prieto,  $6.6 \pm 0.1$  para la falla Imperial y de  $6.0 \pm 0.1$  para la Indiviso, esto considerando que toda la energía que se ha acumulado se libere de forma sísmica.

## Capítulo 5. Discusiones

---

### Tasas de deslizamiento.

Bennett et al., (1996), a partir de datos de dos estaciones GPS estimaron valores de tasa de deslizamiento para la falla Cerro Prieto e Imperial de  $42\pm 1$  y  $35\pm 2$  mm/año respectivamente; sin embargo, después del sismo EMC del 2010 se dio a conocer la existencia de la falla Indiviso por la evidencia superficial de la ruptura en la falla localizada de manera paralela a 11.8 km al oeste de la falla Cerro Prieto. Con la manifestación de la falla Indiviso, la tasa de deslizamiento calculada para la falla Cerro Prieto en 1996 quedó sobreestimada, ya que para el cálculo de dichos valores no se consideró el acomodo de movimiento de la falla Indiviso. Es importante considerar la cantidad de datos utilizados en los resultados obtenidos en 1996 y la influencia que esto puede tener en la estimación de las tasas de deslizamiento tanto para la falla Cerro Prieto como para la Imperial.

En este trabajo se utilizaron 37 estaciones cercanas y 4 distantes para modelar la tasa de deslizamiento de la falla Imperial y zona de deformación Sierra Cucapah – Laguna Salada y para las tasas de deslizamiento de la falla Cerro Prieto e Indiviso se modelaron 44 estaciones cercanas a las fallas y 2 estaciones lejanas; con este número de datos modelados cercanos a la falla puede definir adecuadamente la forma del arcotangente utilizada en el modelo y con ello obtener una estimación más precisa de las tasas de deslizamiento.

Para obtener las tasas de deslizamiento de las principales fallas del Valle de Mexicali, se consideró la influencia que podría presentar la relajación posísmica del sismo EMC, para las fallas Imperial, Cerro Prieto e Indiviso. Para determinar si la relajación del terreno después del EMC continuaba y por ende afectaba la estimación de las tasas de deslizamiento se realizó un análisis de las series de tiempo de estaciones continuas, donde se encontró que a partir del año 2013 las velocidades de cada uno de los puntos de observación muestran comportamiento lineal con respecto al tiempo (Figura 20). Debido a lo anterior, a partir del año 2013 las velocidades de las estaciones GPS ya no presentan influencia significativa en el campo cercano debido al EMC. En la Tabla 5 se pueden observar los valores de las velocidades para las estaciones temporales y permanentes que presentaban efecto posísmico de EMC. La diferencia promedio entre las velocidades de 2011 a 2019

y de 2013 a 2019 es de 0.6 mm/año; este valor no es significativo ya que los errores asociados al modelo se encuentran arriba del milímetro por año.

En este estudio se consideraron las fallas Cerro Prieto e Indiviso en un solo modelo, estimando que la falla Cerro Prieto acomoda  $29.9 \pm 1.6$  mm/año del total del movimiento de las placas Pacífico y Norteamérica;  $\sim 12.6$  mm/año menos que lo estimado por Bennett et al., (1996); la diferencia entre los valores de las tasas de deslizamiento radica en el desconocimiento de la falla Indiviso en 1996 y a la escasa disponibilidad de datos geodésicos temporales en la zona. Es importante resaltar que la deformación no se distribuye de manera uniforme entre las fallas si no que, la falla Cerro Prieto absorbe el  $\sim 75\%$  de la deformación y la falla Indiviso absorbe la cantidad restante,  $\sim 25\%$ .

Por otro lado, utilizando datos de imágenes satelitales de 2011 a 2016, Samsonov et al., (2017) estimaron el deslizamiento posísmico para la falla Indiviso en 9 mm/año; sin embargo, el valor obtenido en ese estudio no representa solamente el deslizamiento posísmico. En este trabajo se puede observar que el deslizamiento posísmico cesó antes del 2013 por lo que los valores obtenidos después de este año representan la etapa acumulación de energía elástica en la falla Indiviso con  $10.7 \pm 0.9$  mm/año de deslizamiento intersísmico ya que los datos modelados para obtener la tasa de deslizamiento comprenden del año 2016 a 2019.

Para la falla Imperial, al igual que para la falla Cerro Prieto la tasa de deslizamiento disminuyó en comparación con los valores estimados en 1996, esto puede deberse a una mejor cobertura espacial y temporal en la adquisición de los datos GPS con un mayor número de mediciones que restringen mejor los resultados. La tasa de deslizamiento para la falla Imperial es de  $32.7 \pm 0.9$  mm/año,  $\sim 3$  mm/año menos que los estimados por Bennett et al., (1996). En un contexto regional, la falla Imperial presenta condiciones de deslizamiento diferentes entre el segmento localizado en el Valle Imperial y el segmento localizado en el Valle de Mexicali, por lo cual es de esperarse que los valores de la tasa de deslizamiento varíen. El segmento localizado en el Valle Imperial presenta deslizamiento asísmico superficial de 9 mm/año (Lyons, 2002), fenómeno que causa una disminución en la cantidad de energía elástica acumulada en la falla; Lindsey y Fialko, (2016) estimaron que la tasa de deslizamiento es de 25 mm/año considerando la influencia que tiene el deslizamiento asísmico superficial.

El gradiente de velocidades de la falla imperial sugiere que la falla no es vertical si no que presenta una inclinación (ángulo de echado) hacia el oeste. Fonseca et al., (1981), en los datos de una línea de sísmica de reflexión en 2D dibujan la falla Imperial con una inclinación hacia el oeste; recientemente, Reyes Martínez en 2017 realizó un trabajo con datos de sísmica de reflexión en 2D en el cual uno de los perfiles analizados atraviesa casi transversalmente la falla imperial, en los resultados obtenidos no discute la presencia de un ángulo de echado debido a la pérdida de coherencia en la señal en las cercanías a la falla pero por las rocas aledañas a la falla se pudo observar una discontinuidad en el perfil a cada lado de la falla indicando inclinación de la misma.

Mediante el modelado de datos geodésicos se pudo inferir la dirección del echado de la falla Imperial, mientras que el valor del ángulo de echado resuelto por el modelo fue de  $\sim 45^\circ$ , este valor es solo para satisfacer el modelo pero no significa que el ángulo de la falla tenga físicamente ese valor; debido a la alta no linealidad que presenta el modelo (ecuación 6) no fue posible estimar un valor confiable para el ángulo echado, por lo cual se optó por realizar el corrimiento en distancia a la falla de los datos por el valor  $D \tan \alpha$  (Figura 26a).

Tong et al., (2014), mediante un modelo de una placa elástica sobre un semiespacio viscoelástico obtienen tasas de deslizamiento para la falla Laguna salada entre los  $5.4 \pm 0.2$  mm/año y  $7.2 \pm 0.3$  mm/año. En este trabajo se modela la zona de deformación Sierra Cucapah-Laguna Salada como una sola falla, la cual captura toda la deformación de esa región, sin considerar la complejidad estructural allí presente. Del modelado de las velocidades GPS se obtuvo una tasa de deslizamiento  $7.3 \pm 0.7$  mm/año, y está asociada a la zona de deformación y no a una sola falla en particular; los valores obtenidos en este trabajo son similares a los obtenidos en Tong, et al., (2014), considerando que se modeló una sola falla para la región de la falla Laguna Salada sin diferenciar los procesos tectónicos de deformación presentes. Para obtener tasas de deslizamiento para diversas fallas en la zona es necesario instrumentar con perfiles densos de GPS-GNSS, tal como lo realizado en las fallas Cerro Prieto, Imperial, Indiviso y Tulecheck, además de considerar la complejidad estructural de la zona.



### **Tasa de deslizamiento geodésica vs. Tasa de deslizamiento geológica: falla Imperial.**

Thomas y Rockwell, (1996), realizaron un estudio de geología superficial para el segmento de la falla Imperial localizada en la frontera internacional del lado mexicano. Mediante dataciones de los estratos recolectados de una trinchera estimaron una tasa de deslizamiento de  $\sim 15$  mm/año, valor considerado para los últimos 300 años. Sin embargo, en un estudio reciente (Thomas Rockwell, comunicación personal, 17 de octubre, 2019) se ha estimado que la falla Imperial ha presentado tasas de deslizamiento entre los 33-40 mm/año, en el último milenio. Por otro lado, Lindsey y Fialko, (2016), indican para el segmento de la falla Imperial localizado en el Valle Imperial, que la tasa de deslizamiento más consistente para esta sección es de 25 mm/año considerando que el segmento de falla analizado en ese estudio presenta deslizamiento asísmico superficial. En este trabajo se obtuvo una tasa de deslizamiento de  $32.7 \pm 0.9$  mm/año. La diferencia entre las tasas de deslizamiento para el segmento de la falla Imperial del lado mexicano y el segmento ubicado del lado estadounidense se debe a que el segmento de la falla en el Valle Imperial presenta deslizamiento asísmico superficial.

La diferencia entre los valores de tasa de deslizamiento obtenidos mediante técnicas geológicas y los obtenidos mediante la geodesia pueden deberse a factores tales como: 1) variación de los esfuerzos durante el ciclo sísmico, tal como lo menciona Smith-Konter et al., (2011) en cuanto a la variación de las profundidades de bloqueo, 2) el tipo de deformación que se esté midiendo, por ejemplo el GPS mide deformación instantánea (corto periodo de tiempo), mientras que los métodos geológicos pueden medir la deformación finita ocurrida durante lapsos grandes que se presenta durante un gran periodo de tiempo.

### **Profundidad de bloqueo geodésica vs. Espesor sismogénico.**

La profundidad estimada para todas las fallas modeladas mediante datos geodésicos resulta menor que la capa sismogénica estimada a partir de la localización hipocentral de la actividad sísmica presente en el Valle de Mexicali. La capa sismogénica se encuentra a  $8.6 \pm 1.4$  km de profundidad mientras que, la profundidad de bloqueo ronda en 6.0 km, las diferencias entre estas estimaciones se puede deber a diversos factores involucrados, tales como: 1) la posible presencia de deslizamiento asísmico en alguno de los segmentos de falla analizados. Lindsey y Fialko, (2016)

exponen que para la falla imperial este fenómeno cesa en la frontera con México, se esperaría que una falla que presente deslizamiento asísmico tenga asociada una capa somera de unos pocos kilómetros de espesor y la capa de bloqueo a mayor profundidad y espesor de varios kilómetros; 2) cambios en los esfuerzos tectónicos debido a variaciones en el ciclo sísmico (Smith-Konter et al., 2011).

Para el caso de las profundidades de bloqueo, la diferencia entre el espesor de la capa sismogénica y los valores resueltos por el modelo es de 1.2-4.0 km, esto si se considera 1-sigma de error para la capa sismogénica. Con ello, los valores obtenidos para la profundidad de bloqueo son coherentes con el espesor de la capa sismogénica. Este tipo de comportamiento ha sido observado en otras zonas del Valle Imperial (Smith-Konter et al., 2011) donde la discrepancia entre la profundidad de bloqueo geodésica y el espesor de la capa sismogénica varía alrededor de 2 km.

### **Tasa de Momento sísmico.**

El momento sísmico acumulado en las fallas Cerro Prieto ( $1.87 \times 10^{26} \pm 3.05 \times 10^{25}$  dina·cm) e Imperial ( $1.46 \times 10^{26} \pm 2.38 \times 10^{25}$  dina·cm) se estimó para un periodo de 40 años, considerando el tiempo transcurrido desde el sismo de 1979  $M_w$  6.5 de la falla Imperial y el sismo de 1980  $M_w$  6.3 de la falla Cerro Prieto. Estos valores pueden indicar que la energía elástica acumulada en las fallas Cerro Prieto e Imperial se encuentra en niveles relativamente altos, esto si consideramos que los sismos grandes registrados en la región se encuentran alrededor de  $M_w$  6.3-6.5. Por lo cual, en los próximos años se podría presentar un evento de magnitud superior a 6.4 para las fallas Cerro Prieto e Imperial. En el caso de la falla Indiviso, el momento sísmico acumulado es relativamente bajo, esto debido en parte al sismo EMC del 2010, en el cual se liberó energía acumulada en la falla, y que la tasa de deslizamiento en este segmento de falla es baja en comparación con las obtenidas para las fallas Cerro Prieto e Imperial.

La deformación geodésica asociada a la tasa de deslizamiento es de  $1.4 \times 10^{-6}$  para la falla Cerro Prieto,  $5.3 \times 10^{-7}$  para la falla Indiviso (Figura 24), para la Falla Imperial y la zona de deformación Sierra Cucapah-Laguna Salada (Figura 27) este valor es de  $1.7 \times 10^{-6}$  y  $4.1 \times 10^{-7}$  respectivamente; los valores de deformación obtenidos en este trabajo son muy similares a los obtenidos regionalmente por González-Ortega et al., (2018).

Considerando las magnitudes mayores presentadas en sismos históricos de la región en el Valle de Mexicali se puede decir que las fallas Cerro Prieto e Imperial tienen la energía sísmica suficiente para generar un sismo de magnitud similar a los históricamente presentados, por lo que las fallas pueden estar llegando a la etapa final del ciclo sísmico al igual que la sección sur de la Falla de San Andrés (Fialko, 2006). Por último, los valores de la deformación de las fallas obtenidos en este trabajo serán utilizados para la actualización del UCERF3, modelo que utiliza datos de más de 25,000 segmentos de falla para la estimación del peligro sísmico en California y el sur de California (Field et al., 2014).

## Capítulo 6. Conclusiones y trabajo a futuro

---

Utilizando el modelo de dislocación en un semiespacio elástico y homogéneo se obtuvieron valores actuales de tasas de deslizamiento y profundidades de bloqueo para las fallas Imperial, Cerro Prieto e Indiviso en la región del Valle de Mexicali, Baja California, México. Se llegó a la conclusión de que las tasas de deslizamiento de las fallas del valle de Mexicali no han sido influenciadas por los desplazamientos posísmicos generados por el sismo El Mayor-Cucapah  $M_w$  7.2 del 2010, por lo que los resultados dan valores confiables del momento sísmico acumulado en la región.

La tasa de deslizamiento para las fallas Cerro Prieto e Indiviso es de  $28.2 \pm 1.2$  mm/año y  $10.7 \pm 0.9$  mm/año respectivamente, estos valores se obtuvieron considerando fallas verticales y una profundidad de bloqueo de 6 km. Para la Falla Imperial se consideró que la falla no es vertical si no que a profundidad presenta un ángulo de echado orientado hacia el oeste, considerando lo anterior se obtuvo una tasa de deslizamiento de  $32.7 \pm 0.9$  mm/año con una profundidad de bloqueo de 6 km.

La incorporación de la falla Indiviso al modelo de dislocación en un semiespacio elástico y homogéneo permitió conocer con mayor precisión como se encuentra distribuida la deformación entre esta falla y la falla Cerro Prieto.

Las tasas de acumulación del momento sísmico son un resultado sumamente importante ya que proporcionan información del potencial sísmico de la región del Valle de Mexicali, dichos valores serán utilizados para realizar modelos de peligro sísmico por parte del UCERF.

Como trabajo a futuro se recomienda:

1. Realizar estudios con la técnica InSAR para la zona donde se encuentran ubicadas las estaciones TL07 y TL08 para corroborar la existencia de deslizamiento asísmico y con ello la presencia de una falla y analizar lo de velocidades perpendiculares a las fallas ya que estas pueden dar un indicativo de la velocidad de apertura del centro de dispersión de Cerro Prieto como proceso tectónico.

2. Es necesario continuar con las observaciones temporales de datos geodésicos, especialmente para las fallas Indiviso y Tulecheck/Michoacán, ya que actualmente con solo tres años de datos presentan errores de hasta 5 mm/año.

## Literatura citada

---

- Altamimi, Z., L. Métivier, Collilieux, X. 2012. ITRF2008 plate motion model, *Journal of Geophysical Research*, 117(B07), 402.
- Anderson, J. G. y Bodin, P. 1987. Earthquake recurrence models and historical seismicity in the Mexicali-Imperial Valley. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(2), 562-578.
- Awange, J. L. 2012. *Environmental Monitoring Using GNSS*. Springer, New York.
- Bennett, R.A., Rodi, W., Reilinger, R. E. 1996. Global Positioning System constrains on fault slip rates in southern California and northern Baja Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B10), 21943-21960.
- Blewitt, G., D. Argus, R. Bennett, Y. Bock, E. Calais, M. Craymer, J. Davis, T. Dixon, J. Freymueller, T. Herring, T. 2005. A Stable North American Reference Frame (SNARF): First Release, The SNARF Working Group, UNAVCO, Boulder, Colorado, consultado el 10 de octubre de <https://www.unavco.org/projects/past-projects/snarf/SNARF1.0/SNARF1.0.html>
- Braasch, M. S. 1994. Optimum Antenna Design for DGPS Ground Reference Stations. En: *Proceedings of the 7th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1994)*, Salt Lake City, UT, 1291-1297.
- Castro, R. R., Acosta, J. G., Wong, V. M., Pérez-Vertti, A., Mendoza, A., Inzunza, L. 2011. Location of Aftershocks of the 4 April 2010 Mw 7.2 El Mayor–Cucapah Earthquake of Baja California, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(6), 3072-3080.
- Cohen, S. C. 1999. Numerical Models of Crustal Deformation in Seismic Zones. *Advances in Geophysics*, 41, 133-231.
- Cornejo-Zúñiga, O. y Rebolledo-Vega, R. 2016. Estimación de Parámetros en Modelos no lineales: Algoritmos y aplicaciones. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 13(25), 1794-1237.
- Crowell, B. W., Bock, Y., Sandwell, D. T., and Fialko, Y. 2013. Geodetic investigation into the deformation of the Salton Trough. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(9), 5030-5039.
- Cruz-Castillo, M. 2002. Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. *Geos*, 22(1), 37-42.

- Dixon, T., Decaix, J., Farina, F., Furlong, K., Malservisi, R., Bennett, R., Suarez-Vidal, F., Fletcher, J. and Lee, L. 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. *Journal of Geophysical Research*, 107(B10), 2226.
- Feigl, K. and Thatcher, W. 2006. Geodetic observations of post-seismic transients in the context of the earthquake deformation cycle. *Geoscience*, 338(14), 1012-1028.
- Fialko, Y. 2006. Interseismic strain accumulation and the earthquake potential on the southern San Andreas fault system. *Nature*, 441, 968-971.
- Field, E.H., Arrowsmith, R. J., Biasi, G.P., Bird, P., Dawson, T.E., Felzer, K.R., Jackson, D.D., Johnson, K.M., Jordan, T.H., Madden, C., Michael, A.J., Milner, K.R., Page, M.T., Parsons, T., Powers, P.M., Shaw, B.E., Thatcher, W.R., Weldon, R.J., and Zeng, Y. 2014. Uniform California earthquake rupture forecast, version 3 (UCERF3)—The time-independent model. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(3), 1122-1180.
- Field, E.H., Biasi, G. P., Bird, P., Dawson, T. E., Felzer, K. R., Jackson, D. D., Johnson, K. M., Jordan, T. H., Madden, C., Michael, A. J., Milner, K. R., Page, M. T., Parsons, T., Powers, P. M., Shaw, B. E., Thatcher, W. R., Weldon R. J., Zeng, Y. 2015. Long-Term Time-Dependent Probabilities for the Third Uniform California Earthquake Rupture Forecast (UCERF3). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(2A), 511–543.
- Fletcher, J. M. and 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., Teran, 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. E., Gold, P., Liu-Zeng, J., González-Ortega, A., Hinojosa-Corona, A., 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) Mw 7.2 earthquake. *Geosphere*, 10(4), 797-827.
- Fonseca, H.L., De la Peña, A., Puente, I., Díaz, E. 1981. Extension of the Cerro Prieto field and zones in the Mexicali Valley with geothermal possibilities in the future. *Proceedings 3rd Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, United States Department of Energy and Comisión Federal de Electricidad*. March 24–26, San Francisco, California, USA, 415-421.
- Frez, J., González, J.J., 1991. Crustal structure and seismotectonics of northern Baja California. En: *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, American Association of Petroleum Geologists, 47, 261-283.

- Galehouse, J. S., Lienkaemper, J. J. 2003. Inferences Drawn from Two Decades of Alinement Array Measurements of Creep on Faults in the San Francisco Bay Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6), 2415-2433.
- Gonzalez-Garcia, J. J., Gonzalez Ortega, A., Bock, Y., Fialko, Y., Fielding, E. J., Fletcher, J. M., Galetzka, J. E., Hudnut, K. W., Munguia, L., Nelson, S. M., Rockwell, T. K., Sandwell, D. T., Stock, J. 2010. Seismotectonics of the 2010 El Mayor Cucapah-Indiviso earthquake and its relation to seismic hazard in southern California. American Geophysical Union.
- González-Ortega, A. 2014. Análisis sismo-geodésico del sismo El Mayor-Cucapah (Mw 7.2) del 4 de abril de 2010, Baja California. Tesis de Doctorado en Ciencias. Centro de Investigación de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 122 pp.
- Gonzalez-Ortega, A., Fialko, Y., Sandwell, D., Nava-Pichardo, F. A., Fletcher, J., Gonzalez-Garcia, J., Lipovsky, B., Floyd, M., and Funning, G. 2014. El Mayor-Cucapah (Mw7.2) earthquake: Early near-field postseismic deformation from InSAR and GPS observation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 1482-1497.
- González-Ortega, A., González-García, J. J., Sandwell, D. T. 2018. Interseismic velocity field and seismic moment release in northern Baja California, Mexico. *Seismological Research Letters*, 89(2A), 526-533.
- Hanks, T. C., Wyss, M. 1972. The use of body-wave spectra in the determination of seismic-source parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(2), 561-589.
- Hanks, T. C., Kanamori, H. 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), 2348-2350.
- Hauksson, E., Yang, W. and Shearer, P. M. 2012. Waveform Relocated Earthquake Catalog for Southern California (1981 to June 2011). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102(5), 2239–2244.
- Herring, T. A., King, R. W., Floyds, S. D., McClusky, S. C. 2015a. Introduction to GAMIT/GLOBK, Release 10.6. Massachusetts Institute of Technological, Cambridge, Massachusetts.
- Herring, T. A., King, R. W., Floyds, S. D., McClusky, S. C. 2015b. GPS Analysis at MIT, Release 10.6. Massachusetts Institute of Technological, Cambridge, Massachusetts.
- Herring, T. A., King, R. W., Floyds, S. D., McClusky, S. C. 2015c. Global Kalman filter VLBY and GPS analysis program, Release 10.6. Massachusetts Institute of Technological, Cambridge, Massachusetts.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Wasle, E. 2014. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. Springer Wien New York, Austria.



- Hough, S.E. 2010. Predicting the Unpredictable. Princeton University Press, New Jersey.
- Huang, M.H., Fielding, E.J., Dickinson, H., Sun, J., Gonzalez-Ortega, J. A., Freed, J. M., Bürgmann, R. 2017. Fault geometry inversion and slip distribution of the 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake from geodetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 607-621.
- Jin, S., Cardellach, E., Xie, F. 2014. GNSS Remote Sensing: Theory, Methods and Applications. Springer, New York.
- Kanamori, H. and Brodsky, E. 2004. The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*, 67(8), 1429-1496.
- Langbein, J., McGarr, A., Johnston, M. J. S., Hars, P. W. 1983. Geodetic measurements of postseismic crustal deformation following the 1979 Imperial Valley earthquake, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73 (4), 1203-1224.
- Levenberg, K. 1944. A method for the solution of certain problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164-168.
- Lindsey, E. O., Fialko, Y. 2016. Geodetic constraints on frictional properties and earthquake hazard in the Imperial Valley, southern California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(2), 1097-1113.
- Lisowski, M., Prescott, W. H. 1981. Short-range distance measurements along the San Andreas fault system in central California, 1975 to 1979. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71 (5), 1607-1624.
- Lomnitz, C., Mooser, F., Allen, C. R., Brune J. N., Tatcher, W. 1970. Sismicidad y tectónica de la región norte del Golfo de California, México. Resultados preliminares. *Revista de la Unión Geofísica Mexicana*, 10(2), 37-48.
- Lyons, S. N. 2002. Investigación of fault creep in surthern California using Interferometric Synthetic Aperture Radar and GPS. Master Sciences Thesis. University of California, San Diego Scripps Institution of Oceanography. 237 pp.
- Marquardt, D. W. 1963. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), 431-441.
- McGuire, J. 2008. Seismic Cycles and Earthquake Predictability on East Pacific Rise Transform Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(3), 1067-1084.
- Moré J. J. 1978. The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. En: Watson G.A. (Eds) *Numerical Analysis. Lecture Notes in Mathematics*, Springer, Berlin. 105-116 pp.

- Mueller, K., Rockwell, T. 1991. Late quaternary structural evolution of the western margin of the Sierra Cucapah, Northern Baja California. En: The Gulf and Peninsular Province of the Californias, American Association of Petroleum Geologists, 47, 249-260.
- Resor, P. G., Cooke, M. L., Marshall, S. T., Madden, E.H., 2018. Influence of Fault Geometry on the Spatial Distribution of Long-Term Slip with Implications for Determining Representative Fault-Slip Rates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(4), 1837-1852.
- Reyes-Martínez, C. S. 2017. Características de un sector del Valle de Mexicali a partir de sísmica de reflexión 2D. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra. 108 pp.
- Rockwell, T. K., Keller, E. A., Clark, M. N., Johnson, D. L. 1984. Chronology and rates of faulting of Ventura River terraces, California. *Geological Society of America Bulletin*, 95(12), 1466-1474.
- Sandwell, D. T. 2001. Elastic solution for strike-slip faulting. Notes. Ed. Cohen, S. C., *Numerical Models of Crustal Deformation in Seismic Zones, Advances in Geophysics*, v. 41, p. 134-2
- Samsonov, S. V., Feng, W., Fialko, Y. 2017. Subsidence at Cerro Prieto Geothermal Field and postseismic slip along the Indiviso fault from 2011 to 2016 RADARSAT-2 DInSAR time series analysis. *Geophysical Research Letters*, 44(6), 2716-2724.
- Savage, J. C., y Burford, R. O. 1973. Geodetic determination of relative plate motion in central California. *Journal of Geophysical Research*, 78(5), 832-845.
- Savage, J. C., Lisowski, M. 1993. Inferred Depth of Creep on the Hayward Fault, Central California. *Journal of Geophysical Research*, 98(B1), 787-793.
- Segall, P. 2010. *Earthquake and Volcano Deformation*. Princeton University Press, New Jersey.
- Smith-Konter, B. R., Sandwell, D. T., Shearer, P. 2011. Locking depths estimated from geodesy and seismology along the San Andreas Fault System: Implications for seismic moment release. *Journal of Geophysical Research*, 116(B6), B6401.
- Steinbrugge, K. V., Zacher, E.G. 1960. Creep on the San Andreas Fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 50(3), 389-396.
- Stein, R. S. 2003. Earthquake conversations. *Scientific American*, 288(1), 72-79.
- Stein, R. S. 2007. Earthquake Rate Model 2 of the 2007 Working Group for California Earthquake Probabilities, Appendix D: Magnitude-Area Relationships. United States Geological Survey Open-File Report, 2007-1437D, 1-16.

- Thomas, A. P., Rockwell, T. 1996. A 300 to 500 year history of slip at the Imperial fault bottleneck. *Journal of Geophysical Research*, 101(B3), 5987-5997.
- Toda, S., Stein, R. S., Richards-Dinger, K., Bozkurt, S. B. 2005. Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer. *Journal of Geophysical Research*, 110(B05), B05S16.
- Tong, X., Smith-Konter, B., Sandwell, D. T. 2014. Is there a discrepancy between geological and geodetic slip rates along San Anders Fault System? *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119(3), 2518-3538.
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84 (4), 974-1002.
- Xu, X., Sandwell, D. T., Tymofeyeva, E., González-Ortega, A., Tong, X. 2017. Tectonic and anthropogenic deformation at the Cerro Prieto Geothermal Step-Over Revealed by Sentinel-1A InSAR. *Institute Electrical and Electronic Engineer Transactions on Geoscience and Remote Rensing*, 55(9), 5284-5292.