

Universidad Autónoma de Sinaloa

Facultad de Informática Culiacán
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio
Posgrado en Ciencias de la Información



ANÁLISIS DE INTERACCIONES TECTÓNICAS EN LOS DOMINIOS
CORTICALES DE MÉXICO MEDIANTE DATOS GNSS DE MEDICIÓN
CONTINUA DEL PERIODO 1993-2023.

TESIS

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN**

PRESENTA:

JORGE PADILLA VELAZCO

DIRECTORES DE TESIS:

DRA. XÓCHITL GUADALUPE TORRES CARRILLO

DR. GUADALUPE ESTEBAN VÁZQUEZ BECERRA

CULIACÁN, SINALOA, MÉXICO, FEBRERO 2025



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



Agradecimientos y dedicatorias

A mis directores de tesis la Dra. Xóchitl Guadalupe Torres Carrillo y el Dr. Guadalupe Esteban Vázquez Becerra por sus enseñanzas, apoyo, asesoría y siempre estar aconsejando durante todo este trabajo de tesis.

Al Dr. Carlos Eduardo Reinoza Gómez quien estuvo apoyándome en la estancia académica de Movilidad estudiantil en CICESE, Ensenada, Baja California. Además de colaborar en el artículo científico que me sirvió como requisito para realizar el examen de grado y apoyarme en la revisión de la tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por el apoyo de beca recibido durante mis estudios de doctorado (No. CVU: 853340).

A mis compañeros de Posgrado que estuvieron dándome consejos para la realización de la tesis, especialmente a mi compañero René Vázquez por brindarme su ayuda y consejos para este trabajo de tesis y por ser con quien más platicaba de este tema.

Agradezco a mi familia y amigos que siempre estuvieron ahí apoyándome y motivándome para que terminara la tesis a tiempo. Especialmente a mi novia Crisbel quien me ha estado acompañando en todo el doctorado.

Y especialmente quiero agradecer a mis mascotas Michelle, Mongo, Nono, Murciegata y Ranni quienes son mis gatos a quienes aprecio y valoro mucho, y especialmente a mi gata Michelle quien me ha estado acompañando desde la Licenciatura ya con más de 10 años de vida y ha estado siempre aquí para mí.

Tabla de Contenido

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS	II
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
LISTA DE ABREVIATURAS	X
RESUMEN	XI
ABSTRACT	XIII
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.2 JUSTIFICACIÓN	4
1.3 HIPÓTESIS.....	5
1.4 OBJETIVOS.....	5
CAPÍTULO 2	6
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1 TECTÓNICA DE PLACAS	6
2.1.1 <i>Límite Divergente</i>	6
2.1.2 <i>Límite Convergente</i>	7
2.1.3 <i>Límite Transformante</i>	8
2.1.4 <i>Dominios Corticales</i>	9
2.2 SISTEMAS GLOBALES DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE.....	10
2.2.1 <i>Constelaciones GNSS</i>	10
2.2.2 <i>Funcionamiento del GNSS</i>	12
2.2.3 <i>Conceptos Básicos sobre el GNSS</i>	13
2.2.4 <i>Señales GNSS</i>	14
2.3 TÉCNICAS DE POSICIONAMIENTO GNSS	15
2.3.1 <i>Posicionamiento Puntual Preciso</i>	16
2.3.2 <i>Posicionamiento Relativo Estático</i>	16
2.3.3 <i>Ventajas y Desventajas</i>	17
2.4 MARCO DE REFERENCIA	20
2.5 ÁREA DE ESTUDIO	21

2.5.1	<i>Características del Límite Convergente en México</i>	21
2.5.2	<i>Características del Límite Transformante en México</i>	22
2.5.3	<i>Sismicidad en México</i>	25
2.5.4	<i>Instituciones que operan redes de estaciones GNSS en México y descarga de datos</i>	25
2.6	ANTECEDENTES GEODÉSICOS DE LAS DEFORMACIONES EN LA CORTEZA TERRESTRE EN MÉXICO	32
2.6.1	<i>Estudios en Baja California</i>	34
2.6.2	<i>Estudios en el Oeste de México</i>	36
2.6.3	<i>Estudios en todo México</i>	39
2.7	SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DE DATOS GNSS.....	41
2.7.1	<i>GAMIT/GLOBK</i>	42
2.7.2	<i>GipsyX</i>	43
2.7.3	<i>BERNESE</i>	44
CAPÍTULO 3.....		45
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	45
3.1	ESQUEMA METODOLÓGICO	45
3.2	MARCO DE REFERENCIA.....	47
3.3	AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESAMIENTO.....	47
3.4	PRE-PROCESAMIENTO.....	48
3.5	PROCESAMIENTO DE OBSERVACIONES GNSS	50
3.6	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE BLOQUES.....	51
3.7	MODELADO DE DOMINIOS CORTICALES.....	52
CAPÍTULO 4.....		55
4.	ANÁLISIS DE ERRORES.....	55
4.1	ANÁLISIS DE CALIDAD DE LAS OBSERVACIONES GNSS.....	55
4.2	SELECCIÓN DE ESTACIONES DE REFERENCIA	58
4.3	ANÁLISIS DE CALIDAD DEL PROCESAMIENTO CON GAMIT.....	60
4.4	LIMPIEZA DE SERIES DE TIEMPO E IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS.....	61
CAPÍTULO 5.....		64
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	64
5.1	CALIDAD DEL PROCESAMIENTO CON GAMIT/GLOBK.....	64
5.2	SERIES DE TIEMPO Y VELOCIDADES	65
5.1.1	<i>Dominios de Anza, Sierras Peninsulares y Tierras Fronterizas</i>	70

5.1.2	<i>Dominios de Jalisco, Michoacán y Guerrero</i>	71
5.1.3	<i>El Cinturón Volcánico Transmexicano y el Dominio Maya</i>	72
5.1.4	<i>Placa del Pacífico y Placa de Norteamérica</i>	72
5.3	MODELADO DE ROTACIONES ELÁSTICAS DE DOMINIOS LITOSFÉRICOS, DEFORMACIONES INTERNAS Y TASAS DE DESLIZAMIENTO EN FALLAS.	78
5.3.1	<i>Resultados del modelado de dominios corticales</i>	81
5.3.2	<i>Velocidades modeladas</i>	85
5.3.3	<i>Tasas de deformación</i>	87
5.3.4	<i>Tasas de Rotación</i>	90
5.3.5	<i>Tasas de Deslizamiento</i>	91
	CAPÍTULO 6	92
6.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	92
6.1	MOVIMIENTO DE PLACAS	92
6.2	VELOCIDADES RESIDUALES	93
6.3	COMPARACIÓN DE VELOCIDADES	94
6.4	MODELO DE BLOQUES	99
6.5	CONCLUSIÓN	102
	REFERENCIAS	104

Índice de tablas

Tabla 2.1. Sesgos y errores que deben aplicarse o considerarse en las técnicas PPP-GNSS y PRE-GNSS (Rizos et al., 2012). ✓ Si aplica. × No aplica. ✓/× En algunos casos.	19
Tabla 2.2. Disponibilidad de datos para sitios GNSS en todo México de las estaciones utilizadas para procesamiento de datos en este trabajo.	26
Tabla 5.1. Velocidades e incertidumbres calculadas con GipsyX para el periodo 2011-2013 en mm/año.	67
Tabla 5.2. Diferencias de velocidades respecto a trabajos anteriores.	68
Tabla 5.3. Velocidades e incertidumbres calculadas con GipsyX para el periodo 2020-2023 en mm/año.	69
Tabla 5.4. Resultados de velocidades observadas, calculadas, residuales e incertidumbre en TDEFNODE. Todos los datos de velocidad están en mm/año.	79
Tabla 5.5. Datos de velocidad media, tasas de rotación y tasa de tensores de deformación para cada dominio modelado en TDEFNODE. NUME (Número de sitios GNSS utilizados para obtener velocidades de dominio), EOBS (Velocidad observada al este), NOBS (Velocidad observada al norte), ECAL (Velocidad calculada al este), NCAL (Velocidad calculada al norte), ERES (Velocidad residual al este), NRES (Velocidad residual al norte), E1 (tasa de deformación más compresiva), SigE1 (error estándar en E1), E2 (tasa de deformación menos compresiva), SigE2 (error estándar en E2), A1 (azimut de E1), SigA1 (error estándar en A1), Omega (tasa de rotación), SigOm (error estándar de la tasa de rotación). Todos los datos de velocidad están en mm/año, los tensores de tasa de deformación en nanostrain/año y la tasa de rotación en grados/Ma (millones de años). El Dominio Coachella no se incluyó porque no hay estaciones en esta área, por lo que se consideró parte del Dominio de Anza para el modelo.	80

Índice de figuras

Figura 2.1. Modelo de Fusión Parcial en un ambiente de Límite Divergente tomado de Turcotte et al. (2002).	7
Figura 2.2. Modelo tomado deTurcotte et al. (2002) que representa un límite convergente.....	8
Figura 2.3. Modelo de límites de placa transformante tomado de Fowler (1990). Se muestran seis tipos de fallas transformantes. (a) Falla de dorsal-dorsal, (b) y (c) falla de dorsal-zona de subducción, (d), (e) y (f) fallas de zona de subducción-zona de subducción.	9
Figura 2.4. Profundidad de la placa de Cocos subduciendose por debajo de la placa de Norteamérica. Tomada de Ferrari et al. (2012).	22
Figura 2.5. Sistema de fallas del límite transformante en México. Tomada de Plattner et al. (2007).	24
Figura 2.6. Ubicación de los sismos, sus magnitudes y años que afectan las mediciones GNSS en el área de México (Cabral-Cano et al., 2018; Cruz-Atienza et al., 2020; Ellis et al., 2018; Gonzalez-Ortega et al., 2014; Gualandi et al., 2017; Guo et al., 2019; Hutton et al., 2001; Kaftan y Melnikov, 2017; Li et al., 2020; Melbourne et al., 2002; Pollitz et al., 2012; Sánchez y Drewes, 2016; Spinler y Bennett, 2012; Tung et al., 2019; Zigone et al., 2012).....	33
Figura 3.1. Esquema metodológico para el procesamiento y análisis de datos GNSS.	46
Figura 3.2. (a) Los 20 sitios de control (círculos verdes) en las placas tectónicas del Pacífico y Norteamérica. (b) Dominios corticales y 94 sitios GNSS seleccionados (triángulos rojos) fueron procesados para calcular la velocidad cortical regional en México.	49
Figura 3.3. Dominios Corticales en México.	53
Figura 4.1. Gráficas del análisis de calidad de las señales GNSS para las estaciones HER2, AMC2, MTY2, VNDP, INEG y UCOE.....	58
Figura 5.1. Series de tiempo de coordenadas GNSS para 10 sitios en la Placa de Norteamérica (a y b) y 3 sitios en la Placa del Pacífico (c y d) donde las componentes del movimiento son; norte (a y c) y este (b y d).....	66

Figura 5.2. Vectores de velocidad en el marco de referencia ITRF2014 referidas a la placa de Norteamérica para estaciones con datos GNSS en todo el territorio mexicano.....	75
Figura 5.3. Vectores de velocidad para estaciones con datos GNSS ubicadas en el norte de México.....	76
Figura 5.4. Vectores de velocidad para estaciones con datos GNSS ubicadas en el sur de México.....	77
Figura 5.5. Vectores de velocidad en el marco de referencia ITRF2014.....	78
Figura 5.6. Comparaciones entre velocidades calculadas y velocidades del modelo. Los vectores de velocidad en azul son para las velocidades calculadas, las elipses azules son para el error sigma y los vectores de velocidad en rojo son para las velocidades del modelo. Los triángulos amarillos representan los sitios con datos GNSS. Las líneas amarillas representan los límites de las placas. Las líneas verdes representan los límites de los dominios corticales. Las líneas rojas representan el bloqueo en las fallas que delimitan los dominios.....	82
Figura 5.7. Cuadrícula de velocidades modeladas. Los vectores de velocidad en rojo son para las velocidades del modelo. Las líneas amarillas representan los límites de las placas. Las líneas verdes representan los límites de los dominios corticales. Las líneas rojas representan el bloqueo en las fallas que delimitan los dominios.	83
Figura 5.8. Tasas de deformación y rotación. Las líneas amarillas representan los límites de las placas. Los vectores azules son para la deformación cruzada. Las líneas amarillas representan los límites de las placas. Las líneas verdes representan los límites de los dominios corticales. Las líneas rojas representan el bloqueo en las fallas que delimitan los dominios. (a) Tasas de deformación en nanostrain por año (10^{-9} por año; negativo indica contracción). (b) Tasas de rotación en grados por millón de años (positivas para el sentido antihorario en vista de mapa). Las tasas se muestran como abanicos rojos, con cada doblez representando 2 grados por año. El abanico gris representa más o menos una desviación estándar de la misma magnitud.....	84
Figura 5.9. Tasas de deslizamiento en fallas y velocidades residuales entre las velocidades calculadas y modeladas en milímetros por año (positivas hacia el este,	

norte y arriba). Los círculos representan nodos de fallas y las flechas representan el vector de la tasa de deslizamiento. Las líneas amarillas representan los límites de las placas. Las líneas verdes representan los límites de los dominios corticales. Las líneas rojas representan el bloqueo en las fallas que delimitan los dominios. 85

Figura 5.10. Campo de velocidad de la corteza de trabajos anteriores. Las flechas azules representan las velocidades obtenidas en este estudio. Las flechas rojas indican las velocidades publicadas por CORS. Las flechas amarillas indican las velocidades publicadas por EarthScope. Las flechas moradas y verdes indican las velocidades de algunos sitios RGNA que se obtuvieron en 2003 y 2009 respectivamente. 98

Figura 5.11. Velocidades de los resultados procesados en GAMIT (flechas azules) y GIPSY (Flechas rojas). 99

Lista de abreviaturas

CDDIS: *Crustal Dynamics Data Information System.*

CORS: *Continuously Operating Reference Station.*

DORIS: *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite.*

EDM: *Electronic Distance Measurement.*

GAMIT: *GNSS at MIT.*

GLOBK: *Global Kalman filter.*

GNSS: *Sistemas Globales de Navegación por Satélite.*

GPS: *Global Positioning System.*

IGS: *International GNSS Service.*

INEGI: *Instituto Nacional de Estadística y Geografía.*

ITRF: *International Terrestrial Reference System.*

JPL: *Jet Propulsion Laboratory.*

LLR: *Lunar Laser Ranging.*

RINEX: *Receiver INdependent Exchange.*

SCIGN: *Southern California Integrated GPS Network*

SLR: *Satellite Laser Ranging.*

SOPAC: *Scripps Orbit and Permanent Array Center.*

TlalocNet: *Trans-boundary, Land and Atmosphere Long-term Observational and Collaborative Network.*

UNAVCO: *University NAVSTAR Consortium.*

VLBI: *Very Long Baseline Interferometry.*

Resumen

En el marco de esta tesis doctoral, se llevó a cabo un exhaustivo análisis de la información de las observaciones continuas de estaciones GNSS (*Sistemas Globales de Navegación por Satélite*) utilizando datos de la constelación GPS (Sistema de Posicionamiento Global) para estudiar la deformación cortical en México, una región altamente sísmica debido a sus complejos entornos tectónicos. La base de este estudio se estableció mediante la evaluación de 94 sitios GNSS continuos, pertenecientes a diversas redes GNSS que operan en México desde 1993 hasta 2023. Utilizando receptores GNSS de alta precisión con capacidades geodésicas de doble frecuencia, se recopilaron datos de manera continua, permitiendo así una perspectiva integral del campo de velocidad de la corteza terrestre en México. Para lograr un procesamiento óptimo de los datos GNSS, se empleó software científico como GAMIT/GLOBK en el modo de Posicionamiento Relativo Estático donde se estiman simultáneamente las líneas base entre las estaciones observadas, y el software GipsyX mediante el método de Posicionamiento Puntual Preciso donde se calculan las posiciones absolutas. Los datos GNSS se obtuvieron de diversos centros de datos que operan en el territorio mexicano, junto con estaciones de referencia ubicadas en placas tectónicas estables. En este trabajo se realizó una comparación de la estabilidad de las estaciones, la calidad de las mediciones, los diferentes ambientes tectónicos, los modelos de tectónica de placas, periodos de tiempo y las técnicas GNSS utilizadas. El desplazamiento de los sitios es consistente con el desplazamiento de las placas tectónicas. En general, los sitios GNSS situados al norte del Norte del Cinturón Volcánico Transmexicano al encontrarse alejados de los límites tectónicos de la placa de Norteamérica (considerada la placa de referencia principal), exhiben velocidades consistentes con las velocidades de dicha placa, con velocidades residuales que varían entre 0.11 mm/año y 1.66 mm/año. También, se analizaron las velocidades y residuos de varios dominios corticales dentro de la región de la Placa de Norteamérica utilizando el programa en Fortran TDEFNODE. El estudio incorpora velocidades observadas de GNSS para investigar rotaciones de

dominios, deformación interna, profundidad de bloqueo y fenómenos transitorios. Se realizó un análisis de los Dominios corticales en México.

Abstract

In the framework of this doctoral thesis, a comprehensive analysis of continuous observation data from GNSS (Global Navigation Satellite Systems) stations was conducted, focusing on GPS (Global Positioning System) data to study crustal deformation in Mexico, a highly seismic region due to its complex tectonic settings. The foundation of this study was established by evaluating 94 continuous GNSS sites belonging to various GNSS networks operating in Mexico from 1993 to 2023. High-precision dual-frequency geodetic GNSS receivers collected continuous data, providing an integral perspective of the crustal velocity field in Mexico. To achieve optimal GNSS data processing, scientific software such as GAMIT/GLOBK in the Static Relative Positioning mode where baselines between observed stations are estimated simultaneously and GipsyX software through the Precise Point Positioning method where absolute positions are calculated. GNSS data were obtained from various data centers operating across Mexican territory, along with reference sites located on stable tectonic plates. This study conducted a comparison of station stability, quality, different tectonic environments, plate tectonic models, time periods, and GNSS techniques used. The displacement of the sites aligns with the movement of tectonic plates. In general, GNSS sites located north of the Trans-Mexican Volcanic Belt, being far from the tectonic boundaries of the North American Plate (considered the main reference plate), exhibit velocities consistent with the velocities of this plate, with residual velocities ranging from 0.11 mm/year to 1.66 mm/year. Additionally, velocities and residuals of various crustal domains within the North American Plate region were analyzed using the Fortran program TDEFNODE. The study incorporates observed GNSS velocities to investigate domain rotations, internal deformation, locking depth, and transient phenomena. Analyses were conducted for the Crustal Domains in Mexico, Jalisco Domain, Michoacán Domain, Guerrero Domain in southwestern Mexico, and the Maya Domain in southeastern Mexico.

CAPÍTULO 1

1. Introducción

El territorio mexicano presenta una configuración tectónica destacada, incorporando segmentos de cinco placas tectónicas que interactúan entre sí, dando lugar a dos tipos de ambientes tectónicos: Ambiente tectónico de límite convergente, entre las placas de Cocos y de Rivera y la placa de Norteamérica, y ambiente tectónico de límite transformante, entre la placa de Norteamérica y la placa del Pacífico.

Los eventos geológicos como cordilleras, volcanes, sismos y metamorfismo en las rocas son más frecuentes en los límites de estas placas. La mayor parte de México se encuentra sobre la placa de Norteamérica, donde se concentra gran parte de la actividad tectónica y sísmica. Además, el país está atravesado por el Cinturón Volcánico Transmexicano, que se extiende alrededor de 1000 km desde el este hasta el sureste, situándose sobre el contorno de profundidad de 80 a 100 km de las placas subducidas de Rivera y Cocos (Pardo y Suárez, 1995).

En México, diversos organismos proveen datos de estaciones GNSS (Global Navigation Satellite Systems) permanentes y de libre acceso, como EarthScope, CORS (Continuously Operating Reference Station), INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), TlalocNet (Trans-boundary, Land and Atmosphere Long-term Observational and Collaborative Network), IGS (International GNSS Service), SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) y CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System). Estos datos se utilizan con diversos propósitos, incluida la determinación de deformaciones en la corteza terrestre. Estas redes también contribuyen a calcular las velocidades de las estaciones, desplazamientos cosísmicos y movimientos de relajación post-sísmicos mediante sistemas GNSS en estaciones geodésicas, permitiendo el modelado de deformaciones corticales recientes con alta resolución. Las placas tectónicas que subyacen al territorio mexicano se muestran en verde. Las abreviaturas utilizadas para los dominios son: CODO (Dominio Coachella), ANDO (Dominio Anza), PRDO (Dominio Sierras Peninsulares, por sus siglas en inglés de *Peninsular Ranges Domain*), BODO

(Dominio de Tierras Fronterizas, por sus siglas en inglés de *Borderlands Domain*), JALI (Dominio Jalisco), MICH (Dominio Michoacán), GUER (Dominio Guerrero). Las abreviaturas utilizadas para las placas tectónicas¹ son: PCFC (Placa del Pacífico), RIVE (Placa de Rivera), COCO (Placa de Cocos), CARI (Placa del Caribe), NOAM (Placa de Norteamérica) y la abreviatura utilizada para el Cinturón Volcánico Transmexicano es TMVB. La información sobre las características de las fallas y dominios en Baja California (CODO, ANDO, PRDO, BODO) se extrajo de Spinler et al. (2015). Los dominios en el límite convergente (JALI, MICH, GUER) se obtuvieron de Rosas-Elguera et al. (2003), mientras que los límites del Dominio Maya y el resto del Dominio Guerrero (MAYA, GUER) se basan en los trabajos de Campa y Coney (1983). Se destaca en línea roja la brecha de Guerrero en GUER (Radiguet et al., 2012).

¹Los límites de las placas PCFC, NOAM, RIVE, COCO y CARI se extrajeron del archivo disponible en https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3Aplate_boundaries.

1.1 Planteamiento del problema

Existen diversas técnicas geodésicas espaciales de medición, como GNSS, VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging), LLR (Lunar Laser Ranging) y DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), utilizadas para determinar posiciones y los desplazamientos causados por las deformaciones inducidas por el movimiento de las placas tectónicas. Cabe destacar que cada una de estas técnicas tiene aplicaciones adicionales. Por ejemplo, el VLBI se usa en estudios de la rotación terrestre y la medición precisa de posiciones en estaciones fijas, mientras que SLR y DORIS son fundamentales para el seguimiento de satélites y la mejora de la escala y la precisión del sistema de referencia terrestre. La integración de estos métodos contribuye a un mayor entendimiento de las deformaciones tectónicas y otras variaciones de la superficie terrestre, permitiendo una detección y modelado más preciso de los movimientos geodésicos. La técnica ampliamente empleada es el GNSS, que, mediante estaciones de referencia, posibilita la determinación precisa de posiciones tridimensionales en la superficie terrestre. Para un óptimo procesamiento de los datos GNSS, comúnmente se recurre la solución de Posicionamiento Relativo Estático o la solución de Posicionamiento Puntual Preciso. La ventaja del monitoreo mediante estaciones GNSS radica en su capacidad para proporcionar información reciente y altamente precisa utilizando las técnicas adecuadas (Blewitt, 1993), y su acceso a la información es notablemente rápido en comparación con otros métodos como VLBI, SLR, LLR y DORIS.

En el caso específico de México, a pesar de que la mayoría de las estaciones se encuentran dentro de la misma placa tectónica, se registran diferentes tasas de velocidades y direcciones en estaciones GNSS, como se evidencia en el trabajo de Márquez-Azúa y DeMets (2009). Por otra parte, la mayoría de los estudios GNSS en México se han enfocado en regiones entre la costa del Pacífico y el Cinturón Volcánico Transmexicano. Aunque los movimientos tectónicos son generalmente constantes, los episodios sísmicos alteran las series temporales. Los sismos ocurren

debido a tensiones y esfuerzos en los materiales hasta su punto de quiebre, liberando energía y generando vibraciones en la Tierra, especialmente en los límites convergentes de placas tectónicas. También se han investigado los desplazamientos a lo largo de extensos periodos para la RGNA (Márquez-Azúa y DeMets, 2003; Márquez-Azúa y DeMets, 2009) y para distintas redes GNSS (Padilla-Velazco et al., 2024).

1.2 Justificación

Debido a su ubicación en una región sísmicamente activa y a la interacción de cinco placas tectónicas, México requiere un monitoreo constante y un análisis detallado de los movimientos de la corteza terrestre. Las tasas de velocidad de las estaciones presentan variaciones temporales debido a las deformaciones originadas por los movimientos tectónicos. En esta investigación se determinaron los desplazamientos corticales utilizando estaciones permanentes de diversas redes GNSS en México, con datos que abarquen desde la primera medición de una estación GNSS en México hasta 2023 (1993-2023). Se calculará el posicionamiento diario de las estaciones mediante las técnicas PRE-GNSS y PPP-GNSS, con el fin de analizar los vectores de desplazamiento para cada estación y realizar una comparación de resultados según la técnica, modelo de tectónica de placas y periodos de tiempo. Se examinaron velocidades y sus residuales en dominios de la región de la Placa de Norteamérica mediante datos de observaciones GNSS.

Se busca entender el movimiento cortical intersísmico, utilizando las profundidades de bloqueo de las fallas y su repercusión en las discrepancias observadas en los datos. Además se profundiza en la comprensión de los factores que influyen en estos desplazamientos, considerando tanto las características tectónicas como las particularidades geodésicas. Se tiene en cuenta las complejidades inherentes a las regiones de los límites de placas, reconociendo la importancia de analizar la rotación de los dominios corticales y el deslizamiento intersísmico a lo largo de los límites de las fallas.

1.3 Hipótesis

Es posible determinar la influencia de los límites tectónicos y la dinámica de los dominios corticales en las velocidades y direcciones de desplazamiento de las estaciones GNSS en México, identificando patrones de deformación asociados a fallas activas y movimientos relativos de placas. Se espera que las estaciones cercanas a límites tectónicos activos, como convergentes y transformantes, presenten velocidades residuales más elevadas y mayores desviaciones estándar en comparación con aquellas ubicadas en zonas más internas y estables del continente.

1.4 Objetivos

Objetivo General

Analizar la geodinámica del territorio mexicano y la interacción tectónica que tienen los dominios corticales, a partir de la obtención de series de tiempo y vectores de velocidad de estaciones GNSS.

Objetivos Específicos

- Obtener el posicionamiento diario de las estaciones aplicando la técnica PRE-GNSS.
- Realizar un análisis de resultados en la definición del marco de referencia.
- Realizar un análisis de calidad de los resultados.
- Calcular las posiciones finales y los vectores de velocidad resultantes.
- Contrastar los resultados con trabajos previos y los generados mediante la técnica PPP-GNSS.
- Hacer un análisis de resultados en función de la técnica, modelo de tectónica de placas y periodos de tiempo.
- Modelar la deformación interna y rotaciones de dominios, así como la tasa de deslizamiento de fallas.

CAPÍTULO 2

2. Marco Teórico

2.1 Tectónica de Placas

La tectónica de placas es una teoría que postula que la corteza terrestre se encuentra dividida en placas rígidas de distintos espesores, las cuales están en constante movimiento debido a la convección en el manto superior. Estas placas, compuestas por rocas frías o en proceso de enfriamiento, se crean y destruyen continuamente, presentando velocidades de movimiento promedio de 10 mm por año. Mientras que las placas oceánicas tienen un espesor promedio de 7 kilómetros, las placas continentales alcanzan un espesor promedio de entre 35 y 40 kilómetros, pudiendo superar los 70 kilómetros en regiones montañosas.

2.1.1 Límite Divergente

Las placas se crean y consumen en las dorsales oceánicas, que corresponden al límite divergente. En este proceso, las dos placas se separan, permitiendo que el magma caliente y fundido ascienda hacia la superficie, creando nueva corteza oceánica (Figura 2.1). La roca volcánica (basalto) se acumula en la base de las placas en expansión, integrándose a ellas.

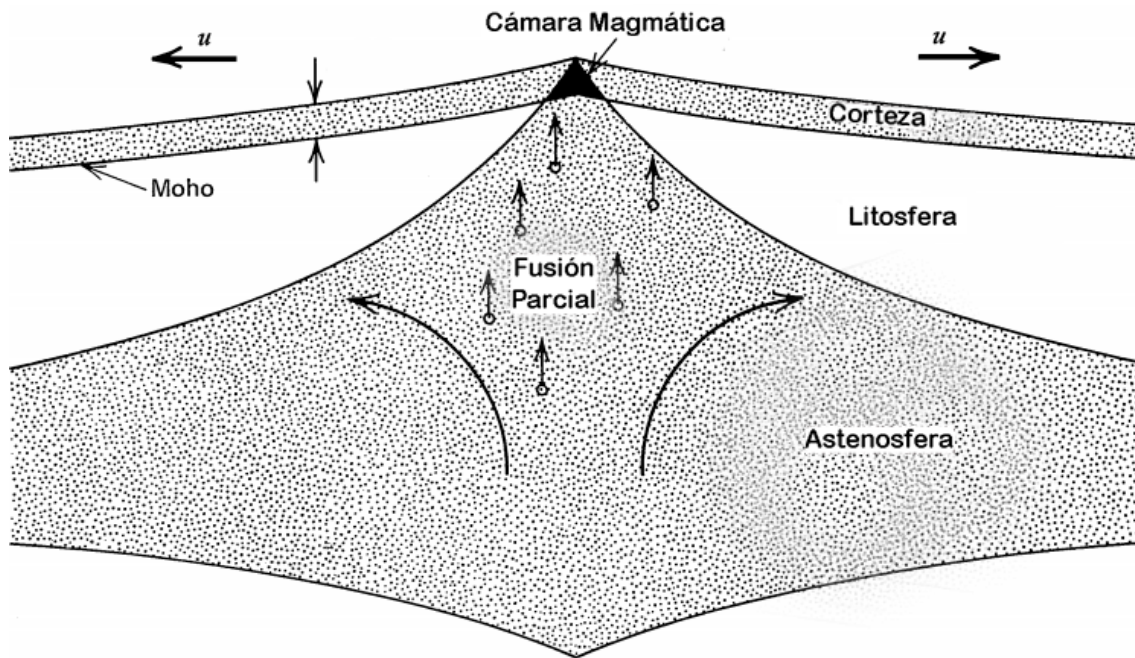


Figura 2.1. Modelo de Fusión Parcial en un ambiente de Límite Divergente tomado de Turcotte et al. (2002).

2.1.2 Límite Convergente

Cuando las placas colisionan, se deforman y descienden hacia el interior del manto terrestre en un proceso conocido como subducción o límite convergente de placas (Figura 2.2). La corteza oceánica, al ser más densa, tiende a subducir por debajo de la corteza continental, resultando en la destrucción progresiva de la placa subducida durante el proceso de subducción.

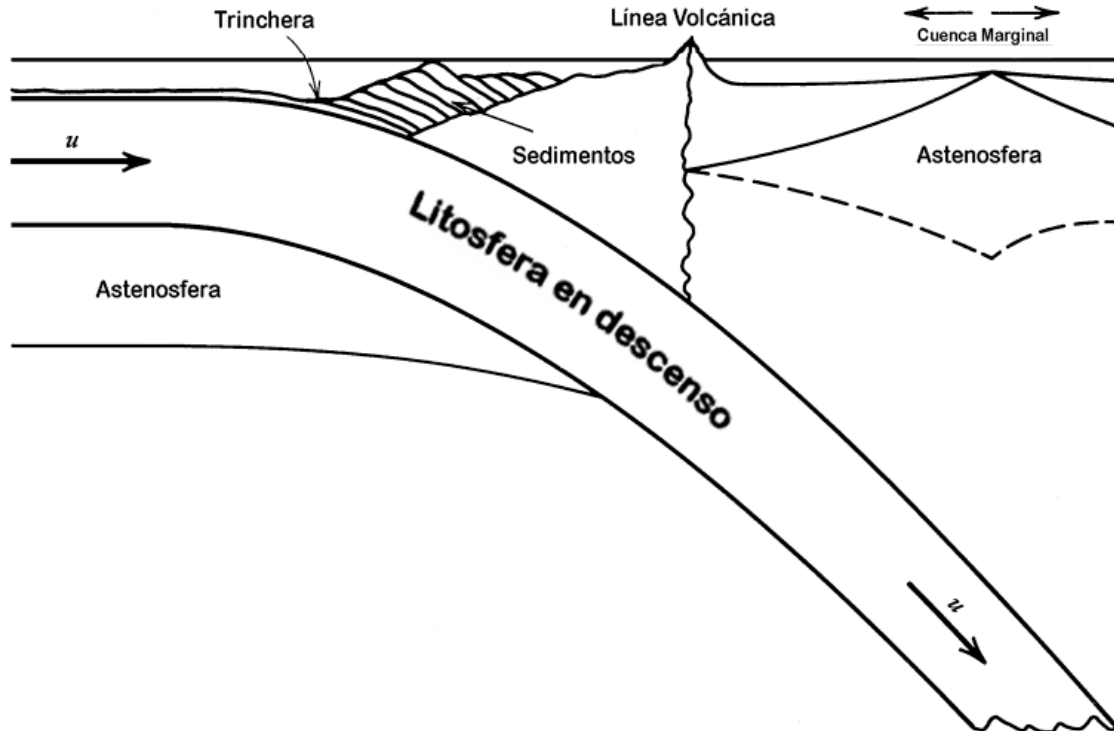


Figura 2.2. Modelo tomado de Turcotte et al. (2002) que representa un límite convergente.

2.1.3 Límite Transformante

En ciertos casos, las placas rígidas se deslizan una sobre otra a lo largo de fallas transformantes. En estos límites, donde las placas se desplazan horizontalmente una al lado de la otra, la corteza no se crea ni se destruye. Estos límites, llamados transformantes, conectan otros límites de placas en diversas combinaciones. Como se ilustra en la Figura 2.3 las fallas transformantes pueden ser de diferentes tipos: las que segmentan las dorsales mesoceánicas, las que forman los bordes pasivos entre placas continentales o una combinación de ambos. En este contexto, los segmentos de dorsal o zona de subducción se sitúan casi perpendicularmente a la dirección de extensión o compresión, mientras que las fallas transformantes se disponen paralelas a la dirección de extensión o compresión.

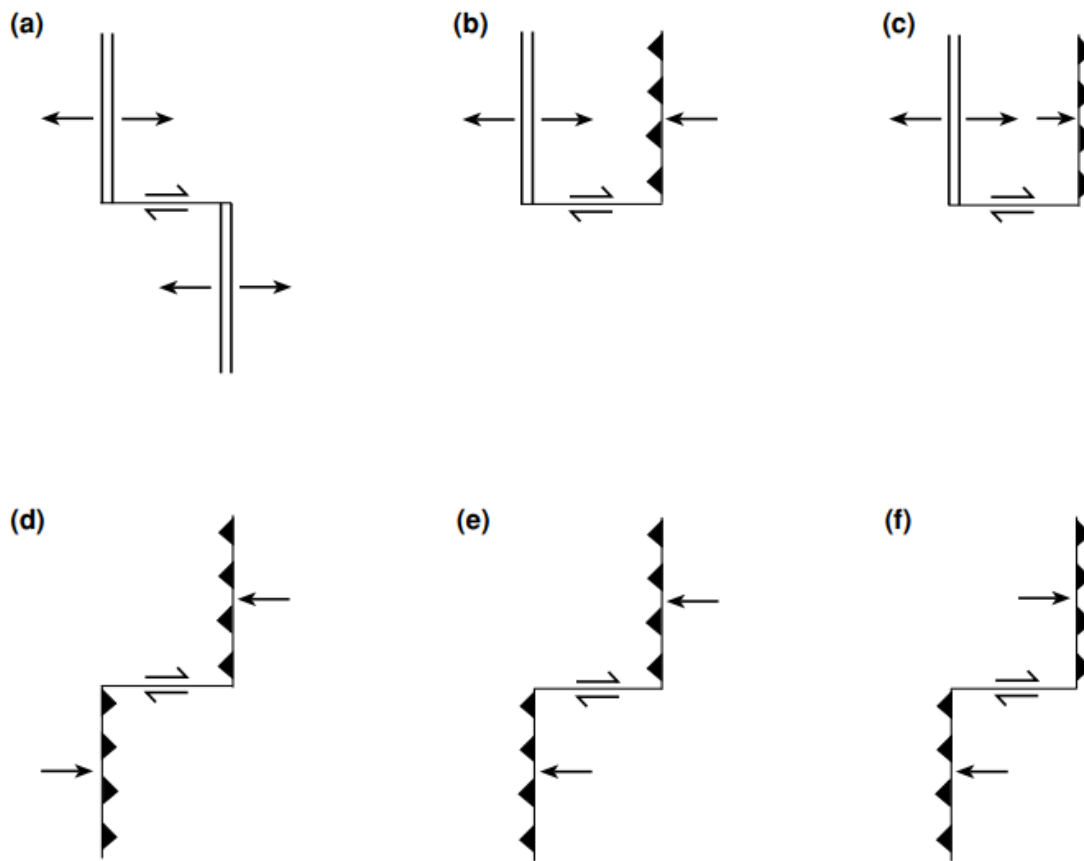


Figura 2.3. Modelo de límites de placa transformante tomado de Fowler (1990). Se muestran seis tipos de fallas transformantes. (a) Falla de dorsal-dorsal, (b) y (c) falla de dorsal-zona de subducción, (d), (e) y (f) fallas de zona de subducción-zona de subducción.

2.1.4 Dominios Corticales

Según la definición de Butler (1992), un Bloque Cortical se refiere a una región subcontinental que podría haber experimentado desplazamiento con respecto al interior continental. Estos bloques pueden estar formados por formaciones rocosas, continentales u oceánicas y pueden o no incluir un terreno tectonoestratigráfico con una definición geológica específica. Algunos bloques están compuestos por rocas que se originaron en cuencas oceánicas lejanas a sus ubicaciones actuales,

mientras que otros han permanecido relativamente estacionarios en relación con el interior continental. En este trabajo se utilizará el término de Dominios Corticales refiriéndose al modelo las interacciones entre diversos bloques corticales y terrenos tectonoestratigráficos, representados como polígonos delimitados por fallas o bordes libres.

Este estudio analiza diversos Dominios corticales, como el Dominio Anza, el Dominio de Sierras Peninsulares, el Dominio de Zona Froteriza, el Cinturón Volcánico Transmexicano (TMVB), el Dominio Jalisco, el Dominio Michoacán, el Dominio Guerrero y el Dominio Maya.

Las 94 estaciones seleccionadas para el procesamiento con el programa GAMIT cubren estos dominios de manera más completa que estudios anteriores (Márquez-Azúa y DeMets, 2003; Márquez-Azúa y DeMets, 2009), proporcionando nueva información sobre tasas y estilos de deformación, en y entre estos dominios. Este estudio se motiva por la falta de investigaciones geodésicas sobre el movimiento cortical fuera de las principales zonas de límites de placas y por la escasez de datos provenientes de un mayor número de sitios GNSS continuos distribuidos geográficamente, lo cual permitirá evaluar la deformación cortical de manera más amplia y detallada, lo que podría arrojar información clave sobre las interacciones tectónicas en áreas menos estudiadas.

2.2 Sistemas Globales de Navegación por Satélite

2.2.1 Constelaciones GNSS

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS, por sus siglas en inglés) son sistemas de radio-posicionamiento y tiempo, diseñados, financiados, desarrollados y operados por agencias y organismos internacionales (Hofmann-Wellenhof et al., 2007). A continuación se detallan los más importantes:

El GPS, creado por el sistema de defensa de los Estados Unidos en 1973 y operativo desde 1993 con fines militares, utiliza posiciones conocidas de satélites para determinar ubicaciones desconocidas en Tierra, mar, aire y espacio (Wooden, 1985). La señal del satélite, marcada continuamente con su propio tiempo de transmisión,

permite la medición precisa de la posición, velocidad y coordinación del tiempo en un sistema de referencia común. En esta tesis se decidió utilizar exclusivamente la constelación GPS debido a las limitaciones del software GAMIT/GLOBK en su versión 6.10, que no permite procesar datos de otras constelaciones GNSS.

Otros sistemas globales de posicionamiento incluyen el GLONASS, desarrollado y operado por la Federación Rusa (Polischuk et al., 2002). GLONASSm acrónimo del ruso "Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema" (Sistema Global de Navegación por Satélite), es un sistema desarrollado por la Unión Soviética en los años 70 basado en la experiencia con el sistema de satélites Doppler Tsikada.

GALILEO², es el sistema de navegación por satélite global de Europa, diseñado para ofrecer un servicio de posicionamiento global altamente preciso, garantizado y bajo control civil.

Además, el proyecto COMPASS/BEIDOU³ de la República Popular de China, actualmente en su segunda generación en desarrollo, se enfoca en satisfacer las necesidades de seguridad nacional, desarrollo económico, avances tecnológicos y progreso social de China. Su objetivo es proteger los intereses nacionales y fortalecer el poder integral del país.

El QZSS⁴, es un sistema de posicionamiento satelital japonés compuesto principalmente por satélites en órbitas quasi-zenit que también se refiere a satélites en órbitas geoestacionarias.

Por último, el IRNSS⁵, sistema satelital regional desarrollado por la India, está diseñado para ofrecer servicios de información de posición precisa en la India y hasta 1500 km en su área fronteriza.

²https://www.esa.int/Applications/Satellite_navigation/Galileo/What_is_Galileo

³<https://web.archive.org/web/20170829143036/http://www.beidou.gov.cn/attach/2011/11/29/201111292061d0391c074ed0bee7493617237c88.pdf>

⁴https://qzss.go.jp/en/overview/services/sv01_what.html

⁵https://www.isro.gov.in/IRNSS_Programme.html

2.2.2 Funcionamiento del GNSS

El principio fundamental del funcionamiento del GNSS se basa en un problema geométrico que implica el uso de señales emitidas por al menos cuatro satélites, cuyas coordenadas son conocidas, y capturadas por un receptor (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). Para llevar a cabo una precisa determinación de posición, es crucial poseer las coordenadas exactas de los satélites y garantizar la sincronización entre los relojes del receptor y los de los satélites.

Los satélites, cuyas posiciones se conocen con precisión, emiten señales a intervalos regulares y con suficiente intensidad para recorrer largas distancias. El receptor en tierra, con su reloj sincronizado con los satélites, captura estas señales en un instante dado. La señal adquirida presenta desfases temporales, los cuales corresponden al tiempo de propagación de la señal enviada por el satélite al receptor.

Con un solo satélite, es posible determinar una media de distancia relativa entre el satélite y el receptor, sin embargo, la ubicación del receptor podría estar en cualquier punto alrededor del satélite a esa distancia. La adición de un segundo satélite agrega un círculo posible donde el receptor podría ubicarse. Con un tercer satélite, se resuelve la posición del receptor, proporcionando dos lugares posibles donde este podría encontrarse. Finalmente, la inclusión de un cuarto satélite es esencial para lograr la sincronización precisa de los relojes.

Este enfoque geométrico permite establecer la posición del receptor en coordenadas tridimensionales, ofreciendo un método robusto y confiable para determinar la ubicación precisa de un punto en la superficie terrestre mediante la utilización de señales emitidas por satélites en órbita, cuya resolución se fundamenta en la Ecuación (2.1, presentada a continuación.

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(X^j(t) - X_i)^2 + (Y^j(t) - Y_i)^2 + (Z^j(t) - Z_i)^2} \quad (2.1)$$

Donde las coordenadas del punto deseado que se deben determinar están implícitas en la distancia $\rho_i^j(t)$, donde $X^j(t)$, $Y^j(t)$, $Z^j(t)$ son las componentes del vector de

posición geocéntrica del satélite en el tiempo de referencia t , y X_i, Y_i, Z_i son las tres coordenadas Cartesianas Geocéntricas (ECEF por sus siglas en inglés) desconocidas del sitio de observación.

2.2.3 Conceptos Básicos sobre el GNSS

Para la determinación de la posición, se requiere un mínimo de cuatro satélites en órbita, los cuales completan una rotación cada aproximadamente 12 horas a una altura de alrededor de 22,000 km. Utilizando pseudorrangos derivados de las señales de transmisión de los satélites, el GNSS emplea mediciones de tiempo de recorrido o fase de señal, teniendo en cuenta la sincronización de los relojes del receptor y de los satélites. Estos pseudorrangos consideran el error del reloj, ya que los relojes nunca están perfectamente sincronizados. Cada ecuación contiene 4 variables desconocidas: los tres puntos de coordenadas contenidos en el pseudorango (R) más la corrección del rango ($\Delta\rho_i^j$), el error del reloj (δ_i^j), el rango verdadero ρ_i^j , y la velocidad de la luz (c) mostrados en la Ecuación (2.2).

$$R_i^j(t) = \rho_i^j(t) + \Delta\rho_i^j(t) = \rho_i^j(t) + c\delta_i^j(t) \quad (2.2)$$

En consecuencia, se necesitan los cuatro satélites para resolver estas cuatro variables desconocidas. El concepto de GNSS asume que cuatro o más satélites pueden verse desde cualquier lugar de la Tierra las 24 horas del día.

Las mediciones de fase de portadora son más precisas que las mediciones de código, ya que la frecuencia de la portadora es más alta en comparación con los códigos emitidos. Además de utilizar el código, la fase de la portadora misma se emplea para determinar la distancia aparente entre el satélite y el receptor. La fase de una onda representa la fracción del período transcurrido desde el instante que se toma como referencia. Esto se muestra en la Ecuación 2.3 de la fase portadora.

$$\Phi = \rho + c(dT - dt) + \lambda N - d_{ion} + d_{trop} + \epsilon_\Phi \quad (2.3)$$

Donde Φ es la fase portadora observada, ρ es la distancia geométrica real entre el receptor y el satélite, λ es la longitud de onda de la señal portadora, N es el número

entero de ciclos, dT es el error en los relojes del receptor, dt es el error del reloj del satélite, d_{trop} es el retardo troposférico, d_{ion} es el retardo ionosférico y ϵ^Φ es el ruido aleatorio.

2.2.4 Señales GNSS

Los pseudorangos, esenciales en el posicionamiento mediante GNSS se derivan de las señales emitidas por los satélites. Estos pseudorangos son calculados al estimar el tiempo de viaje de la señal hasta el receptor GNSS. Las señales se manifiestan como ondas electromagnéticas generadas por osciladores a bordo de los satélites, propulsando campos eléctricos y magnéticos en forma de ondas transversales a través del espacio-tiempo, transportando energía.

Estas ondas electromagnéticas se generan mediante osciladores a bordo de los satélites, produciendo una frecuencia fundamental de 10.23 MHz, que se reduce intencionalmente en 0.005 Hz para compensar los efectos relativistas.

Estas señales se transmiten en dos frecuencias portadoras en la banda L, siendo generadas por multiplicaciones enteras de la frecuencia fundamental y moduladas por códigos (L1 y L2). La modulación permite proporcionar lecturas del reloj del satélite al receptor y transmitir información como parámetros orbitales (Hofmann-Wellenhof et al., 2012). Las frecuencias se denotan como:

Portadora L1, con una frecuencia de 1575.42 MHz, que transmite los códigos encriptados C/A (*Coarse/Adquisition*), P (*Precise*) y un mensaje de navegación.

Portadora L2, con una frecuencia de 1226.6 MHz, transmite información militar encriptada por el código P.

Los códigos corresponden a valores binarios 0 o 1, formando una secuencia de estados +1 o -1 en una modulación bifásica, realizada mediante un cambio de 180 grados en la fase de la portadora cuando se produce un cambio de estado en el código.

El Código C/A (*Coarse/Adquisition*), también conocido como Código Civil, tiene 1/10 de la frecuencia fundamental y se repite cada milisegundo. Por otro lado, el Código P

(o protegido) tiene la frecuencia fundamental y se repite aproximadamente una vez cada 266.4 días. El código P es encriptado por el Código W al Código Y cuando se implementa el A-S (*Anti-Spoofing* o Anti-Engaño). El A-S es un tratamiento de señal diseñado para evitar que los receptores sean engañados por señales falsas tomadas como verdaderas.

Es esencial considerar la presencia de diversas fuentes de error vinculadas a las mediciones realizadas con receptores GNSS, las cuales pueden clasificarse en aleatorias y naturales. Estos errores, originados por diversos factores, afectan la calidad de las mediciones. Entre los ejemplos de errores en mediciones GNSS se encuentran: errores orbitales debidos a la geometría de los satélites, efecto multitrayectoria, desfase en los relojes de los satélites, degradación del sistema disponibilidad selectiva, errores asociados al anti-engaño, efectos relativistas y desplazamiento del centro de fase, variaciones en las antenas y errores atmosféricos.

2.3 Técnicas de Posicionamiento GNSS

El análisis de velocidades de estación, desplazamientos cosísmicos y movimientos de relajación post-sísmicos, medidos con GNSS en estaciones geodésicas, posibilita el modelado de deformaciones corticales recientes con una alta resolución espacial. La extracción de señales geofísicas de las series de tiempo de coordenadas del Sistema GNSS es una práctica consolidada que ha contribuido significativamente a la comprensión de la deformación terrestre. En ocasiones, pequeñas discontinuidades en estas series de tiempo pueden vincularse a deformaciones a gran escala (por ejemplo, sismos) o a cambios en el equipo y/o fallas. La estimación precisa de estos desplazamientos permite identificar con exactitud las deformaciones cosísmicas en el primer caso y eliminar señales no deseadas en el último, posibilitando la estimación más precisa de las velocidades tectónicas.

Se han desarrollado técnicas altamente precisas para calcular coordenadas con una precisión inferior al centímetro. Existe softwares científicos de procesamiento GNSS como BERNESE, GAMIT-GLOBK y GIPSY OASIS, desarrollados por instituciones de

investigación, que implementan estas técnicas basadas principalmente en posicionamiento relativo o en la solución de posicionamiento puntual preciso.

2.3.1 Posicionamiento Puntual Preciso

El Posicionamiento Puntual Preciso se introdujo como una técnica eficiente para estimar las posiciones de estaciones de forma individual y directa con respecto a una red de referencia global (Zumberge et al., 1997). Esta técnica calcula las posiciones "absolutas" en cualquier ubicación en la superficie terrestre. La estación desconocida se posiciona directamente en relación con un marco terrestre específico utilizando observaciones no diferenciadas definidas por las órbitas de los satélites GNSS. No hay limitaciones de distancia entre las estaciones, ya que las coordenadas y los parámetros relacionados se estiman de forma independiente.

2.3.2 Posicionamiento Relativo Estático

El Posicionamiento Relativo es otra técnica donde las líneas de base entre todas las estaciones observadas se estiman simultáneamente (Blewitt, 1989). Esta estrategia de posicionamiento de red puede eliminar casi por completo los errores combinados del reloj satelital GNSS y del reloj del receptor, así como mitigar parcialmente los errores atmosféricos en redes locales. Sin embargo, a medida que aumenta la distancia entre estaciones, estas ventajas disminuyen. La diferenciación de las señales GNSS reduce el número de observaciones, generando problemas mal planteados al estimar la posición de los receptores, especialmente en redes extensas. Las diferencias simples se obtienen diferenciando 2 observaciones al satélite (k), el cual es observado simultáneamente por 2 estaciones. Diferenciando observaciones a partir de 2 receptores (i,j) observando a 2 satélites (k,l) o diferenciando 2 diferencias simples a los satélites (k,l) obtenemos las llamadas diferencias dobles dadas en las ecuaciones 2.4 y 2.5 donde Φ es la observación de la fase portadora, ρ es la distancia geométrica entre el satélite y el receptor, I/f es la refracción ionosférica, T es la refracción troposférica, λ es la longitud de onda, N la ambigüedad, m y M multitrayectoria en fases y pseudodistancia, ε y e son el ruido asociado con las mediciones de fase y pseudodistancia.

$$\Phi_{ij,1}^{kl} = \rho_{ij,1}^{kl} - \frac{I_{ij}^{kl}}{f_1^2} + T_{ij}^{kl} + \lambda_1 N_{ij,1}^{kl} + m_{ij,1}^{kl} + \varepsilon_{ij,1}^{kl} \quad (2.4)$$

$$P_{ij,1}^{kl} = \rho_{ij,1}^{kl} + \frac{I_{ij}^{kl}}{f_1^2} + T_{ij}^{kl} + M_{ij,1}^{kl} + e_{ij,1}^{kl} \quad (2.5)$$

2.3.3 Ventajas y Desventajas

Las técnicas PPP-GNSS y PRE-GNSS difieren en el acceso requerido a observaciones de estaciones de referencia con coordenadas conocidas. A continuación, se enumeran las ventajas y desventajas de cada técnica (Bock y Melgar, 2016; Garate et al., 2015; He et al., 2017; Herring et al., 2018; Rizos et al., 2012). En la Tabla 2.1 se enumeran los sesgos o errores de corrección que se modelan o se toman en cuenta en el caso de PPP-GNSS frente a técnicas de PRE-GNSS.

PRE-GNSS.

Ventajas:

- La estrategia de posicionamiento de red puede eliminar casi por completo el error combinado del reloj del satélite GNSS y del reloj del receptor.
- Los errores debidos a la refracción troposférica y ionosférica también pueden mitigarse parcialmente en las redes locales.
- En el contexto de una red regional de dimensiones reducidas, las trayectorias seguidas por el satélite y el receptor capturan instantáneas de la misma sección de la atmósfera, lo que permite asumir que los efectos atmosféricos son comparables.

Desventajas.

- Estas ventajas se degradan a medida que aumenta la distancia entre estaciones.
- La diferenciación de las señales GNSS reduce el número de observaciones, lo que conduce a más casos de problemas mal planteados al estimar la posición de los receptores.

- Además, el posicionamiento de la red se vuelve computacionalmente complicado a medida que aumenta el número de estaciones procesadas.

PPP-GNSS.

Ventajas:

- No es necesario un conjunto de estaciones para el procesamiento de datos, ya que el GNSS fue implementado como un medio eficaz para calcular de manera individual y eficiente las posiciones de las estaciones directamente en relación con una red de referencia global.
- Los errores en el posicionamiento no contaminan los resultados de las demás estaciones.
- Mayor rapidez en el procesamiento y análisis de los datos.
- Una estación desconocida se posiciona directamente con respecto a un marco de referencia terrestre específico utilizando observaciones indiferenciadas que se definen por las órbitas de los satélites GNSS.
- No existen limitaciones de distancia entre las estaciones GNSS, ya que las coordenadas y los parámetros relacionados (por ejemplo, el retardo troposférico cenital) se estiman de forma independiente.
- La técnica PPP-GNSS también proporciona una solución de posicionamiento en un marco de referencia global dinámico, anulando cualquier distorsión local asociada con técnicas de posicionamiento relativo cuando se utilizan coordenadas locales en la Estación de Referencia de Operación Continua.
- En GIPSY/OASIS no se emplea diferenciación de fase ni de rango entre estaciones, por lo que las estaciones se procesan de forma individual y asincrónica, lo que permite una paralelización eficiente durante el procesamiento.

Desventajas:

- El PPP también requiere que se apliquen una serie de correcciones para tener en cuenta las variaciones centimétricas en los sesgos de observación.

- Se necesitan estimaciones de los relojes de los satélites, así como de las órbitas precisas de los satélites, las correcciones de ajuste de fase, las correcciones del centro de fase de la antena del satélite, las correcciones de marea de tierra sólida y las correcciones de carga oceánica.

Tabla 2.1. Sesgos y errores que deben aplicarse o considerarse en las técnicas PPP-GNSS y PRE-GNSS (Rizos et al., 2012). ✓ Si aplica. × No aplica. ✓/× En algunos casos.

Tipo de corrección	PPP-GNSS	PRE-GNSS
Errores específicos del satélite		
Correcciones precisas del reloj del satélite	✓	×
Desplazamiento del centro de fase de la antena de satélite	✓	✓
Variaciones del centro de fase de la antena de satélite	✓	✓
Órbitas precisas del satélite	✓	✓/×
Diferencial de retardo grupal (solo L1)	✓ (Solo L1)	×
Término de relatividad	✓	×
Error de fase por rotación de la antena de satélite	✓	×
Errores específicos del receptor		
Desplazamiento del centro de fase de la antena del receptor	✓	✓
Variaciones del centro de fase de la antena del receptor	✓	✓
Rotación de la fase de la antena receptora	✓	×
Modelos geofísicos		
Desplazamientos de mareas terrestres	✓	×
Carga oceánica	✓	×
Mareas polares	✓	×
Movimiento tectónico de placas	✓	×
Modelado atmosférico		
Retraso troposférico	✓	✓
Retraso ionosférico (solo L1)	✓ (Solo L1)	×

2.4 Marco de Referencia

La forma de la Tierra experimenta cambios constantes y, para contextualizar el movimiento de la corteza terrestre, se requiere un marco de referencia. Este marco proporciona coordenadas para puntos en la superficie terrestre y se utiliza para medir fenómenos como la tectónica de placas, hundimientos regionales y la rotación de la Tierra en el espacio.

Aunque el GNSS es una herramienta fundamental para modelar y observar procesos geodinámicos, es esencial complementarlo con otros métodos de medición, como GNSS, VLBI, SLR y DORIS, que ofrecen una mayor precisión, especialmente cuando se combinan (Altamimi et al., 2012). La aplicación de técnicas adecuadas ha demostrado alcanzar precisiones notables en comparación con otros métodos (Blewitt, 1993). La utilización de modelos juega un papel crucial al reducir los errores en las estaciones, permitiendo así calcular la velocidad de desplazamiento de la estación. Sin embargo, es esencial conocer los desplazamientos del área para aplicar las correcciones necesarias.

Los modelos globales de desplazamientos de placas tectónicas son herramientas fundamentales que emplean diversas técnicas, como datos magnéticos y batimétricos para el caso del NUVEL-1 (DeMets et al., 1990), el GNSS, VLBI, SLR y DORIS para el ITRF (Altamimi et al., 2012). También existen modelos regionales, como el VEMOS para SIRGAS (Sánchez y Drewes, 2016), que se basan exclusivamente en mediciones GNSS. Además de las deformaciones tectónicas, existen deformaciones no tectónicas en la superficie terrestre, como las mareas terrestres, oceánicas, polares, carga atmosférica y fluctuaciones no mareales de la superficie del mar y aguas subterráneas. La mitigación de estos errores mejora las series de tiempo de las posiciones diarias del receptor, permitiendo la detección de señales geofísicas a niveles submilimétricos.

El modelo ITRF2014 (Altamimi et al., 2017) representa una mejora sustancial en el Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS) y ha demostrado ser de mayor calidad que las versiones anteriores de ITRF. Introduce innovaciones relacionadas

con señales estacionales y deformaciones post-sísmicas en las series de tiempo de posiciones. Se basa en la reevaluación de datos provenientes de las cuatro técnicas de la geodesia espacial (GNSS, VLBI, SLR y DORIS), utilizando 124 sitios geodésicos en todo el mundo para calcular series de tiempo y velocidades distribuidas. Su componente Z puede oscilar, en particular, entre 0 y más de 1 mm al año. Para pasar de un marco de referencia a otro es posible utilizar los parámetros de transformación de coordenadas, y para esto existe una relación entre la transformación dada por la Ecuación 2.6. Donde XS, YS, ZS son las coordenadas a obtener en los otros marcos de referencia y X, Y, Z son las coordenadas en el ITRF a transformar. Los parámetros de transformación son Tx, Ty, Tz, D, Rx, Ry y Rz.

$$\begin{bmatrix} XS \\ YS \\ ZS \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Tx \\ Ty \\ Tz \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -Rz & Ry \\ Rz & D & -Rx \\ -Ry & Rx & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} XS \\ YS \\ ZS \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.5 Área de Estudio

2.5.1 Características del Límite Convergente en México

La configuración geomorfológica actual de México se atribuye a la compleja interacción entre las placas de Norteamérica, Cocos, Rivera y del Pacífico. Las placas de Cocos y Rivera están en constante proceso de subducción por debajo de la Placa de Norteamérica, generando la Trinchera de Acapulco o Mesoamericana. En el Golfo de México y el Caribe, se observan esfuerzos tectónicos de separación cortical debido al movimiento de la Placa de Norteamérica hacia el oeste y la Placa del Caribe hacia el este.

En el pasado, la Placa de Norteamérica asimiló la Placa de Farallón, dando origen a microplacas como Juan de Fuca, Rivera, Cocos y Nazca (Severinghaus y Atwater, 1990). El Cinturón Volcánico Transmexicano, que se formó hace aproximadamente 20 millones de años, refleja la emergencia de esta región, afectada por esfuerzos de distensión que generan sistemas estructurales como fosas y pilares. Su estructura, gobernada por fracturas y fallas de tensión, lo hace sísmicamente activo.

El estudio de Ferrari et al. (2012) analiza la zona de subducción de México y destaca que el Cinturón Volcánico Transmexicano colinda con la Grieta del Sur del Golfo de California. Según este análisis, dicha grieta inició su proceso de expansión hace 3.6 millones de años. Hacia el este, este cinturón volcánico finaliza en la cuenca oceánica del Golfo de México (Figura 2.4). La región del Cinturón Volcánico Transmexicano tiene una amplitud variable que abarca desde los 90 km de ancho hasta los 230 km además, en la región este después de la longitud 102°O, no es paralelo a la trinchera de Centroamérica. La zona de subducción muestra variaciones laterales en la profundidad de la corteza oceánica subducida, con ángulos que oscilan desde ~30° en el extremo oeste hasta ~25° en el este. En la región central, la geometría de la placa oceánica se vuelve sub-horizontal, conocida como subducción plana. En los límites de las placas Pacífico, Rivera y Cocos, se observan diferentes direcciones y velocidades de convergencia, que varían de 23 mm/año a 64 mm/año.

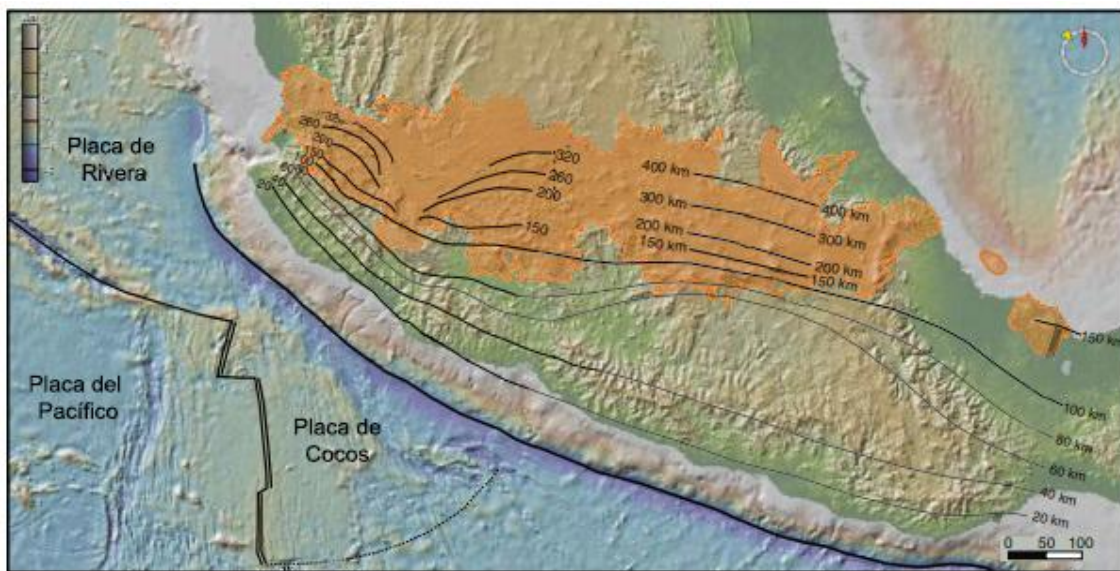


Figura 2.4. Profundidad de la placa de Cocos subduciéndose por debajo de la placa de Norteamérica. Tomada de Ferrari et al. (2012).

2.5.2 Características del Límite Transformante en México

En el noreste de México, la parte norte de la península de Baja California está afectada por un sistema de fallas transformantes conocido como el Sistema San

Andrés (Figura 2.5). Estas fallas son una proyección en la superficie de las fallas transformantes de la dorsal oceánica asimiladas por la Placa de Norteamérica.

El Golfo de California forma parte del límite transformante entre la Placa del Pacífico y la Placa de Norteamérica (Atwater y Stock, 1998). En este lugar, se crea un segmento único del límite de placas debido a la propagación de la Placa del Pacífico y la Placa de Norteamérica, reemplazando la convergencia previa de la Placa de Farallón con la Placa de Norteamérica. La placa de Farallón subdujo hace 29 Ma por debajo de la placa de Norteamérica y fue fragmentada hace 22.7 Ma cuando la dorsal que se extiende entre el límite de la Placa del Pacífico y la Placa de Farallón alcanzó la trinchera en la zona de subducción (Barckhausen et al., 2001). La subducción de la Placa de Farallón y su fragmentación llevaron a la creación de microplacas como Juan de Fuca, Rivera, Cocos y Nazca (Lonsdale, 2005).

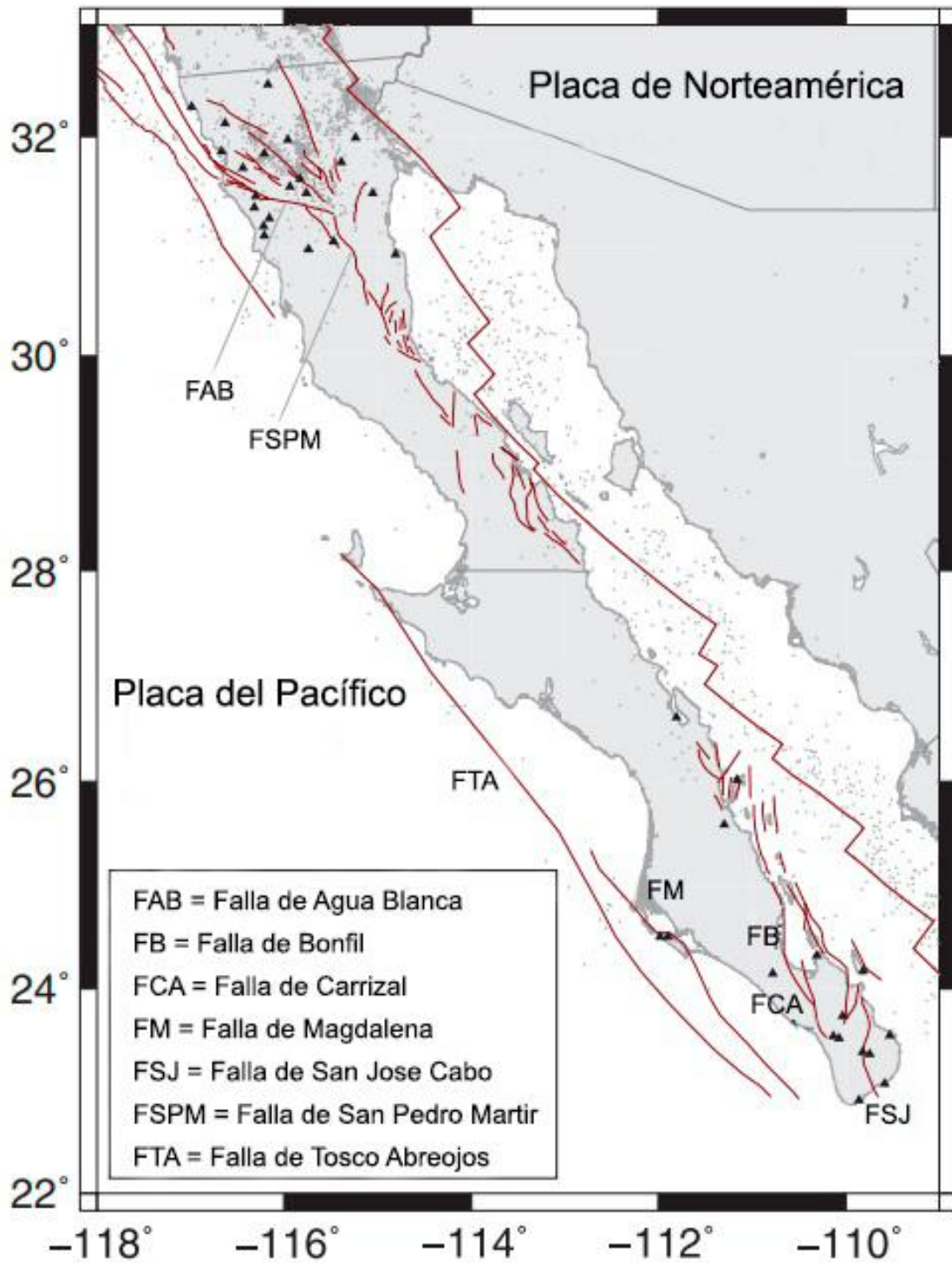


Figura 2.5. Sistema de fallas del límite transformante en México. Tomada de Plattner et al. (2007).

2.5.3 Sismicidad en México

El estudio de los sismos en México inició a principios del siglo XX, con la creación de la Asociación Sismológica Nacional en 1904 y el establecimiento del Servicio Sismológico Nacional en 1910. Desde entonces, se ha mantenido un seguimiento de eventos sísmicos, contando actualmente con 35 estaciones sismológicas que registran, en promedio, 4 sismos diarios con magnitudes superiores a 3.0.

México es una zona sísmica debido a su entorno tectónico, caracterizado por límites convergentes entre la Placa de Norteamérica y las placas de Rivera y Cocos, así como límites transformantes entre las Placas de Norteamérica y del Pacífico. La interacción de estas placas, donde la Placa de Norteamérica se separa de la Placa del Pacífico, interactúa con la Placa del Caribe y converge con las placas de Rivera y Cocos, contribuye a la sismicidad en la región.

2.5.4 Instituciones que operan redes de estaciones GNSS en México y descarga de datos

Entre las diversas instituciones que gestionan datos GNSS operativos en México, hay múltiples sitios FTP que permiten la descarga de datos, ya sea mediante el propio programa de procesamiento, de manera manual, mediante códigos o mediante aplicaciones FTP como FileZilla, como se realizó en este caso de estudio. Más adelante, se detallan las instituciones responsables de los datos utilizados, así como los sitios FTP y las rutas específicas de descarga configuradas en FileZilla para facilitar el acceso a la información.

En resumen la disponibilidad de datos de instituciones de gestión de datos GNSS en todo México fue la siguiente: 3588 días del archivo SOPAC, 38697 días del archivo TLALOC, 188870 días del archivo EarthScope, 71430 días del archivo CORS y 7033 días del archivo CDDIS. La Tabla 2.2 presenta, el número de sitios disponibles en el lapso de datos de los sitios procesados la ubicación general del sitio y las velocidades e incertidumbres calculadas en el procesamiento de datos.

Tabla 2.2. Disponibilidad de datos para sitios GNSS en todo México de las estaciones utilizadas para procesamiento de datos en este trabajo.

Sitio ID	Lapso de Datos	Latitud N	Longitud O	Altura (m)	Velocidades e incertidumbres (mm/año)					
		(°)	(°)		V_E	V_N	V_V	σ_{V_N}	σ_{V_E}	σ_{V_V}
AZCO	2006-2007	31°23'27.7868"	109°55'44.8948"	1473.2	0.67	0.39	1.16	0.27	-0.03	-4.43
CAM2	2005-2008	19°50'39.9377"	90°32'24.5954"	12.18	1.41	1.13	-2.25	0.14	0.14	0.53
CAYA	1997-2004	17°2'54.6424"	100°16'2.113"	25.92	12.43	16.74	-9.56	0.24	0.45	0.97
CECM	2009-2018	20°31'55.0694"	100°48'24.9862"	1746.9	2.88	2.67	-62.21	0.19	0.26	1.46
CEGA	2009-2019	20°28'12.198"	100°52'40.1613"	1805.8	2.5	3.82	-3.4	0.12	0.2	0.14
CHET	1995-2019	18°29'42.9964"	88°17'57.2077"	2.94	1.9	1.3	-5.13	0.26	0.17	0.99
CIC1	1999-2009	31°52'14.4406"	116°39'56.7393"	64.33	-28.9	30.45	-0.92	0.07	0.05	0.16
CICE	1995-1999	31°52'16.5447"	116°40'2.5701"	87.63	-28.61	29.9	-0.28	0.09	0.15	0.29
CN24	2013-2018	19°34'32.0234"	88°3'14.0539"	7.92	2.19	0.98	1.13	0.25	0.18	0.86
CN25	2014-2023	16°13'55.3558"	92°8'6.8649"	1649.2	3.47	3.45	6.15	0.42	0.68	1.08
CN26	2016-2018	22°22'58.7866"	89°40'56.5837"	-12.19	1.91	2.24	2.98	0.54	0.51	0.99
CNCO	2007-2023	21°10'28.7512"	86°49'15.2383"	-0.21	1.37	0.73	-1.62	0.13	0.09	0.14
COL2	2005-2023	19°14'39.9962"	103°42'6.7798"	528.77	5.52	6.64	1.61	0.14	0.39	0.33
COOB	2010-2016	19°22'53.1306"	103°40'28.0136"	1213.5	5.08	7.1	-2.5	0.21	0.62	0.64
CORX	2018-2023	32°24'55.3524"	117°14'53.4675"	74.25	-29.23	30.53	-1.45	0.16	0.21	0.61
COYU	2003-2009	17°0'30.113"	100°4'51.7918"	32.4	11.82	16.2	-14.27	0.32	0.52	1.02
CULI	1993-2007	24°47'54.7884"	107°23'2.1934"	75.4	0.68	0.37	-3.27	0.2	0.16	0.99
DAEX	2011-2019	32°13'28.2053"	115°25'9.1507"	399.28	-24.7	27.63	2.48	0.07	0.06	0.15
DOAR	2003-2009	17°1'16.1015"	99°39'2.6643"	220.71	11.57	19.58	-11.7	0.46	0.63	1.51
FARO	2006-2010	18°20'40.4297"	103°30'31.3142"	35.73	7.86	12.79	-8.24	0.43	0.57	1.98
GUAX	2016-2023	28°53'2.6253"	118°17'22.8735"	40.47	-36.5	34.98	-0.04	0.17	0.23	0.52
HER2	2005-2018	29°5'33.1697"	110°58'1.9737"	186.95	0.31	0.77	-0.11	0.31	0.09	0.5
ICAM	2012-2023	19°51'12.4472"	90°31'38.8999"	2.57	2.13	1.65	-1.18	0.19	0.16	0.35
INEG	1999-2023	21°51'22.1537"	102°17'3.1305"	1887.8	1.16	3.12	-29.48	0.19	0.19	0.92
IPAZ	2012-2023	24°8'42.9868"	110°19'50.6859"	-14.84	-38.57	30.81	-1.68	0.09	0.21	0.6

LPAZ	1995-2012	24°8'19.675"	110°19'9.6521"	-6.85	-37.98	28.87	-1.39	0.12	0.12	0.27
MERI	2005-2019	20°58'48.1635"	89°37'13.1413"	7.85	1.38	1.24	-1.69	0.08	0.1	0.29
MEXI	2005-2019	32°37'58.7701"	115°28'32.5302"	-22.42	-15.33	20.04	2.83	1.44	1.31	1.13
MNZO	2013-2014	19°3'50.0152"	104°17'53.4357"	-13.88	7.43	9.69	-13	0.75	0.9	2.53
MTY2	2005-2023	25°42'55.8243"	100°18'46.4606"	521.74	0.74	1.16	-0.58	0.06	0.06	0.28
NVDO	2010-2013	19°33'56.1404"	103°36'59.3685"	4004.7	3.91	4.91	1.9	0.14	0.16	0.32
OAX2	2005-2023	17°4'42.0243"	96°43'0.2607"	1607.3	5.07	7.3	1.95	0.26	0.32	0.37
OXEC	2007-2017	16°31'11.8866"	96°3'17.5813"	808.49	7.72	11.02	2.13	0.59	0.58	0.67
OXGU	2007-2017	16°37'53.5029"	96°54'39.1637"	1623.6	7.04	11.84	0.83	0.23	0.37	0.61
OXTH	2007-2019	16°17'10.5618"	95°14'26.8505"	41.3	4.6	5.36	-1.89	0.32	0.22	0.51
OXTU	2007-2013	16°9'4.1583"	97°39'13.5815"	76.67	12.74	18.04	-5.51	0.66	0.67	1.76
OXUM	2013-2019	15°39'44.0864"	96°29'56.5006"	82.23	12.19	17.37	-7.76	0.39	0.83	0.84
PALX	2010-2023	31°33'32.825"	116°3'49.6301"	1545.5	-29.91	30.19	-1.14	0.08	0.05	0.13
PB1Y	2013-2023	32°38'52.5795"	115°41'32.7851"	1.14	-20.89	22.85	1.84	0.06	0.15	0.31
PB2Y	2014-2019	32°36'50.1105"	115°53'22.599"	267.92	-26.87	26.35	0.25	0.05	0.09	0.2
PENA	2007-2023	19°23'25.9237"	104°6'5.3101"	1490.9	4.03	5.6	4.31	0.09	0.16	0.25
PHJX	2011-2023	32°29'24.2047"	115°33'1.6209"	105.43	-18.62	24.34	-0.4	0.21	0.07	0.16
PJZX	2011-2019	32°25'1.2304"	115°53'1.4298"	1335.7	-28.56	27.5	-0.38	0.11	0.05	0.13
PLCX	2016-2023	31°15'18.7771"	116°9'29.0659"	182.98	-30.97	30.36	-1.54	0.1	0.14	0.34
PLPX	2010-2019	31°35'18.9668"	115°9'4.5929"	813.49	-25.88	29.83	-0.28	0.32	0.17	0.46
PLTX	2010-2023	31°48'58.8277"	115°25'51.2168"	236.5	-27.31	29.23	1.32	0.08	0.09	0.12
POP1	2014-2019	19°4'1.341"	98°37'41.2322"	4002.3	3.32	3.31	1.4	0.32	0.4	0.89
PSTX	2010-2019	31°18'47.2392"	115°50'7.5576"	902.12	-30.49	30.49	-0.74	0.09	0.1	0.14
PTAX	2011-2017	32°22'38.955"	115°27'22.8047"	1060.4	-19.96	26.22	-2.48	0.13	0.06	0.35
SA27	2003-2013	29°4'55.4528"	110°57'40.8813"	184.06	0.34	1.51	-0.76	0.18	0.29	0.53
SA33	2004-2006	31°17'42.7552"	113°31'40.3298"	-23.99	-2.04	0.09	0.86	0.11	0.24	0.18
SA50	2007-2008	31°17'28.5652"	113°29'47.4124"	-8.43	-1.41	2.21	-3.17	0.29	0.16	0.85
SA61	2009-2011	27°4'26.9262"	109°25'45.3769"	36.78	-1.5	1.33	-4.35	0.76	1.14	2.34
SG21	2002-2008	19°44'28.4585"	99°11'18.9996"	2268	2.36	2.46	-5.84	0.2	0.55	0.49
SPMX	1998-2009	31°2'42.1577"	115°27'57.0932"	2763.7	-31.29	29.74	0.21	0.13	0.07	0.22
TAMP	2005-	22°16'41.9559"	97°51'50.4968"	21.04	1.08	1.12	-0.03	0.2	0.07	0.4

	2019										
TECO	2007-2023	18°59'4.3959"	103°51'39.6727"	213.24	7.58	8.8	0.89	0.14	0.14	0.35	
TNAL	2014-2018	19°7'7.378"	98°39'18.8539"	3987.3	2.89	5.2	2.16	0.44	0.3	0.8	
TNAM	2014-2019	20°32'8.3014"	103°58'0.5575"	1222.8	2.62	4.12	-16.56	0.17	0.32	1.74	
TNAT	2014-2019	18°7'48.6454"	98°2'28.0652"	1301	6.97	10.11	4.49	0.48	0.66	0.85	
TNBA	2014-2019	28°58'18.902"	113°32'50.2029"	-30.08	-31.65	29.09	-0.64	0.2	0.27	0.83	
TNCC	2015-2019	18°47'27.8989"	103°10'22.6364"	1074.2	5.07	10.15	3.85	0.45	0.62	1.31	
TNCM	2014-2019	19°29'53.2993"	105°2'41.3759"	83.09	7.19	11.52	-2.44	0.28	0.35	1.3	
TNCN	2016-2019	18°33'13.5141"	101°58'14.9467"	331.67	6.56	9.53	2.95	0.26	0.42	1.09	
TNCT	2017-2019	19°40'52.0898"	105°15'31.5673"	-8.66	5.67	11.42	2.78	0.42	0.52	1.9	
TNCU	2014-2019	28°27'1.9992"	106°47'38.5729"	2106.9	0.8	0.53	-1.85	0.14	0.14	0.42	
TNGF	2016-2019	19°19'36.9928"	99°10'33.7778"	2273.8	1.03	2.54	0.57	0.17	0.42	0.96	
TNHM	2014-2019	29°4'52.7255"	110°58'13.0914"	174.27	0.93	0.82	-1.31	0.16	0.22	0.47	
TNIF	2015-2023	18°16'17.4189"	101°53'44.1877"	282.2	7.62	12.56	1.19	0.36	0.35	0.67	
TNLC	2015-2019	19°30'22.004"	104°32'57.2239"	267.85	5.12	8.09	0.09	0.37	0.35	1.95	
TNMO	2008-2023	19°38'55.5117"	101°13'40.2379"	1965.8	3.63	2.63	-1.78	0.17	0.39	0.38	
TNMQ	2015-2019	16°42'37.0131"	98°36'41.866"	407.22	13.05	15.75	-1.49	2.22	1.56	1.76	
TNMR	2014-2023	18°17'18.528"	103°20'43.902"	41.28	6.55	14.17	-5.92	1.22	1.15	1.94	
TNNP	2015-2023	16°7'13.6227"	97°8'30.795"	492.75	12.01	18.23	-10.35	1.23	1.02	1.62	
TNNX	2014-2019	17°24'27.2598"	97°13'26.0327"	2123.1	8.88	13.31	10.08	0.61	0.58	1.15	
TNPJ	2014-2023	15°42'16.5718"	93°13'8.0262"	63.35	2.36	4.54	3.83	0.68	0.72	1.92	
TNPP	2015-2019	31°20'7.87"	113°37'53.8876"	27.64	-1.52	0.96	-1.01	0.15	0.29	0.48	
TNSJ	2016-2019	16°10'20.7133"	96°29'22.3273"	2741.8	12.34	14.18	-8.38	0.65	0.67	1.77	
TNTB	2015-2019	25°36'21.0989"	109°3'9.8074"	69.1	0.31	0.82	-1.51	0.19	0.3	0.42	
TOL2	2005-2019	19°17'35.6441"	99°38'36.4985"	2651.7	3.73	5.67	-0.21	0.15	0.17	0.35	
TSFX	2016-2019	30°56'2.1421"	114°48'38.2927"	-7.11	-29.77	28.02	-0.21	0.26	0.23	0.92	
UAGU	2008-2019	21°55'6.6143"	102°18'53.8797"	1859.5	2.65	2.23	-65.2	0.38	0.34	4.1	
UCOC	2009-2012	18°54'34.3304"	98°55'55.6549"	1460.4	1.96	2.72	-1.15	0.53	0.66	0.45	
UCOE	2005-2019	19°48'47.45"	101°41'39.9172"	1975.2	3.4	2.34	1.37	0.26	0.3	0.36	
UCOM	2007-2015	19°7'26.7792"	104°24'5.4944"	-9.71	7.91	9.09	2.88	0.43	0.52	0.61	
UIRA	2013-2016	20°39'13.8939"	101°20'52.8123"	1715.3	1.46	5.25	-83.52	0.2	0.44	2.04	

UNIP	2005-2013	19°18'45.7108"	99°10'52.6887"	2308.3	2	2.71	-2.43	0.29	0.54	0.54
UNPM	2010-2023	20°52'6.6094"	86°52'5.4258"	-0.47	0.87	0.75	-2.22	0.22	0.23	0.38
UNTO	2015-2019	19°19'10.5203"	99°35'51.4603"	2599.5	2.7	1.72	-57.04	0.48	0.36	1.42
USMX	2005-2023	29°49'17.9549"	109°40'51.7772"	625.46	0.39	1.24	-0.26	0.11	0.1	0.32
UTON	2000-2019	19°2'0.4111"	98°18'58.465"	2157.3	3.77	3.26	-2.66	0.21	0.27	0.4
UXAL	2005-2019	19°30'58.8892"	96°55'29.1245"	1362.9	2.3	2.37	0.21	0.1	0.13	0.2
YAIG	1999-2004	18°51'44.7671"	99°4'0.9741"	1285	1.33	5.7	3.33	0.71	0.93	5.52
YESX	2005-2019	28°22'42.0124"	108°55'10.6951"	1506.5	0.1	1.04	-0.05	0.07	0.06	0.28

El conocimiento acerca de las actualizaciones de hardware de los sistemas GNSS y del firmware de los receptores es crucial para comprender la evolución de las estaciones GNSS distribuidas en el territorio mexicano a lo largo del tiempo. Todas las antenas de las estaciones en México admiten una amplia gama de voltajes de entrada y han demostrado ser consistentes ante posibles variaciones del centro de fase, utilizando parámetros absolutos de calibración de antena (Schmitt et al., 2007), disponibles en IGS.

A lo largo del tiempo, se ha buscado cuantificar los movimientos de la corteza terrestre con fines científicos, como la predicción de sismos a través de la observación de precursores de movimiento. El GNSS, dada su relativa economía, portabilidad y alta precisión, se presenta como una herramienta ideal para este tipo de estudios. El GNSS, al proporcionar mediciones precisas tanto a distancias largas como cortas, se integra en redes operativas permanentes, denominadas redes de control activo, para aplicaciones de postproceso o en tiempo real.

SOPAC⁶ compila datos de 126 sitios GNSS ubicados en México. Dado que los sitios GNSS son compartidos entre diferentes instituciones solo se descargaron 4 sitios de esa institución. En cuanto a los demás sitios, 27 de ellos no fueron descargados a la falta de datos de calidad que cumplan con los criterios de selección establecidos.

La red CORS⁷ de la NOAA (NCN) es un esfuerzo cooperativo multipropósito y de múltiples agencias, que combina los esfuerzos de cientos de organizaciones gubernamentales, académicas y privadas.

El CDDIS⁸ ha admitido el archivo de datos y productos GNSS para el Servicio GNSS Internacional (IGS) como uno de los seis centros de datos mundiales. El CDDIS tiene una red activa de 11 sitios GNSS ubicados en México, de los cuales solo 4 sitios se descargaron de esa red y el resto de los sitios se descargaron de las otras redes.

El centro de datos de EarthScope⁹ (anteriormente UNAVCO¹⁰) maneja tareas de gestión de datos para datos y productos GNSS de miles de estaciones permanentes distribuidas globalmente. EarthScope tiene una red activa de 103 sitios GNSS ubicados en México, de los cuales 97 sitios fueron descargados de esa red, 5 sitios pertenecientes a la red no fueron descargados y un sitio fue descargado de otra red.

TLALOCNet¹¹ es una red combinada atmosférica y tectónica GNSS en México para el interrogatorio del clima, los procesos atmosféricos, el ciclo de sismos y los procesos tectónicos de México. TALOCNet cuenta con una red activa de 104 sitios GNSS ubicados en México, de los cuales solo 32 sitios fueron descargados de esa red, un sitio perteneciente a la red no fue descargado y el resto de sitios fueron descargados de las otras redes.

⁶<ftp://garner.ucsd.edu>

⁷<ftp://alt.ngs.noaa.gov/cors>

⁸<ftp://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/>

⁹<https://gage-data.earthscope.org/archive/gnss>

¹⁰<ftp://data-out.unavco.org>

¹¹<ftp://tlalocnet.udg.mx/rinex/obs/>

También hay otras instituciones que gestionan datos GNSS, los cuales son INEGI y CICESE:

INEGI tiene datos RINEX de RGNA (Red Geodésica Nacional Activa). Para descargarlos, el usuario cuenta con el sistema de descarga del sitio WEB institucional sin tener que registrarse¹² o hacerlo directamente vía FTP¹³. La disponibilidad de datos es de 3 meses y debido a esto no se descargaron datos de este sitio.

CICESE tiene datos RINEX de REGNOM (Red Geodésica del Noroeste de México). La Red Geodésica del Noroeste de México está compuesta por 29 estaciones de monitoreo geodésico continuo disponibles para su descarga¹⁴. Los datos del sitio están disponibles en formato RINEX, en archivos de 24 horas con intervalos de registro de 15 o 30 segundos. El rango de fechas no debe ser mayor a 7 días y debido a esto, no se descargaron datos de esta red.

Los datos de navegación se utilizan además de los datos de observación para el procesamiento de datos GNSS. Los archivos BRDC¹⁵ contienen parámetros diarios que se utilizan para estimar las posiciones de los satélites. Un gran porcentaje de estaciones GNSS proporcionan datos de navegación. Con estos datos, el CDDIS crea archivos BRDC diarios producidos por estas estaciones. Estos archivos únicos contienen mensajes de efemérides de satélite para cada día. El archivo de efemérides de transmisión GNSS diaria es una combinación de los archivos de navegación del sitio individuales en un archivo no redundante que los usuarios pueden usar en lugar de los muchos archivos de navegación individuales.

¹²<https://www.inegi.org.mx/app/geo2/rgna/>

¹³<ftp://geodesia.inegi.org.mx>

¹⁴<http://regnom.cicese.mx/>

¹⁵<https://cddis.nasa.gov/>

Los centros de análisis de IGS proporcionan soluciones de órbita satelital utilizando programas predeterminados, por ejemplo, sub diarios, diarios o semanales, según el producto de datos. El coordinador del centro de análisis de IGS recupera estas soluciones y produce un producto combinado. Las soluciones de combinación de órbita IGS están disponibles en tres formas: ultrarrápida, rápida y final.

2.6 Antecedentes geodésicos de las deformaciones en la corteza terrestre en México

Los estudios geodésicos en México durante las últimas tres décadas han revelado factores clave relacionados con la actividad tectónica y volcánica que surgen de las interacciones entre las placas tectónicas del Pacífico, Norteamérica, Caribe, Rivera y Cocos (DeMets et al., 1990; Márquez-Azúa y DeMets, 2003). Sin embargo, aún existen muchas preguntas sobre la magnitud de la deformación cortical en todo México. La mayoría de los estudios anteriores se concentraron en regiones que se deforman rápidamente hacia el oeste, incluyendo el Golfo de California, Baja California y la Fosa de América Central, donde las placas tectónicas acomodan la mayor parte del movimiento relativo de las placas. También es importante evaluar la posible deformación intracontinental difusa en el interior de las fronteras de las placas, como ejemplificado por el terremoto de Sonora de 1887 con magnitud 7.6, que ocurrió en una región montañosa del noroeste de México a una gran distancia de las zonas principales de frontera de placas al oeste y suroeste.

La comprensión de la deformación intracontinental difusa en México, especialmente lejos de las principales estructuras de frontera de placas, sigue siendo un desafío complejo. Si bien los estudios geodésicos de las últimas tres décadas han proporcionado información valiosa sobre la actividad tectónica y volcánica en el país, aún existen muchas incertidumbres con respecto a la magnitud de la deformación cortical. En nuestro estudio, nos centramos en la magnitud y el estilo de la deformación en la zona difusa de la frontera de placas en todo México. Para enriquecer nuestro entendimiento, se presentarán algunos estudios geodésicos anteriores de sismos destacados en la Figura 2.6, que proporcionarán una base sólida para la exploración y análisis de las deformaciones en la corteza terrestre en

el ámbito mexicano. Gonzalez-Ortega et al. (2014), Pollitz et al. (2012), Spinler y Bennett (2012), llevaron a cabo estudios sobre el terremoto El Mayor-Cucapah de magnitud 7.2 del 4 de abril de 2010. DeMets et al. (2014a) analizaron el movimiento de las Islas del Pacífico utilizando GNSS en las Islas Clarion, Guadalupe y Socorro, en contraste con 26 sitios en el antiguo lecho marino de la Placa del Pacífico. Más recientemente, Sánchez y Drewes (2016) describieron el cálculo de un modelo continuo de deformación cortical para el Caribe y América Latina, basado en mediciones GNSS recopiladas después de los fuertes terremotos en México y Chile entre 2010 y 2014. Estos estudios revelaron deformaciones post-sísmicas transitorias cerca de los epicentros debido a efectos viscoelásticos, deslizamiento posterior o poroelasticidad, con movimientos del orden de milímetros hasta 100 km de distancia (Broermann et al., 2021).

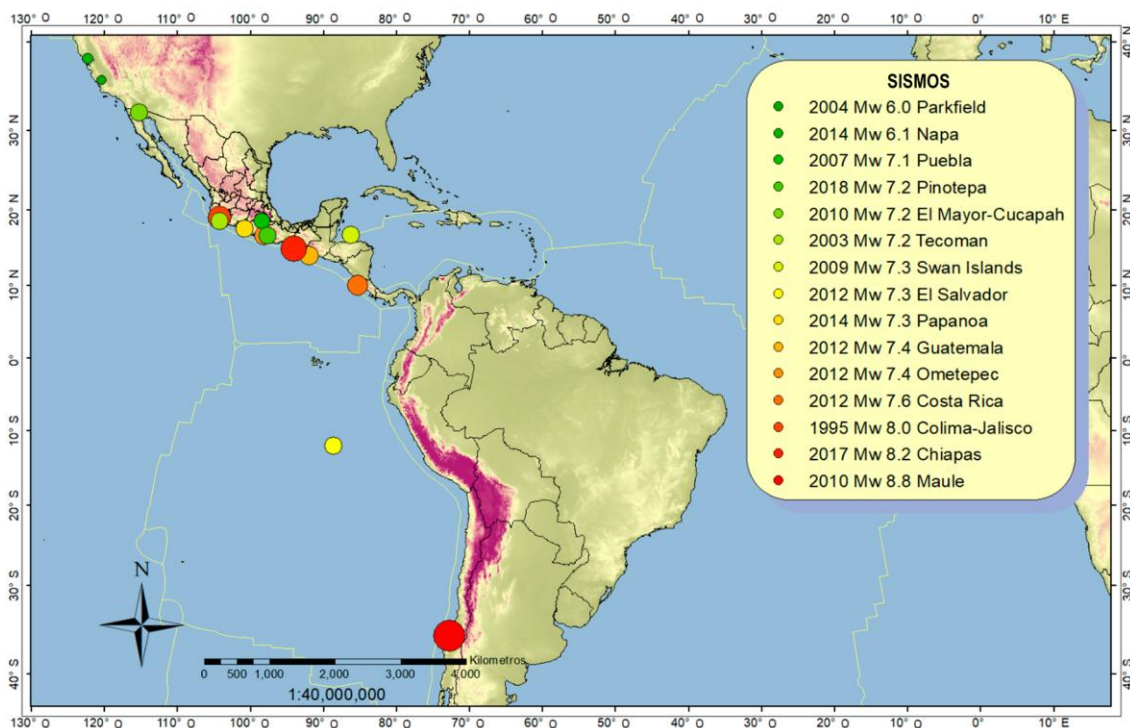


Figura 2.6. Ubicación de los sismos, sus magnitudes y años que afectan las mediciones GNSS en el área de México (Cabral-Gano et al., 2018; Cruz-Atienza et al., 2020; Ellis et al., 2018; Gonzalez-Ortega et al., 2014; Gualandi et al., 2017; Guo et al., 2019; Hutton et al., 2001; Kaftan y Melnikov, 2017; Li et al., 2020; Melbourne et

al., 2002; Pollitz et al., 2012; Sánchez y Drewes, 2016; Spinler y Bennett, 2012; Tung et al., 2019; Zigone et al., 2012).

2.6.1 Estudios en Baja California

En las últimas dos décadas, la geodesia en México ha desempeñado un papel crucial en la comprensión de factores derivados de la actividad tectónica y volcánica que impactan la deformación del territorio mexicano. Este enfoque se debe a la influencia directa de las placas tectónicas de Norteamérica, Pacífico, Cocos, Caribe y Rivera (DeMets et al., 1990; Márquez-Azúa y DeMets, 2003).

Diversas redes GNSS continúan operando en México, y gran parte de estas se dedica al estudio de la neotectónica mediante mediciones GNSS de alta precisión en regiones limítrofes en todo el país. En particular, se destaca la investigación sobre la deformación de la corteza en la península de Baja California desde la década de 1990. Dixon et al. (1991) iniciaron mediciones GNSS alrededor del Golfo de California en México, proporcionando información crucial sobre el movimiento relativo entre las placas del Pacífico y Norteamérica.

Esta investigación fue reconsiderada por Dunn et al. (1996) quienes, basándose en mediciones GNSS y observaciones del Satélite Geodésico Láser, ofrecieron información más confiable para estudios de deformación en la península de Baja California, incluyendo Mazatlán en el territorio continental de México. Sin embargo, Bennett et al. (1992) y Bennett et al. (1996) generaron estimaciones de la velocidad horizontal en Baja California, y Shen et al. (1997) contribuyeron con un campo de deformación de la corteza geodésica unificada para el sur de California y el norte de México.

DeMets y Dixon (1999) proporcionaron una descripción de la tectónica de Baja California y California con base en 2 a 4.5 años de mediciones GNSS continuas y estimaciones mejoradas para el movimiento entre la placa del Pacífico y la placa de Norteamérica. Dixon et al. (2000) compararon la velocidad estimada de la placa a partir de velocidades del sitio GNSS para evaluar la tectónica en la costa de Baja California. Además, utilizando los mismos datos de GNSS recopilados de períodos

entre 1993 y 1998. En el siguiente trabajo de Dixon et al. (2002) se examina la sensibilidad de las estimaciones de la tasa de deslizamiento de fallas para las fallas de Agua Blanca y San Miguel-Vallecitos en el norte de Baja California, México, a fin de interpretar sus implicaciones para la neotectónica y el riesgo sísmico en esta región. En el año siguiente, Gonzalez-Garcia et al. (2003) utilizaron datos de GNSS para calcular el modelo de velocidad de la corteza intersísmica en el norte de Baja California. Plattner et al. (2007) presentaron un nuevo campo de velocidad sobre el movimiento relativo entre las placas de Pacífico-Norteamérica y la microplaca de Baja California. Cabe señalar aquí, que la mayoría de los ejemplos citados anteriormente de investigaciones realizadas en Baja California se relacionaron con estaciones que pertenecen a la red SCIGN.

También se han realizado investigaciones más recientes, alrededor del norte de la Península de Baja California basadas en datos de la red PBO en funcionamiento continuo; tal como, Pollitz et al. (2012) donde se presenta la velocidad transitoria promedio de las estaciones GNSS de esta red, incluidas seis nuevas estaciones instaladas en respuesta a la observación en el área del epicentro del sismo de 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah . De forma similar, Spinler y Bennett (2012) utilizan estimaciones de velocidad GNSS del Centro de Terremotos del Sur de California (SCEC) para modelar el campo de velocidad de la corteza del sur de California y el norte de Baja California, México, antes de que ocurriera ese sismo. Más recientemente, en la investigación de Gonzalez-Ortega et al. (2014) basada en datos de GNSS recopilados previamente por parte de la literatura citada anteriormente, se calculó el modelo de velocidad de la corteza intersísmica para el norte de Baja California, incluidos los primeros movimientos transitorios postsísmicos derivados del sismo mencionado. Niu et al. (2016) concluyen que la escala de tiempo del desplazamiento cosísmico estático muestra un impacto relativamente pequeño en los parámetros de la fuente en este sismo moderado. Las perturbaciones en los deslizamientos de fallas son menores a 20 cm, y menores a 0.1 en las magnitudes de momento. Kaftan y Melnikov (2017) muestran los resultados de las observaciones GNSS en áreas de tres grandes sismos (2014 Mw 6.1 Napa; 2010 Mw 7.2 El Mayor-

Cucapah; y 2004 Mw 6.0 Parkfield) se tratan y presentan en el artículo. La continuidad de estos estudios geodésicos en Baja California, respaldada por redes GNSS más recientes, ha contribuido significativamente a nuestra comprensión de la deformación en esta región sísmicamente activa. En este sentido hay un trabajo que refleja que una sismicidad en 2012 en el océano Índico pudo disparar una sismicidad en el Golfo de California (Johnson y Bürgmann, 2016).

2.6.2 Estudios en el Oeste de México

En la investigación realizada en el oeste de México, DeMets et al. (1995) y Melbourne et al. (1997) fueron pioneros en explorar la deformación vinculada a las fisuras sobre la placa de Rivera en subducción, abordando la evolución tectónica de Norteamérica continental. Utilizaron datos generados por la red de GNSS de Jalisco en funcionamiento continuo en México. En los trabajos de Hutton et al. (2001) y Melbourne et al. (2002) también emplearon datos de esta red para analizar la cinemática y dinámica cosísmica y postsísmica del sismo de 1995 Mw 8.0 Colima-Jalisco a lo largo de la Fosa Mesoamericana. Por otro lado, Brudzinski et al. (2007) exploraron, con datos sísmicos y de GNSS de 2003-2005, la posible relación entre sismos, temblores tectónicos y deslizamiento transitorio a lo largo de los 200 km al oeste de la zona de subducción de México. Sus resultados revelaron la primera evidencia de eventos de deslizamiento lento en la interfaz de subducción de la placa de Rivera. Cabe destacar que la estación CAYA, ubicada en la costa del Pacífico en Guerrero, operativa en 1997, permitió la detección inicial de fenómenos sísmicos silenciosos asociados a la Fosa Mesoamericana cerca de Guerrero (Lowry et al., 2001). Este fue inicialmente el propósito de la red GNSS de la UNAM (Kostoglodov et al., 2003), que tenía como objetivo estudiar las limitaciones geodésicas y sísmicas de deslizamiento en la costa de Guerrero en México (Larson et al., 2004). La red de la UNAM, con la estación YAIG en la región de Morelos instalada en 1998, tiene como objetivo investigar desplazamientos asociados con el evento de deslizamiento lento que comenzó entre mediados de noviembre y principios de diciembre de 2001 (Yoshioka et al., 2004).

La red GNSS OXnet, en Oaxaca, se estableció para estudiar la dinámica a lo largo del segmento mexicano de la Fosa Mesoamericana (Brudzinski et al., 2007; Brudzinski et al., 2010; Correa-Mora et al., 2009; Correa-Mora et al., 2008). Schmitt et al. (2007) propusieron un estudio geodésico más completo utilizando desplazamientos cosísmicos y réplicas de mediciones de GNSS para determinar las características del sismo del 22 de enero de 2003 (Mw 7.2) cerca de Tecomán, Colima. Una investigación reciente sobre el movimiento tectónico y la deformación intersísmica en el área de Jalisco con respecto a la placa de Norteamérica es presentada por Selvans et al. (2011) basado en mediciones de campañas de GNSS realizadas durante períodos entre 1998 y 2001.

En la red RGNA, estaciones como COL2 y OAX2 fueron empleadas para estudiar la dinámica de subducción en Colima y Oaxaca, respectivamente. Estas estaciones proporcionan la única restricción conocida sobre la velocidad y la dirección de la deformación en esas regiones (Márquez-Azúa et al., 2002). En el área de Guerrero, estudios sobre eventos de deslizamiento lento indican que los cambios de velocidad y deformación están correlacionados con la velocidad de deformación más que con la deformación (Rivet et al., 2014). La subducción de la placa de Rivera muestra variaciones, siendo casi perpendicular debajo de Colima a ~40 mm/año y volviéndose más oblicua y lenta hacia el noroeste (DeMets y Wilson, 1997). En el sureste, la placa de Cocos se subduce a ~50 mm/año, generando un movimiento entre las placas de Rivera y Cocos que se subducen debajo del margen continental (Brudzinski et al., 2016). Se han utilizado sismos repetidos de baja frecuencia para identificar eventos de deslizamiento transitorio repetitivo no observados previamente (Frank et al., 2015), revelando una interfaz de placa fuertemente acoplada donde ocurre el deslizamiento lento y el temblor. La interfaz de la placa donde ocurre el deslizamiento lento y el temblor está, de hecho, fuertemente acoplada y esa liberación sísmica lenta ocurre en un amplio espectro de escalas de tiempo (Frank, 2016).

Graham et al. (2014) estiman distribuciones de deslizamiento dependientes del tiempo y cambios en los esfuerzos de Coulomb para eventos de deslizamiento lento

entre 2005 y 2011. Castro Artola et al. (2017) desarrollan un método eficiente para obtener modelos simples de la distribución de deslizamiento en un plano de falla a partir de mediciones de GNSS continuas. Por otro lado, se han utilizado otras técnicas para estudiar los deslices lentos en la zona de Guerrero.

Cruz-Atienza et al. (2018) presentan la primera red anfibia sismogeodésica en suelos mexicanos y centroamericanos, revelando actividad reciente en la "Falla de La Venta" mediante sismómetros terrestres y de fondo marino, estaciones GNSS y manómetros de fondo marino, corroborada también por mediciones de GNSS (4–5 mm/año) (Gaidzik et al., 2016). El uso de acelerogramas, sismogramas y datos de sitios dispersos de GNSS continuo y GNSS en modo campaña, desplegados a lo largo de la costa del Pacífico de México, para estudiar la escala del desplazamiento horizontal máximo del suelo con el momento sísmico en la zona epicentral por encima del empuje de subducción mexicano (Singh et al., 2020). Otros estudios sobre deformaciones en la corteza en México han tomado los resultados obtenidos por GNSS de otros estudios (Rousset et al., 2017; Rousset et al., 2016) donde se estudian los eventos de deslizamiento lento en la zona de subducción, revelan fuertes variaciones a lo largo del rumbo en el acoplamiento superficial, con zonas de alto acoplamiento alternadas con zonas de bajo acoplamiento. El acoplamiento debajo del continente suele ser fuerte y pasa a un deslizamiento constante y desacoplado a una distancia relativamente uniforme de 175 km tierra adentro desde la fosa. También Suárez et al. (2019) presentan los resultados de una búsqueda sistemática de este tipo de sismos ocurridos dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano durante los últimos 450 años.

Los sismos más recientes ocurridos en México fueron estudiados por Sánchez y Drewes (2016) donde calculan un nuevo modelo continental de deformación continua de la corteza para América Latina y el Caribe a partir de mediciones GNSS (GPS + GLONASS) después de sismos en 2010 en Chile y en México en 2012 (Mw 7.4 Ometepc) y 2014 (Mw 7.3 Papanoa). Graham et al. (2014) relacionan eventos de deslizamiento lento con sismos, modelando mediciones de estaciones GNSS continuas. Y en el trabajo de Colella et al. (2017) se muestra que algunas estaciones

presentan un movimiento diferente dependiendo de la ubicación (eventos más rápidos al este, más rápidos cerca de la costa). Para el sismo de 2014 Mw 7.3 Papanoa (Gualandi et al., 2017) presentan el estudio de 21 estaciones GNSS continuas en México durante el intervalo de tiempo que va del 1 de octubre de 2013 al 31 de diciembre de 2014 y (Radiguet et al., 2016) sugiere que el sismo de Papanoa fue provocado por el evento de deslizamiento lento en curso. También se han estudiado otros sismos: 2017 Mw 7.1 Puebla (Cabral-Cano et al., 2018; Cruz-Atienza et al., 2020), 2017 Mw 8.2 Chiapas (Cabral-Cano et al., 2018; Cruz-Atienza et al., 2020; Guo et al., 2019) y Mw 7.2 Pinotepa (Bertiger et al., 2020; Cruz-Atienza et al., 2020; Tung et al., 2019) donde muestra que tres recientes sismos devastadores en México probablemente estén relacionados con 6 eventos de deslizamiento lento, describiendo una cascada de eventos que interactúan entre sí a escala regional a través de perturbaciones cuasi estáticas y/o dinámicas. Los resultados implican que la amenaza sísmica en grandes áreas pobladas es una función evolutiva a corto plazo de los procesos sismotectónicos que a menudo son observables. Cabral-Cano et al. (2018) proporcionan algunos ejemplos de resultados generados a partir de los productos TLALOCNet. Para aplicaciones de tierra-sólida, presentan soluciones de series temporales de posiciones diarias en escenarios tectónicos contrastantes y diferencias de desplazamiento en tiempo real para los sismos Mw 8.2 de Tehuantepec del 8 de septiembre de 2017 y Puebla de 7.1 Mw del 19 de septiembre de 2017 observados a partir de frecuencias de medición GNSS de 1 Hz que sirven como ejemplos del rendimiento de la red.

2.6.3 Estudios en todo México

Aunque han pasado casi 20 años desde el estudio de Márquez-Azúa y DeMets (2003), los conjuntos de datos continuos GNSS utilizados en estudios previos a escala regional eran limitados en comparación con las redes disponibles hoy en día, y el equipo y la monumentación para algunas de las redes no estaban diseñados para estudios de movimiento cortical. Bertha Márquez-Azúa llevó a cabo una serie de estudios que contribuyeron significativamente a nuestra comprensión de la dinámica de placas tectónicas y deformación en México y la región de la Placa del Pacífico. El

estudio de Márquez-Azúa y DeMets (2003) amplió esto al combinar datos GNSS de varias estaciones, revelando que las áreas al norte del Cinturón Volcánico Mexicano se mueven con la placa de Norteamérica, mientras que la Península de Yucatán se desplaza hacia el este, definiendo posiblemente un bloque independiente. El Cinturón Volcánico Mexicano mostró un deslizamiento mínimo. En el estudio de Márquez-Azúa et al. (2004), se confirmó que las regiones en México, al norte de Oaxaca se movían con la placa de Norteamérica, mientras que la Península de Yucatán mostraba movimiento hacia el este en relación con ella. Las islas Socorro y Clarión se alinean bien con las incertidumbres asociadas al movimiento de la placa del Pacífico, ofreciendo valiosos conocimientos adicionales sobre el movimiento de esta placa. En el último estudio, Márquez-Azúa y DeMets (2009) encontraron que el territorio continental de México se desplazaba con la placa de Norteamérica y experimentaba deformación intersísmica elástica. El trabajo también resaltó el movimiento alternante observado en estaciones cercanas a la zona de subducción mexicana y el impacto de terremotos significativos en los movimientos de las estaciones. Se pueden atribuir dos factores principales al movimiento observado en México. El primer factor lo relaciona con el movimiento de la placa de Norteamérica, mientras que el segundo factor asocia los movimientos con una combinación del movimiento de la placa y las consecuencias elásticas del acoplamiento por fricción a lo largo de la zona de subducción mexicana y las fallas en el Golfo de California.

Cabe señalar que el hecho de que la red RGNA no se haya diseñado para fines geofísicos podría ser una explicación sólida de por qué todas las antenas RGNA están montadas en un monumento de pilar de hormigón y colocadas en la parte superior de edificios con algunas estructuras ubicadas en el entorno de antena circundante generando un escenario potencial que contribuya a algunos efectos multitrayectoria locales (Vázquez et al., 2013).

En estudios realizados en el Océano Pacífico, se han determinado velocidades GNSS de las islas Clarión, Guadalupe y Socorro ubicadas sobre el fondo marino joven en la cuenca del Pacífico oriental con velocidades estimadas recientemente para 26 sitios de GNSS del fondo marino más antiguo en las partes central,

occidental y sur de la Placa del Pacífico para probar para la deformación dentro del interior de la Placa del Pacífico y estimar la viscosidad de la astenosfera debajo de la placa (DeMets et al., 2014a; DeMets et al., 2014b).

En su trabajo, Yu y Wang (2016) investigan la deformación actual del suelo en la región del Golfo de México, utilizando datos GNSS para analizar los desplazamientos tectónicos en esta área. Las posiciones y los vectores de velocidad de 161 estaciones continuas de GNSS se presentan con respecto a un marco de referencia local recientemente establecido, el Marco de Referencia Estable del Golfo de México (SGOMRF). En relación con la misma obra, Wang et al. (2020) han establecido un marco de referencia geodésico regional estable utilizando observaciones de larga duración (13.5 años en promedio) de 55 estaciones del GNSS operadas continuamente adyacentes al Golfo de México (GOM).

Se han realizado estudios sobre sismos ocurridos fuera del territorio mexicano, pero que tienen implicaciones o relaciones relevantes con el área de México debido a la interacción tectónica regional. Los resultados de dichos estudios prueban la presencia de deformaciones anómalas cerca de sus epicentros. Por ejemplo, Ellis et al. (2018) utilizaron mediciones GNSS de 215 sitios en el norte de América Central y el sur de México para estimar soluciones cosísmicas y de deslizamiento para los sismos de 2012 Mw 7.3 El Salvador, 2012 Mw 7.4 Guatemala, 2012 Mw 7.6 Costa Rica y 2009 Mw 7.3 Islas del Cisne. Zigone et al. (2012) estudiaron el desencadenamiento del evento sísmico de temblor y deslizamiento lento en Guerrero (México) por el Maule 8.8 Mw 2010 utilizando datos GNSS de (2007-2011). Kaftan y Melnikov (2017) utilizaron datos de GNSS durante 1-10 días, donde se obtuvieron las características de la deformación de la superficie terrestre antes, durante y después de los sismos de 2004 Mw 6.0 Parkfield y 2014 Mw 6.1 Napa.

2.7 Software de Procesamiento de Datos GNSS

La fase inicial del análisis de datos se lleva a cabo mediante la técnica PRE-GNSS. Este procedimiento tiene como objetivo estimar las coordenadas de las estaciones. Se emplea el software científico GAMIT, seguido por la generación de series de

tiempo a través del software GLOBK utilizando el filtro de Kalman. En conjunto, forman el paquete denominado GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2010) desarrollado en colaboración entre el MIT, CfA (*Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics*), SIO (*Scripps Institution of Oceanography*) y la ANU (*Australian National University*). Este paquete aborda la estimación de coordenadas y velocidades, representaciones estocásticas o funcionales de deformaciones post-sísmicas, retrasos atmosféricos, órbitas de satélites y parámetros de orientación terrestre.

2.7.1 GAMIT/GLOBK

GAMIT/GLOBK es un paquete integral de análisis GNSS de naturaleza científica. Su funcionalidad incluye la estimación de coordenadas y velocidades de estaciones, representaciones de pos-deformación sísmica, retrasos atmosféricos, órbitas satelitales y parámetros de orientación terrestre (Herring et al., 2018). GAMIT consta de programas que preparan los datos para su procesamiento, generan órbitas y rotaciones de referencia para satélites, interpolar valores específicos de tiempo y ubicación de modelos atmosféricos y de carga, calcular observaciones residuales y derivadas parciales de un modelo geométrico, y detectar valores atípicos. Por su parte, GLOBK opera mediante diversos programas y utiliza la técnica de filtrado de Kalman para estimar coordenadas y series de tiempo.

Para obtener estimaciones significativas del movimiento de la corteza, es imperativo definir un marco de referencia imponiendo restricciones a la solución. GAMIT aplica el método de Posicionamiento Relativo Estático para calcular las posiciones de las estaciones, desarrollando correcciones de datos de fase mediante observaciones de pseudo rango y mejorando la resolución de ambigüedad de fase entera. Posteriormente, GLOBK produce coordenadas de estación y series de tiempo utilizando la técnica de filtrado de Kalman.

GAMIT/GLOBK ha demostrado ser altamente efectivo en la generación de series de tiempo GNSS precisas. Este aspecto fue analizado por He et al. (2017), quienes realizaron una revisión exhaustiva del estado del arte en las metodologías utilizadas para obtener series de tiempo precisas y las principales fuentes de error asociadas.

En su estudio, compararon los resultados de GAMIT/GLOBK con los de GipsyX, encontrando una notable similitud en la precisión de las series de tiempo generadas, lo que resalta la robustez y confiabilidad de ambos sistemas en aplicaciones geodésicas. Sin embargo en dicho estudio se concluye que, al combinar las cuasi-observaciones de GAMIT y GIPSY, la media cuadrática ponderada se muestra una precisión ligeramente mejor que las soluciones individuales de GIPSY y GAMIT, lo que puede contribuir a mitigar la influencia de ruido aleatorio. Investigaciones de Cetin et al. (2019) concluyeron que, al aplicar factores de escala adecuados, tanto GAMIT/GLOBK como Bernese proporcionan estimaciones de error consistentes, demostrando que las discrepancias en las desviaciones estándar formales entre ambos programas pueden ajustarse para reflejar mejor los errores medios cuadráticos reales. Por otro lado, los experimentos de Wei y Liu (2014) sugieren que GAMIT posee una capacidad destacada para procesar líneas de base largas y proporciona resultados confiables con alta precisión. Este sólido desempeño confirma la confiabilidad de GAMIT/GLOBK en el procesamiento de datos GNSS para estudios geodésicos avanzados.

2.7.2 GipsyX

GipsyX es desarrollado por el JPL y mantenido por los grupos de Aplicaciones y Sistemas de Seguimiento Cercano a la Tierra (Bertiger et al., 2020). Reemplaza al software GIPSY-OASIS (Software de simulación de análisis de órbita y sistema de posicionamiento inferido GNSS). Este software se utiliza para analizar datos de sistemas globales de navegación y satélite (GNSS), que incluyen GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, QZSS e IRNSS. Sus aplicaciones abarcan el posicionamiento terrestre para la investigación geofísica, el estudio de la deformación de la Tierra y la tectónica de placas, redes GNSS, flujos de hielo, análisis climáticos a través de la observación de la troposfera y la ionosfera, establecimiento de marcos de referencia y parámetros de rotación terrestre, posicionamiento de aviones y determinación precisa de órbitas.

2.7.3 BERNESE

Además de las opciones de software libre como GAMIT/GLOBK y GipsyX, existen soluciones comerciales de alta calidad, como Bernese. Este paquete de software para el procesamiento de observaciones GNSS cumple con rigurosos estándares de calidad para aplicaciones geodésicas y otras basadas en GNSS. Ofrece compatibilidad con los sistemas GPS y GLONASS, y está preparado para el análisis de datos de sistemas emergentes como Galileo, BeiDou y QZSS (Dach et al., 2015).

CAPÍTULO 3

3. Materiales y métodos

En este trabajo se empleó el software GAMIT/GLOBK para implementar la técnica PRE-GNSS (Blewitt, 1989; Dong y Bock, 1989), estimando simultáneamente las líneas base entre todas las estaciones. Los datos de las estaciones, considerados diariamente en lotes individuales UTC, se procesaron en dos fases. En la primera etapa, se utilizó la técnica de posicionamiento relativo en las observaciones GNSS para estimar las coordenadas de las estaciones mediante GAMIT. Se aplicó una máscara de elevación de 10°, una tasa de muestreo de 30 segundos y una tasa de éxito en la resolución de ambigüedades del 95-99% en la mayoría de los casos. Las órbitas finales precisas del IGS, modelo libre de ionosfera, efecto multitrayectoria y modelos de carga oceánica se emplearon con conjuntos de datos de 24 horas. Además, para considerar la refractividad troposférica, se incorporó la Función de Mapeo Global (GMF) de Böhm et al. (2006) en GAMIT/GLOBK.

3.1 Esquema metodológico

La Figura 3.1 ilustra el esquema metodológico para el procesamiento y análisis de datos GNSS. Se empleó el software GAMIT/GLOBK para la técnica PRE-GNSS (Blewitt, 1989). Se procesaron datos de las Redes GNSS de medición continua en territorio mexicano, junto con estaciones de referencia ubicadas en placas estables y fuera de la red. Se seleccionarán estaciones GNSS ubicadas en México con un tiempo mínimo de 2.5 años de mediciones (Blewitt y Lavallee, 2002) y sin límite para la cantidad máxima de años de medición. Los datos GNSS se descargaron mediante servidores FTP, incluyendo observaciones de estaciones a procesar, estaciones de referencia, archivos de efemérides precisas (IGS) y globales de navegación (BRDC). Además, se realizó un análisis de calidad de las mediciones para análisis estadísticos posteriores.

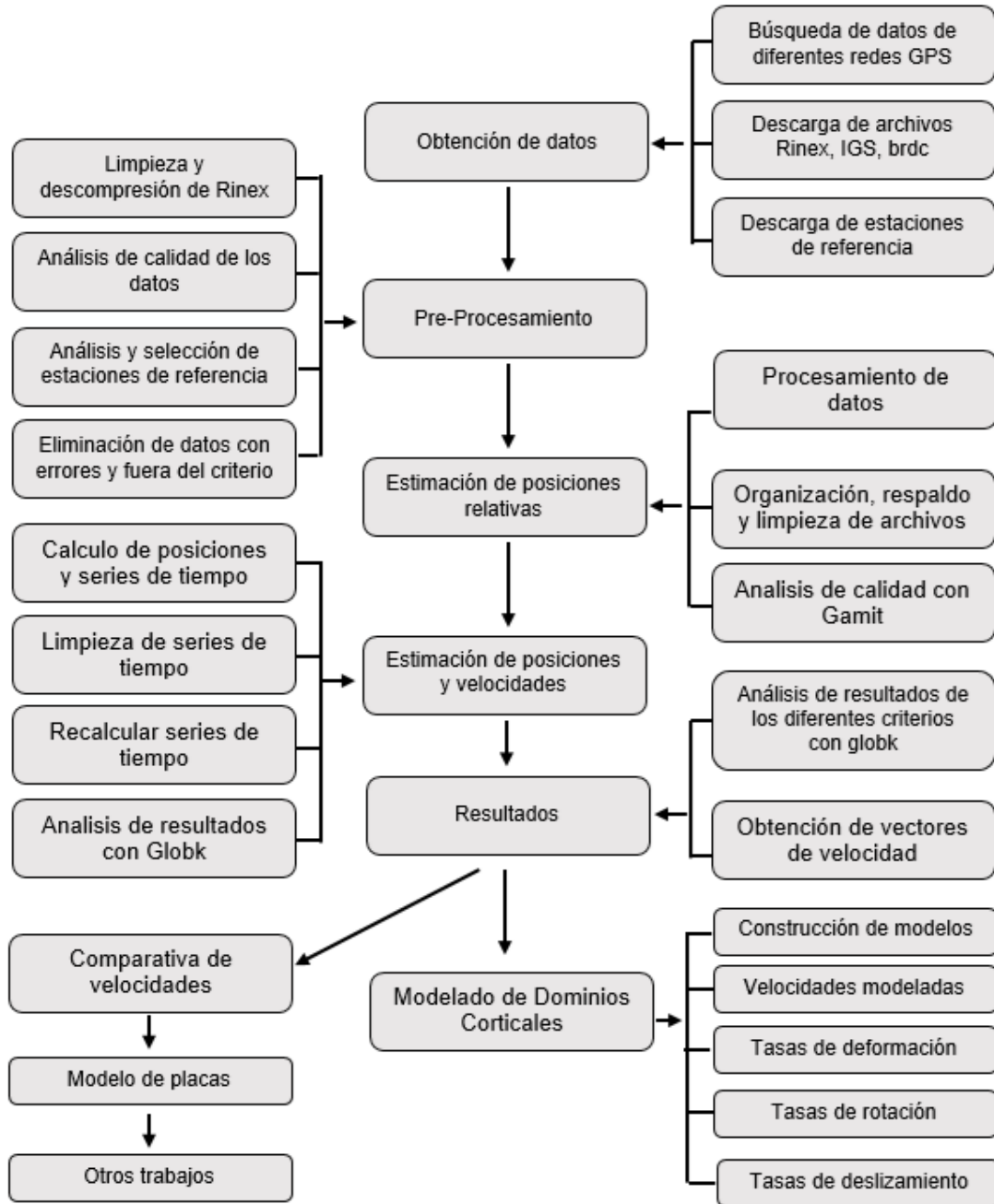


Figura 3.1. Esquema metodológico para el procesamiento y análisis de datos GNSS.

El procesamiento con el software científico GAMIT se ha llevado a cabo para obtener el posicionamiento relativo de las estaciones mediante la técnica de PRE-GNSS. Posteriormente, se han editado los archivos de comandos del software GLOBK y GLORG para procesar y obtener posiciones, generando así las series de tiempo. De

manera análoga, los datos se han procesado con el software GipsyX. Los resultados se han comparado entre las soluciones de GipsyX y GAMIT/GLOBK. Las series de tiempo se han corregido de valores atípicos mediante el programa tsvievw de MATLAB (Herring, 2003), aplicando filtros según sea necesario. El análisis final ha abordado la estabilidad de las estaciones, calidad de las mediciones, diferencias en ambientes tectónicos, modelos de tectónica de placas, periodos de tiempo y técnicas GNSS utilizadas.

3.2 Marco de referencia

Las coordenadas de las estaciones de las redes geodésicas GNSS se publican con respecto a un marco de referencia y en un momento específico. El marco de referencia utilizado para este trabajo es el ITRF2014 (Altamimi et al., 2017). Para establecer un marco de referencia estable, se incluyeron datos de 20 estaciones GNSS ubicadas fuera del área de estudio (Figura 3.2a). Este proceso implica minimizar las soluciones diarias en las coordenadas de un grupo de estaciones seleccionadas mientras se realizan ajustes de rotación, traslación y escala. Las series de tiempo resultantes se derivan de la combinación de soluciones diarias de estaciones sin deformación referidas a la placa de Norteamérica.

3.3 Automatización del procesamiento

Se automatizaron todos los pasos del procesamiento mediante scripts en bash de Linux y códigos en Python para gráficas y análisis estadístico. Las fases de preprocesamiento incluyen la limpieza y descompresión de archivos RINEX utilizando crx2rnx (Hatanaka, 2008) y TEQC. Se realizó un análisis de calidad para las estaciones de referencia y se eliminaron estaciones no deseadas. Para GAMIT, se ejecutó el procesamiento y se finalizó con la limpieza de archivos. Se realizaron análisis específicos de GAMIT y GLOBK. Para GLOBK, se procesaron las series de tiempo, velocidades y se realizaron gráficas del valor cuadrático medio ponderado (WRMS, por sus siglas en inglés: *Weighted Root Mean Square*), seguido de un análisis comparativo de estos valores.

3.4 Pre-Procesamiento

La estrategia de ajuste de red implicó la selección cuidadosa y aplicación del enfoque adecuado para procesar archivos RINEX de 94 estaciones GNSS México (Figura 3.2b). Los archivos, recolectados entre 1993 y 2023, fueron de receptores GNSS de doble frecuencia de grado geodésico. Estas estaciones forman parte de diversas redes operativas en México, como RGNA, PBO, CORS, COCONET, UNAM, JALISCO, OXNET, SCIGN y SNG. Los archivos de observación GNSS se presentaron en formato comprimido HATANAKA (Hatanaka, 2008) o RINEX comprimido con extensión ".d". Esta compresión fue realizada mediante crx2rnx. Previamente al procesamiento, los datos se analizaron con TEQC, que permite editar y corregir archivos RINEX, y verificar la calidad de los datos GPS/GLONASS. Para disminuir la carga de trabajo y evitar problemas en el software se estandarizó el intervalo de muestreo a 30 segundos y se limitó a observables L1, C1, L2, P2 y D1 de la constelación GPS. Esta decisión también responde al hecho de que no todas las estaciones GNSS procesadas soportan otras constelaciones ni disponen de observables adicionales. La estrategia de reducción del intervalo y exclusión de constelaciones adicionales se implementó para uniformar el tiempo de observación y reducir la carga de trabajo al procesar los datos.

Para hacer el análisis de calidad, los datos se procesaron con el software TEQC (*Test Editing and Quality Check*) (Estey y Meertens, 1999). Es importante tener las medidas en los mismos intervalos de muestreo, ya que estos pueden generar compensaciones en series de tiempo, además de reducir la carga de trabajo al procesar los datos. El intervalo de 30 segundos se eligió para estandarizar el tiempo de observación y reducir la carga de trabajo, además de que GAMIT solo procesa a 30 segundos. Las demás constelaciones fueron descartadas, manteniéndose únicamente el GPS, ya que la versión 6.10 de GAMIT/GLOBK, utilizada para el procesamiento de datos, no es compatible con todas las constelaciones disponibles.

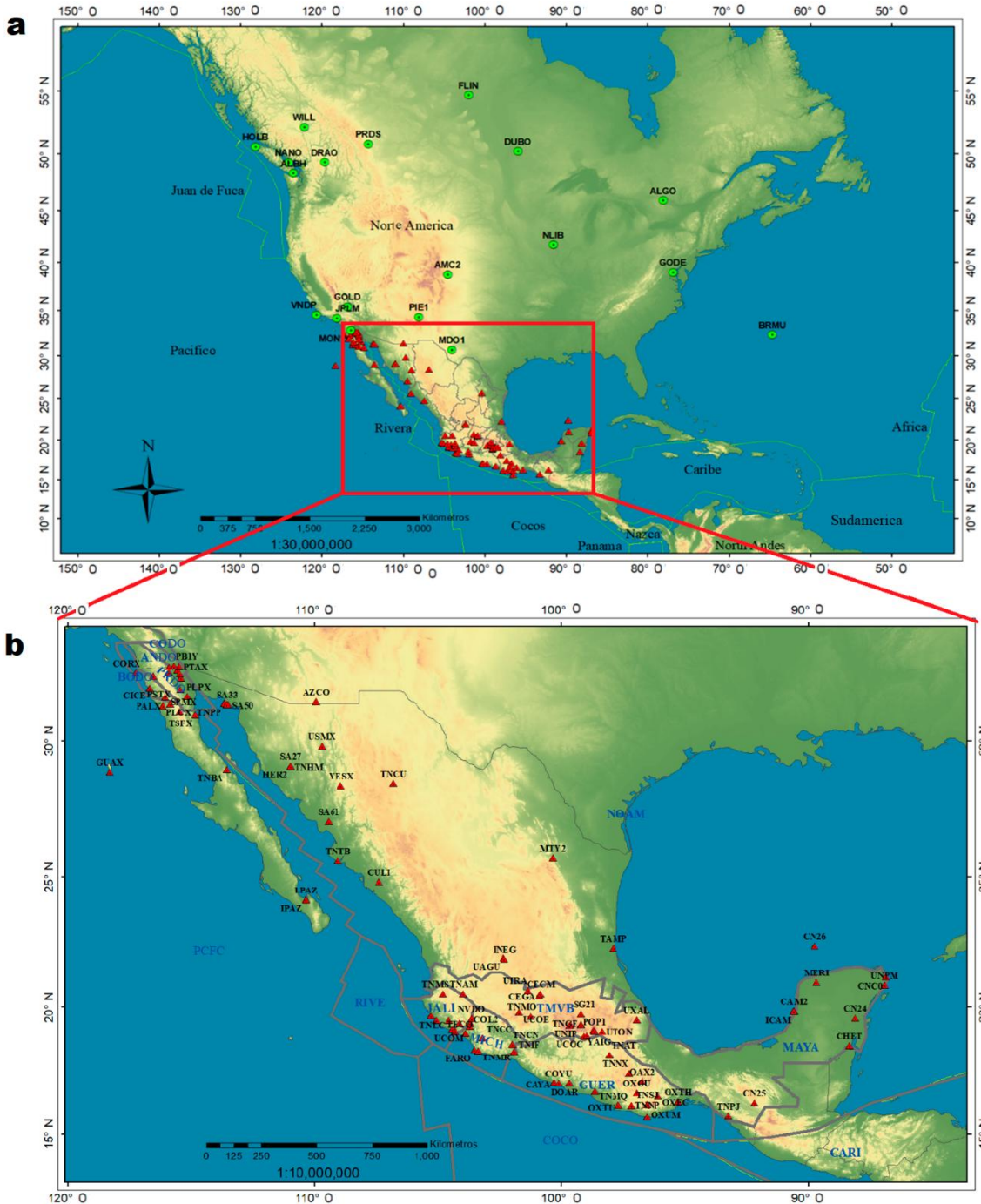


Figura 3.2. (a) Los 20 sitios de control (círculos verdes) en las placas tectónicas del Pacífico y Norteamérica. (b) Dominios corticales y 94 sitios GNSS seleccionados (triángulos rojos) fueron procesados para calcular la velocidad cortical regional en México.

3.5 Procesamiento de observaciones GNSS

Todas las estaciones GNSS que abarcan México se procesaron con respecto a 20 sitios IGS ubicados en las placas del Pacífico y Norteamérica. La selección de estos 20 sitios y el detalle de cómo fueron determinados se explica en la sección 4.2 de esta tesis. Para obtener estimaciones precisas del movimiento cortical en México mediante datos GNSS, este trabajo adoptó el marco de referencia NAM08. Esta elección garantiza coherencia en el procesamiento de los datos respecto a los sitios seleccionados del IGS. Por consiguiente, las coordenadas y velocidades, junto con sus respectivas desviaciones estándar, se emplearon como valores a priori para estos sitios.

Aparte de los archivos RINEX, el procesamiento requirió otros archivos esenciales, como efemérides BRDC, órbitas finales IGS y datos del directorio de tablas.

Una vez obtenidos los datos y el tratamiento previo de los mismos, se creó el directorio del proyecto, organizándose en directorios y subdirectorios. El resto de los archivos y directorios se generaron automáticamente durante el procesamiento. Usando `sh_setup` se creó el directorio de tablas que ahora contiene copias de los archivos estándar `gg/tables` (`process.defaults`, `sestbl`, `Station.info`, `autcln.cmd`, `sites.defaults` y `sittbl`).

Una vez que se obtuvo la actualización `station.info`, las soluciones diarias se obtuvieron con `sh_gamit` donde se produce la solución denominada "solución débilmente restringida" junto con diagramas de cielo de datos de fase como registro del procesamiento.

Se editaron los archivos en `/gsoln` que son: `globk_comb.cmd` para proporcionar la entrada para `glred` y `glorg_comb.cmd` para especificar qué sitios se utilizarán para definir el marco de referencia.

El archivo de script `glorg` (`glorg_comb.cmd`) controla las acciones de `GLOBK` para definir los parámetros de la fuente de traducción y rotación. Permite definir el marco de referencia de la solución después de que `GLOBK` haya combinado los datos e imponer otras restricciones a la estación.

La duración del procesamiento de datos para todo el periodo de procesamiento con GAMIT es de aproximadamente 3 semanas. El siguiente paso de procesamiento con GAMIT es el uso de GLOBK donde se realizaron los cálculos de posición y velocidad de las estaciones. Primero, se usó sh_glred, que usa los resultados de GAMIT para producir series de tiempo del día a día o archivos -h combinados que se pueden combinar con otras horas para estimar las velocidades de la estación.

La estabilización de todos los archivos -h se verificó mediante el comando “grep 'POS STAT' * .org” y finalmente se generaron los archivos para graficar la serie de tiempo de las posiciones con el comando en la forma “glred 6 globk_rep.prt globk_rep.log exme.gdl globk_long.cmd” y velocidades con el comando “globk 6 globk_vel.prt globk_vel.log exme.gdl globk_long.cmd VEL” donde el “6” indica el número de parámetros a obtener en la estabilización (traslación y rotación en x, y, z). Para grandes redes geodésicas GNSS, particularmente aquellas que incluyen estaciones permanentes con discontinuidades y movimientos no lineales debido a sismos, las herramientas tsview y velview (Herring, 2003) pueden ser herramientas bastante útiles.

3.6 Construcción del modelo de bloques

Para caracterizar la deformación activa dentro y entre los diversos bloques en México, se construyó un modelo elástico de bloques, como se muestra en la Figura 3.3, donde se delimitan las principales fronteras de placas en México: PCFC (Placa del Pacífico), NOAM (Placa de Norteamérica), RIVE (Placa de Rivera), COCO (Placa de Cocos) y CARI (Placa del Caribe). El bloque de Yucatán es parte del Dominio Maya (MAYA), también descrito como el terreno maya por Campa y Coney (1983). Los modelos pueden explicar las estructuras anómalas en el bloque de Yucatán que colisionó con México en el Mioceno (Kim et al., 2011; Pindell et al., 2006). El Dominio de Jalisco (JALI) y el Dominio de Michoacán (MICH) están separados por una zona de deformación desde la falla de Colima y cerca de esos dominios, al sureste de MICH, se encuentra el Dominio de Guerrero (GUER) (Godínez-Tamay et al., 2020;

Johnson y Harrison, 1990; Rosas-Elguera et al., 2003; Rosas-Elguera et al., 1996; Sawires et al., 2021).

Otra área que se utilizó para el modelado de dominios es el Cinturón Volcánico Transmexicano (TMVB). El TMVB tiene un ancho que varía entre 90 km y 230 km y no es paralelo a la trinchera de América Central, según lo descrito por Ferrari et al. (2012). Incluimos el Dominio Coachella, el Dominio Anza, el Dominio de Sierras Peninsulares y el Dominio de Tierras Fronterizas según Spinler et al. (2015).

El énfasis principal de nuestro estudio es explorar el patrón y la amplitud de la deformación entre estos dominios corticales, especialmente aquellos en el interior de México. Sin embargo, para evaluar esta deformación difusa, también debemos tener en cuenta la deformación rápida a lo largo de las regiones costeras, y dentro del Golfo de California y la Depresión de Salton. Como mostraremos, la señal elástica de deformación asociada con las principales estructuras de las fronteras de placas afecta una amplia área de México.

3.7 Modelado de dominios corticales

Para modelar las rotaciones y la deformación interna de dominios corticales, así como la profundidad de bloqueo en las fallas y fuentes transitorias como deslizamientos lentos, se utilizó TDEFNODE (McCaffrey, 2009). Este programa se basa en las formulaciones de (Okada, 1985), calculando la deformación en un semiespacio elástico homogéneo, tanto dependiente del tiempo como estático.

TDEFNODE se empleó para estimar un modelo cinético elástico que mejor se ajustara a las velocidades de los 94 sitios GNSS utilizados en esta tesis. Al integrar las velocidades GNSS observadas, se modelaron las interacciones entre distintos dominios corticales imaginados como polígonos limitados por fallas o bordes libres, invirtiéndolos para cuantificar sus movimientos relativos, rotación, deslizamiento y tasas de deformación. El estudio se enfocó en comprender el movimiento cortical intersísmico, destacando las profundidades de bloqueo de las fallas y su impacto en las discrepancias observadas en los datos. Se consideraron también complejidades

en regiones de límites de placas como lo son el límite convergente y el límite transformante. La rotación de los dominios corticales se condicionó a la rotación de la Tierra y al deslizamiento intersísmico a lo largo de los límites de las fallas (Meade y Hager, 2005). Se emplearon datos GNSS y tasas de deslizamiento de fallas para modelar desplazamientos superficiales, siendo la velocidad de cualquier punto en la superficie terrestre la suma de la rotación rígida del dominio y la velocidad de deformación resultante.



Figura 3.3. *Dominios Corticales en México.*

Inicialmente, se probaron modelos con profundidades de bloqueo de 10 km para las fallas en el límite transformante y 200 km en el límite convergente. Luego, se variaron las profundidades de bloqueo de algunas fallas para conciliar discrepancias con los datos observados. El modelo mejor ajustado incorpora profundidades de bloqueo de 5 km para las fallas en el límite transformante y de 20 a 400 km en el límite convergente.

La técnica de evaluación basada en el chi-cuadrado reducida se utilizó debido a su capacidad para medir la calidad del ajuste entre los datos observados y los predichos por el modelo, teniendo en cuenta tanto las incertidumbres de los datos como la complejidad del modelo. Cada vez que se calcula el modelo utilizando TDEFNODE se obtiene un valor de chi-cuadrada el cual representa el grado de ajuste del modelo a los datos observados y permite evaluar si las discrepancias entre las observaciones y las predicciones se explican adecuadamente por los errores inherentes a los datos y las limitaciones del modelo. La estadística de chi-cuadrada está dada en la Ecuación 3.1 donde r es el residual, s es la desviación estándar, F es el factor de escala recién descrito, y dof son los grados de libertad. La SUMA es sobre todos los datos.

$$\chi_n^2 = \left[\sum \frac{r^2}{(sF)^2} \right] / dof \quad (3.1)$$

El modelado tuvo como objetivo minimizar las discrepancias en los datos de velocidad cortical, lo que dio lugar a un modelo preferido con un desajuste cuadrático medio normalizado (RMS) de 2.991. Este valor sugiere que existe una incertidumbre significativa en los datos de velocidad, lo que indica la posibilidad de mejorar aún más el modelo. Se utilizaron polígonos para representar dominios en una zona de estudio. Cada punto dentro de un dominio rota a una velocidad angular constante, a menos que sea modificado por la deformación elástica proveniente de porciones bloqueadas de fallas o se permita que los dominios se deformen internamente según un campo de tasas de deformación constante, en cuyo caso la velocidad en un punto es la suma de la rotación rígida del dominio y la velocidad de deformación resultante. Todos los puntos dentro de una placa giran alrededor del polo de Euler a una velocidad angular constante, medida en grados o radianes por millón de años. Las zonas delimitadas en el modelo de dominios coinciden en su mayoría con las fallas presentes en la zona de estudio, pero algunos límites de dominio no corresponden con las zonas de falla mapeadas, a estos límites se les llama pseudo fallas o bordes libres, los cuales son utilizados en TDEFNODE para cerrar los límites de los dominios.

CAPÍTULO 4

4. Análisis de errores

4.1 Análisis de calidad de las observaciones GNSS

En esta sección, se detalla la primera fase del análisis de errores, centrada en la aplicación de TEQC para evaluar la calidad de los datos GNSS. La herramienta TEQC realiza una exhaustiva verificación de la calidad, calculando diversas métricas de los datos de entrada y señalando problemas en los observables GNSS almacenados.

Para identificar las estaciones más adecuadas para el procesamiento y filtrado de datos, se emplearon cuatro indicadores establecidos por el IGS¹⁶: relación señal-ruido, efecto multitrayectoria, número de observaciones por ciclo y porcentaje de observaciones. A partir del informe generado por TEQC, se seleccionaron seis parámetros específicos: dos relacionados con la relación señal-ruido (SN1, SN2), dos asociados al efecto multitrayectoria, uno correspondiente a las observaciones por ciclo y otro al porcentaje de observaciones.

SN1 y SN2: Los archivos de gráficos SN1, SN2 de TEQC contienen relaciones de señal a ruido (SNR), un dato observable informado por la mayoría de los receptores GNSS. SNR es una relación entre la potencia de la señal y el ruido de fondo de la observación GNSS, y se utilizan para comparar la intensidad de la señal entre canales y entre satélites, y para evaluar la interferencia. SNR también se puede utilizar para mapear el entorno de trayectos múltiples alrededor de una antena, para estimar parámetros de trayectos múltiples variables en el tiempo y puede ser una forma de eliminar errores de trayectos múltiples de los datos de fase.

¹⁶<https://igsorg.zendesk.com/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>

MP1 y MP2: Los archivos de trazado .m12 y .m125, .m21 y .m51 de Teqc contienen valores de las combinaciones de rutas múltiples. M12 y M21 son combinaciones lineales de las observaciones de pseudodistancia y fase portadora, que indican la "multitrayectoria de pseudodistancia L1" para observaciones C/A o código P, y la "multitrayectoria de pseudodistancia L2" para observaciones de código P.

OPC: *Observations per-slip*, "Observaciones por ciclo" (o/slps) combina "observaciones" que significa "observaciones completas" (por encima de la máscara de elevación si qcfull), con el número de "deslizamientos". Un "deslizamiento" significa un deslizamiento de IOD y/o deslizamientos de MP1 y MP2 ocurridos durante una época que tiene una observación completa para este SV. El valor o/slps es la relación, normalmente unos pocos cientos o más.

POR: El número de observaciones posibles por encima de la máscara de elevación, el número de observaciones completas, la relación entre las observaciones completas y las posibles como porcentaje. Cuántos observables posibles en total estaban por encima de la máscara de elevación horizonte que se encuentra a 0 grados de elevación (depende de la cantidad de SV disponibles).

Los criterios de selección establecidos para determinar las estaciones GNSS más adecuadas para el procesamiento y análisis de datos se definieron cuidadosamente con base en parámetros clave que garantizan la calidad de las observaciones. Estos criterios son los siguientes:

Relación señal-ruido: Un valor mínimo de 4.46 de SN1 y 2.30 de SN2 fueron utilizados como criterio.

Multitrayectoria: Los valores de multitrayectoria se limitaron a un máximo de 1.08 para MP1 y 1.136 para MP2.

Observaciones por ciclo: Se estableció un criterio de menos de 1/1000. Un valor bajo refleja estabilidad en las observaciones y asegura que las interrupciones en la señal sean mínimas, mejorando la calidad general de los datos procesados.

Porcentaje de observaciones: Un valor mínimo del 95% fue requerido. Este indicador mide la proporción de observaciones completas respecto al total de observaciones posibles por encima de la máscara de elevación

Como se observa en la Figura 4.1 se muestran las gráficas del resultado del análisis de calidad para HER2 ubicada en Hermosillo, Sonora, además de incluir el multitrayectoria de la estación de referencia AMC2 ubicada Colorado, Estados Unidos, donde se observa que tiene una multitrayectoria muy alto en comparación de HER2. Para excluir este tipo de estaciones que tengan valores muy elevados en comparación con el resto se utilizaron las recomendaciones del IGS¹⁷ donde estableció que no se utilizaran los datos que obtuvieran valores menores del 95% del porcentaje de observaciones o menos y que no se obtengan menos de 1000 observaciones por ciclo. Sin embargo, dado que el IGS recomienda mantener valores de relación señal-ruido lo más bajos posibles sin especificar un umbral exacto, y que los criterios establecidos por el IGS para multitrayectoria (< 0.3 m) resultan demasiado estrictos para los datos disponibles en este análisis, se optó por emplear la estadística de 3 sigma como un criterio alternativo para ambas medidas. El enfoque de 3 sigma permite identificar valores extremos de manera robusta, ya que captura aproximadamente el 99.7% de los datos en una distribución normal. Esto asegura que se excluyan únicamente los valores que realmente se desvían significativamente del comportamiento general de las estaciones, evitando la exclusión excesiva de datos útiles que podrían estar dentro de un rango aceptable para este estudio. De esta manera, el criterio estadístico aplicado se ajusta mejor a las características específicas de los datos analizados, manteniendo un balance entre calidad y cantidad de observaciones.

¹⁷<https://igsorg.zendesk.com/hc/en-us/articles/202011433-Current-IGS-Site-Guidelines>

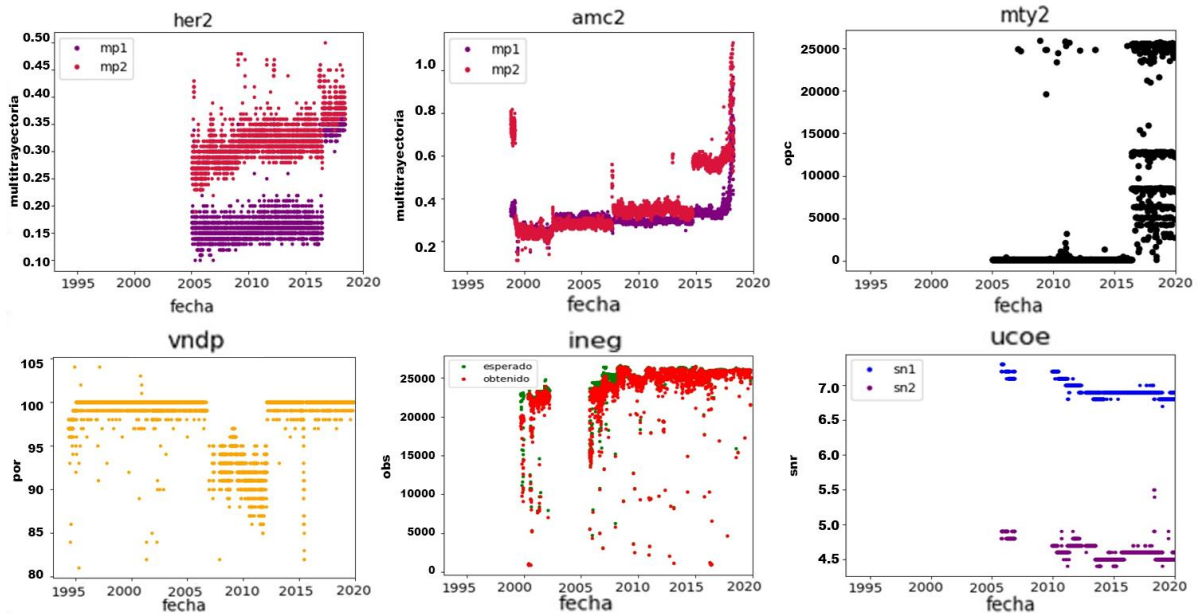


Figura 4.1. Gráficas del análisis de calidad de las señales GNSS para las estaciones HER2, AMC2, MTY2, VNDP, INEG y UCOE.

Para disminuir la carga de trabajo se procesaron los datos por “cores” con menos 80 estaciones por grupo de estaciones, además de utilizar más de 15 estaciones de referencia para que estos fueran procesados. Para este caso, 26158 datos fueron eliminados por archivos erróneos, 40114 datos se eliminaron bajo el criterio de selección detallado más adelante, con un total de 404643 archivos de observación para procesarse. Con lo cual resultó en un 9.019% de datos eliminados bajo criterio de selección, de los cuales se eliminaron esos sitios que no cumplieran con el criterio y se utilizaron 94 de las 154 estaciones a procesar para todos los años.

4.2 Selección de estaciones de referencia

Para definir las estaciones de referencia utilizadas en el marco ITRF2014, referido a la Placa de Norteamérica, se consideraron varios criterios clave. Todas las estaciones debían pertenecer a la red IGS y la mayoría debían estar ubicadas en la parte estable de la placa de Norteamérica. Según la documentación de GAMIT/GLOBK el enfoque más simple y robusto para la realización de marcos, para todas las redes excepto las más pequeñas, es incorporar a su solución 10 o más

sitios cuyas coordenadas están incluidas con pequeñas incertidumbres en el apr-file del Marco ITRF más reciente.

Para esto se consideraron todas estaciones IGS globales pertenecientes al IGS14, seleccionándose finalmente las 20 mejores, priorizando aquellas con datos completos para todos los días del año para tener un equilibrio óptimo entre la robustez del modelo y la practicidad del procesamiento. Un mayor número de estaciones de referencia mejoraría la estabilidad del marco de referencia pero incrementaría significativamente la complejidad y el tiempo de procesamiento, seleccionar una menor cantidad reduciría la estabilidad del marco. La elección de 20 estaciones de referencia responde a un análisis que prioriza la calidad, estabilidad y eficiencia del modelo, garantizando que los resultados sean precisos, consistentes y manejables desde el punto de vista computacional y geodésico. La selección de las estaciones de referencia incluyó el cálculo de la proximidad entre las estaciones procesadas y la red, utilizando las coordenadas aproximadas de las estaciones y las a priori del ITRF. Además, se utilizaron parámetros como el valor medio cuadrático ponderado y el número de interrupciones, extrayendo esta información de la página de series de tiempo de la NASA¹⁸. Estos parámetros se estandarizaron y ponderaron para integrar múltiples indicadores de calidad en un análisis unificado.

Finalmente, se sumaron los valores ponderados por estación y se ordenaron para identificar las 20 más confiables. Se priorizó la cercanía a la red y la disponibilidad de mediciones, mientras que factores como el menor número de interrupciones y mejores valores de precisión ponderada fueron secundarios. La metodología aplicada aseguró que los parámetros utilizados no influyeran desproporcionadamente en los resultados al ser normalizados y ponderados de manera uniforme, siguiendo la Ecuación (4.1 para determinar valores óptimos.

$$Valor = \frac{Dist * WRMS * Breaks * Dias * Calidad}{diasposiblesdemedicion} \quad (4.1)$$

¹⁸<https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>

4.3 Análisis de calidad del procesamiento con GAMIT

Según la documentación de GAMIT/GLOBK, existen tres criterios principales que deben emplearse para evaluar la calidad del procesamiento de fase y determinar si ha arrojado resultados satisfactorios:

1. **Inclusión de todos los datos esperados:** Verifique que el "Total de archivos x" coincida con el número de archivos sin procesar o RINEX disponibles. Si el "Número de estaciones utilizadas" es menor que el total de archivos x, algunos archivos x pueden haber sido creados pero luego descartados debido a su tamaño o a exclusiones mediante opciones como `xsite` en `sites.defaults` o la línea de comando `sh_gamit`.
2. **Ajuste de datos al modelo y niveles esperados:** Utilice el archivo `summary` de GAMIT para evaluar los indicadores de calidad de los datos. El bloque de líneas que comienza con "RMS" proporciona información sobre los residuales de la raíz cuadrática media unidireccional por satélite y estación. Valores entre 3-5 mm son típicos para los mejores sitios, mientras que valores entre 7-9 mm pueden indicar problemas. Valores superiores a 15 mm sugieren problemas de seguimiento, multitrayectoria elevada o condiciones climáticas extremas.
3. **Incertidumbres pequeñas:** El archivo de `summary` también incluye el rms normalizado, que debería ser cercano a 0.2 con la ponderación actual de las observaciones de fase. Además, el porcentaje de ambigüedades de *wide-lane* (WL) o carril amplio y *narrow-lane* (NL) o carril estrecho resueltas es crucial. Más del 90% de las ambigüedades de carril amplio deberían resolverse, mientras que el porcentaje de carril estrecho resueltas depende de varios factores y un valor inferior al ~80% podría indicar deficiencias.

La verificación final del procesamiento de acuerdo a la documentación de GAMIT/GLOBK se realiza mediante las series de tiempo generadas por `sh_glred` como archivos `psbase` en `/gsoln`. En la iteración final, se espera que al menos tres sitios estén en la estabilización, con una raíz media cuadrática en el rango de incertidumbres (1-5 mm). Los valores de la raíz media cuadrática normalizada

(NRMS, por sus siglas en inglés: *Normalized Root Mean Square*) y media cuadrática ponderada también deben cumplir con criterios específicos los cuales son dados por las ecuaciones 4.2 y 4.3 donde *WRMS* es la Media cuadrática ponderada, *NRMS* es la Media cuadrática normalizada, *n* es el número de días acumulados, *V* es la matriz de los residuos y *P* es la matriz de los pesos.

$$NRMS = \sqrt{\frac{V^{-1}PV}{n-1}} \quad (4.2)$$

$$WRMS = NRMS \sqrt{\frac{n}{\sum P}} \quad (4.3)$$

4.4 Limpieza de series de tiempo e implementación de modelos

El software **tsview** empleado en esta investigación permite la visualización, manipulación y evaluación de series de tiempo a partir de los archivos de salida generados por las ejecuciones de **GLRED**. Además, facilita la creación de archivos de control para **GLOBK**, diseñados para eliminar estimaciones incorrectas de las posiciones de los sitios y registrar de manera adecuada los saltos presentes en las series de tiempo (Herring, 2003). Como salida de **tsview** se extrajeron los valores de velocidades, RMS e incertidumbres. Para obtener series de tiempo limpias se ha eliminado cualquier estimación de las posiciones con un error máximo de 20 mm y con un criterio de rechazo automático de valores atípicos de 3 Sigma utilizado en una corrección. Además, se modelaron los efectos de las señales anuales y semianuales, las cuales se caracterizan por su estabilidad y oscilación de forma constante en forma de ondas sinusoidales.

Para abordar el impacto ruido en largos periodos de tiempo en los sitios GNSS, se utilizó la metodología descrita en la documentación de GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2018), que recomienda la aplicación del algoritmo 'sigma realista' para evaluar los efectos del ruido de caminata aleatoria. Este enfoque consiste en utilizar la Extrapolación de Gauss-Markov de Primer Orden (FOGMEX) para determinar los

valores adecuados de caminata aleatoria para cada componente, especialmente para sitios con aproximadamente 100 o más días de estimaciones de posición. Esta metodología está diseñada para tener en cuenta el ruido de largo período. Garantiza una evaluación integral de las incertidumbres en nuestras estimaciones de velocidad. Los residuos de las series de tiempo para el ajuste de los datos se promedian en intervalos cada vez más largos y se calcula la χ^2 por grado de libertad de los valores promediados.

Para la mayoría de series de tiempo, el valor de chi-cuadrada por grado de libertad (Ecuación 4.4) tiende a aumentar con el incremento del tiempo promedio (Herring, 2003). Esto contrasta con un proceso de ruido blanco, en el cual el valor permanecería constante. La tasa de incremento de χ^2/dof se utiliza para estimar el tiempo de correlación de los residuos en cada componente de coordenadas. Este proceso se lleva a cabo calculando el aumento de chi-cuadrada por grado de libertad al promediar sucesivamente periodos de tiempo más largos de los residuos.

$$chi\ cuadrada\ por\ grado\ de\ libertad = \frac{\chi^2}{dof} \quad (4.4)$$

Para la identificación de breaks en los datos, se utilizó información proveniente de los archivos log de las estaciones, especialmente en casos donde se detectaron cambios de equipo. Además, se consideraron los registros de sismos cercanos a las estaciones, los cuales fueron obtenidos del USGS (United States Geological Survey). Aunque los eventos sísmicos también podrían identificarse a través de los archivos *eq_files*, se optó por esta metodología adicional para asegurar que los breaks observados fueran efectivamente el resultado de un cambio de equipo, y no de eventos sísmicos que pudieran haber alterado los datos. De los archivos log fue extraída información de la sección “*GNSS Receiver Information*” y el “*Date Installed*” para conocer la fecha del cambio de equipo. Para el caso de la obtención los efectos cosísmicos se utilizaron datos de sismos que tuvieran un margen de al menos 100 días de diferencia respecto a la fecha de medición. Sismos que ocurrieron más allá de esos 100 días no fueron considerados como breaks. Este criterio se definió para limitar los efectos cosísmicos más relevantes y reducir la influencia de eventos post-

sísmicos de larga duración que puedan solaparse con otros fenómenos geodésicos o sesgar las mediciones. Sin embargo, eventos post-sísmicos de gran magnitud pueden ser incorporados en estudios específicos de deformación prolongada, lo que podría considerarse como un análisis complementario en futuras investigaciones. Sin embargo, eventos post-sísmicos más allá de los 100 días no se incluyeron porque el enfoque principal se centró en los efectos inmediatos. Tampoco se consideraron aquellos que estuvieran fuera de los máximos y mínimos de las fechas de medición de los datos. Se tomaron en consideración aquellos sismos menores a una distancia respecto a la estación menor a 200 Km con una magnitud mayor de 5.5 Mw y menor de 7 Mw, para los sismos con magnitudes mayores o iguales a 7 Mw como son aquellos con mayor influencia en las series de tiempo se tomó como máximo una distancia mayor, que es de 800 Km. Una vez obtenidas las fechas de los breaks, estas fueron introducidas al tsview como archivo "*globk earthquake file*" y este considere los breaks automáticamente. Para determinar correcciones precisas de posición intersísmica, se utilizó la herramienta tsview para seleccionar terremotos que cumplieran con criterios específicos: aquellos con magnitudes mayores a 5.5, que abarcaban el período de medición utilizado y que detectamos en las series de tiempo. Después de seleccionar estos terremotos, se tomaron medidas para eliminar sus señales de las series temporales. Este proceso de eliminación de señales tenía como objetivo mejorar la visibilidad de las fases post-sísmica e inter-sísmica dentro de los datos de series temporales. Empleamos funciones de ajuste para modelar una función que describe las velocidades del perfil, determinadas por la acumulación de deformación cosísmica a lo largo de una falla de deslizamiento lateral bloqueada. El ajuste exponencial nos permite definir con precisión una curva exponencial que representa una ruptura durante un evento sísmico. El desplazamiento estimado es la deformación cosísmica, mientras que el término exponencial es el movimiento post-sísmico acumulado.

CAPÍTULO 5

5. Resultados y análisis

5.1 Calidad del procesamiento con GAMIT/GLOBK

Como resultado del procesamiento de todos los años con 94 estaciones se tuvo lo siguiente:

- La raíz media cuadrática posterior estuvo en el nivel esperado para las incertidumbres con un promedio de 5 mm.
- Con la ponderación actual de las observaciones de fase, en promedio se obtuvo un valor de 0.268.
- Alrededor del 91.41% de las ambigüedades de carril amplio fueron resueltas.
- Aunque si hubo porcentaje de ambigüedades de carril estrecho inferior al 80% este en promedio fue de 86.5 %.
- Los mejores valores de raíz media cuadrática en promedio fueron alrededor de 11 mm y los peores de 13 mm.

La definición del marco de referencia, ya sea a través de estabilización o filtrado espacial, se logra en el software GLORG al especificar un conjunto de sitios con coordenadas conocidas a priori. Estos sitios sirven para definir el marco y los parámetros a estimar, minimizando así los ajustes de coordenadas. La calidad de la estabilización se verifica inicialmente para cada época mediante estadísticas obtenidas con 'POS STAT' en los archivos .org.

Se consideró el análisis con POS STAT, pero se advierte que la selección de estaciones con mejores valores de la media cuadrática ponderada influye significativamente en el resultado. La calidad de la estabilización se mide mediante NRMS, donde valores cercanos a la unidad en los tres componentes indican una estabilización adecuada (ENU = 1.25, 1.11, 0.90). Además, el valor medio cuadrático ponderado debe situarse entre 1 y 2 mm en horizontal (EN = 1.71, 1.63) y de 3 a 10 mm en vertical (U = 4.5). Estos parámetros son fundamentales para evaluar la

calidad de la solución y garantizar la fiabilidad de los resultados obtenidos en el procesamiento de las estaciones GNSS.

5.2 Series de tiempo y velocidades

En este segmento del análisis, se empleó GLOBK para la generación de series de tiempo de coordenadas, integrando soluciones diarias de GAMIT. Se logró una alineación con el Marco de Referencia Terrestre Internacional, específicamente ITRF2014, mediante la restricción de coordenadas y velocidades de 20 sitios de la IGS. Estos sitios, ubicados en las placas del Pacífico y Norteamérica, sirvieron como puntos de referencia esenciales para asegurar la consistencia del marco de referencia. La rotación de la solución de velocidad de ITRF14 al marco NAM08, basada en el vector de Euler proporcionado por Altamimi et al. (2017), contribuyó a una interpretación más precisa de las estimaciones del movimiento cortical en México. La Figura 5.1 ofrece una representación integral de los datos de series temporales, mostrando ejemplos representativos de cada uno de los dominios corticales examinados en nuestro estudio. Esta figura muestra las componentes norte (n), este (e) y vertical (u), ilustrando eficazmente la variación temporal de cada estación a lo largo de los períodos observados.

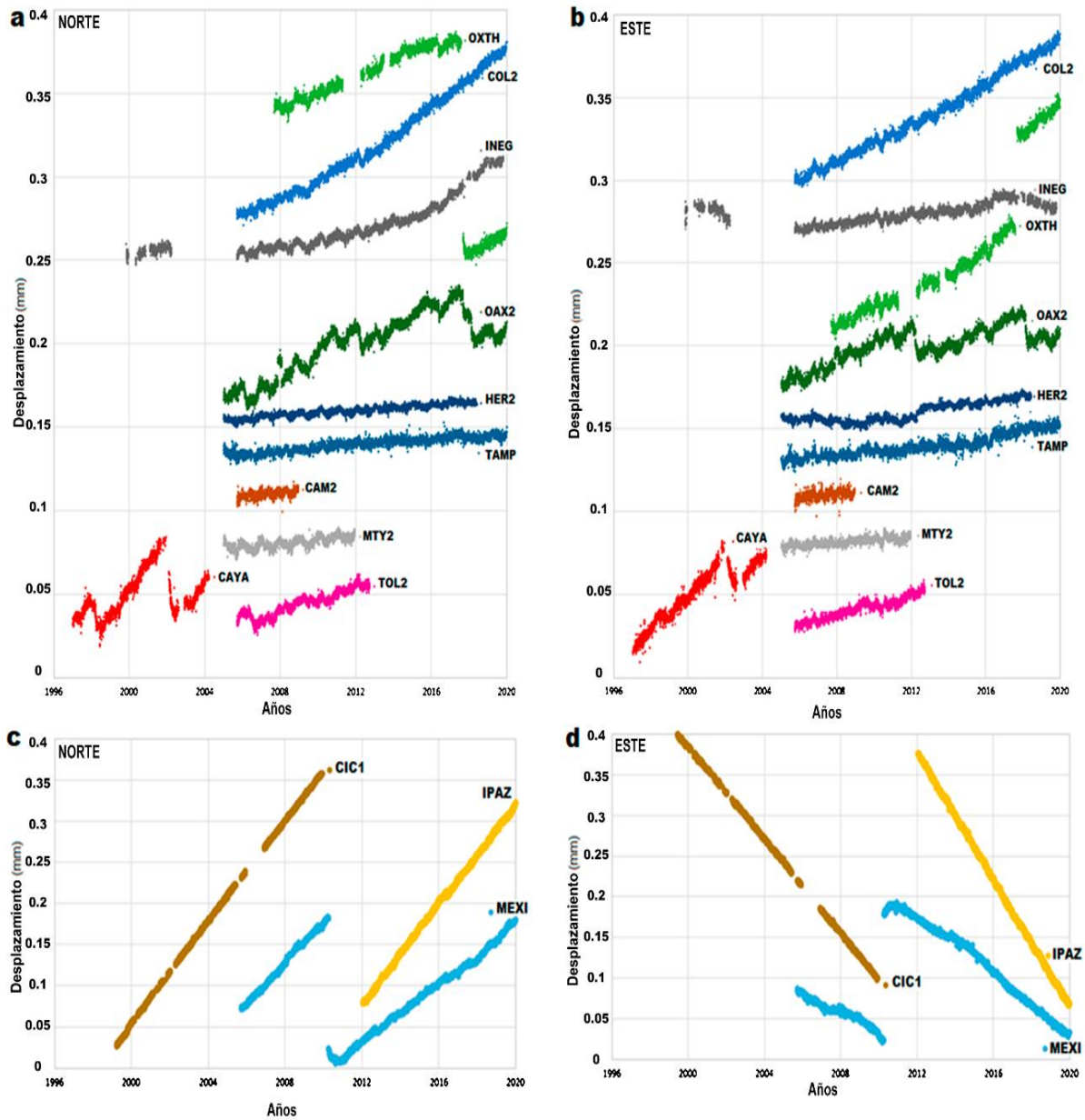


Figura 5.1. Series de tiempo de coordenadas GNSS para 10 sitios en la Placa de Norteamérica (a y b) y 3 sitios en la Placa del Pacífico (c y d) donde las componentes del movimiento son; norte (a y c) y este (b y d).

Además se realizó el cálculo de las velocidades en GipsyX para diferentes periodos, comparando las velocidades con trabajos anteriores. Para el cálculo de las series de tiempo utilizando GipsyX para la corrección para saltos, outliers y señales estacionales y efectos del ruido de caminata aleatoria. Este enfoque fue esencial debido a la duración de las mediciones, que superaron los 100 días, ya que en periodos prolongados los modelos de ruido juegan un papel crucial en la precisión de las estimaciones de velocidad. Es importante señalar que los desplazamientos de coordenadas observados presentan diferencias específicas para cada sitio, la cual proporciona detalles sobre los resultados de todos los sitios GNSS considerados, incluyendo valores máximos, mínimos y desviación estándar para cada sitio. La Tabla 5.1 muestra las velocidades calculadas en GipsyX para el periodo 2011-2013 y la Tabla 5.2 compara las diferencias encontradas en este periodo con trabajos previos. Para el resto de sitios y años en la Tabla 5.3, se presentan las velocidades calculadas para el período 2020-2023 en el marco ITRF2014 utilizando el software GipsyX junto con sus incertidumbres.

Tabla 5.1. Velocidades e incertidumbres calculadas con GipsyX para el periodo 2011-2013 en mm/año.

Site	VelEste	VelNorte	VelVertical	Edesv	Ndesv	Vdesv
CHET	-7.20525	-1.69586	-1.28172	0.04618	0.04170	0.18240
CNC0	-9.70391	-0.92049	-0.66548	0.08699	0.08006	0.33081
COL2	-1.93311	-0.73716	3.19137	0.06344	0.06002	0.25401
COOB	-2.85213	-1.10604	2.89453	0.04265	0.04225	0.18051
DAEX	-38.96209	15.13813	4.60353	0.14792	0.17069	0.62017
HER2	-5.71891	-8.68647	0.56101	0.04342	0.04798	0.17939
ICAM	-13.64514	12.05878	1.75359	2.43153	2.23650	9.59888
INEG	-5.56711	-4.14326	-23.87248	0.09986	0.09789	0.40118
IPAZ	-48.54872	21.65334	-1.89134	0.09208	0.09529	0.38284
MERI	-7.69889	-2.18609	0.01386	0.04244	0.04014	0.17118
MEXI	-24.79256	7.17309	4.29985	0.04101	0.04871	0.17440
MNZO	3.22750	-6.84594	-17.98824	0.53357	0.50850	2.12404
MOIT	-0.47842	-20.11899	-38.13499	0.41305	0.38903	1.66255
MTY2	-9.09985	-3.42866	2.63685	0.05501	0.05615	0.22349
OAX2	-1.81266	12.71055	9.20386	0.13486	0.12313	0.53474
OXEC	-0.49253	5.98378	4.75597	0.10067	0.08956	0.40921

OXGU	-4.63361	2.52269	-0.13022	0.08523	0.07468	0.35568
OXLP	12.42257	5.50381	-16.86154	1.30114	1.00804	5.46011
OXPE	12.88737	16.60659	-5.11295	0.05134	0.04568	0.19999
OXTH	-0.50796	2.97512	1.99463	0.06486	0.05832	0.25149
OXTU	3.01097	-6.83547	-2.88057	0.18535	0.16931	0.77250
PALX	-41.17436	18.06155	0.31023	0.07844	0.09160	0.33426
PENA	-0.68036	-0.48730	3.57663	0.09829	0.09428	0.40138
PHJX	-27.73653	14.18996	1.51157	0.08742	0.10700	0.36148
PIN1	-26.02013	4.36465	3.16908	0.03642	0.04421	0.14864
PJZX	-41.97439	17.70261	2.61498	0.05380	0.06407	0.21666
PLPX	-36.62678	18.03241	5.19639	0.07714	0.09128	0.31006
PLTX	-39.71706	18.78861	4.92507	0.07818	0.09143	0.32166
PSTX	-40.81684	19.53150	1.24127	0.08028	0.09556	0.32874
PTAX	-29.00362	17.02827	1.51638	0.06251	0.07425	0.24957
PTEX	-40.33234	15.33259	0.43843	0.09773	0.11167	0.42985
PURI	-2.12076	-0.37611	3.62587	0.09858	0.09910	0.41117
QUEX	-9.45687	-9.95446	-1.21881	0.11649	0.13461	0.48679
SA27	-3.55648	-7.41669	1.15033	0.10081	0.11666	0.41593
TAMP	-7.29449	-2.05555	3.12396	0.06394	0.06223	0.25982
TNMO	-5.82618	-1.51243	0.62988	0.04504	0.04291	0.17937
TOL2	-3.38879	-0.51483	1.56785	0.06384	0.05986	0.25261
UAGU	-9.92218	-8.11473	-56.00909	0.14550	0.14205	0.57857
UCOC	-1.98672	-3.21440	-1.65452	0.12220	0.11186	0.49303
UCOE	-5.50910	-3.33918	-0.40705	0.04710	0.04439	0.18740
UCOM	1.93147	3.59996	5.22648	0.04602	0.04127	0.18879
UNIP	-5.53836	-2.30239	-0.79454	0.05131	0.04829	0.20168
UNPM	-6.67526	-3.81907	-2.73725	0.15465	0.13870	0.58077
UNVA	-0.93147	-6.00151	-11.59721	0.44861	0.43994	1.81745
UTON	1.82250	-12.92857	-13.94226	0.60650	0.54534	2.39738
UXAL	-6.78329	-5.30671	1.35606	0.05032	0.04780	0.20204

Tabla 5.2. Diferencias de velocidades respecto a trabajos anteriores.

Trabajo	Sitio	Este dife	Nort dife	Trabajo	Sitio	Este dife	Nort dife	Trabajo	Sitio	Este dife	Norte dife
CORS	CIC1	-0.24	-0.17	RGNA2003	OAXA	-2.79	-4.85	EarthScope	CNCO	0.31	0.26
CORS	INEG	-10.49	0.69	RGNA2003	CHET	0.52	-0.1	EarthScope	TGMX	1.4	-0.05
CORS	YESX	-0.12	-0.09	RGNA2003	CULI	0.1	-0.82	EarthScope	OXTH	0.66	-0.72
CORS	USMX	0.01	0.45	RGNA2003	INEG	2.61	-0.61	EarthScope	OAXA	-12.48	-11.9
CORS	UNPM	0.42	0.19	RGNA2003	TAMP	1.71	-0.33	EarthScope	OXPE	3.63	3.56
CORS	AZCO	-0.84	0.17	RGNA2003	MERI	0.37	-0.26	EarthScope	OXTU	0.58	1.25
CORS	MERI	0.27	0.54	RGNA2009	OAXA	-2.18	-0.77	EarthScope	YAIG	-3.63	-10.37
CORS	IPAZ	0.18	0.46	RGNA2009	CHET	2.54	-1.84	EarthScope	UNIP	-0.75	-0.12
CORS	MEXI	2.05	-2.7	RGNA2009	CULI	2.3	-0.88	EarthScope	TNMO	-0.37	0.13

CORS	MTY2	0.12	-0.03	RGNA2009	INEG	4.19	1.73	EarthScope	UCOE	-1.1	-0.32
CORS	TAMP	1.11	0.47	RGNA2009	TAMP	3.07	-2.01	EarthScope	TNCN	0.25	-0.79
CORS	COL2	-2.42	-0.6	RGNA2009	MERI	2.92	-3.12	EarthScope	TNAM	-0.66	0.68
CORS	TOL2	0.86	-1.69	RGNA2009	MEXI	-1.98	1.3	EarthScope	PURI	0.4	-0.46
CORS	OAX2	-2.94	-1.36	RGNA2009	LPAZ	1.21	-2.18	EarthScope	YESX	0.61	0.34
CORS	ICAM	0.29	0.67					EarthScope	TNTB	1.7	-0.46
CORS	CHET	0.62	0.8					EarthScope	USMX	-0.1	0.21
CORS	LPAZ	-0.39	0.25					EarthScope	SA27	0.37	2.1
CORS	CAM2	0.55	1					EarthScope	QUEX	-1.74	0.34
CORS	CULI	-0.7	0.78					EarthScope	DAEX	1.27	-1
CORS	HER2	-0.18	-1.54					EarthScope	PTAX	-0.78	-0.04
								EarthScope	PSTX	1.56	-0.61
								EarthScope	PTEX	-0.51	-1.38
								EarthScope	CIC1	0.18	0.3
								EarthScope	UTON	-1.39	-1.09
								EarthScope	INEG	1.27	1.01
								EarthScope	UNPM	0.15	-0.48

Tabla 5.3. Velocidades e incertidumbres calculadas con GipsyX para el periodo 2020-2023 en mm/año.

Site	VelEste	VelNorte	VelVertical	Edesv	Ndesv	Vdesv
CHET	-13.75709	0.67169	-5.57048	0.105199	0.093829	0.424459
CN25	-6.335636	2.884227	1.245413	0.051381	0.048605	0.212858
CNC0	-2.22238	189.756404	21.066347	6.377749	6.145877	26.527203
COL2	-7.797879	0.895392	-2.455042	0.193698	0.499573	0.574825
CORX	-43.35645	19.862242	1.838732	0.036707	0.041771	0.144053
GUAX	-49.650042	24.235186	1.962929	0.041281	0.044047	0.167887
ICAM	-11.939191	-0.26267	-4.046958	0.088976	0.078704	0.354706
INEG	-14.973443	-4.232554	-60.91048	0.126776	0.115823	0.503674
IPAZ	-52.152128	21.665691	3.413474	0.101698	0.087222	0.375272
MERI	-12.790996	-0.351244	-3.210172	0.08945	0.081317	0.358568
MEXI	-30.105663	16.334837	2.216145	0.076133	0.074607	0.280996
MTY2	-12.965528	-3.611197	6.149002	0.093578	0.091518	0.379449
OAX2	-5.687495	-5.508725	-0.438069	0.186911	0.151086	0.708129
PALX	-44.373484	20.146005	1.762154	0.04156	0.046073	0.17146
PB1Y	-35.429065	14.16677	3.972869	0.061318	0.066873	0.267084
PENA	-8.626594	0.931909	1.781506	0.052583	0.046682	0.203106
PIN1	-30.131436	6.502753	3.241004	0.039993	0.046173	0.160411
PJZX	-43.682887	17.507144	3.854278	0.052624	0.059504	0.205037
PLCX	-45.362781	20.445906	2.674197	0.038779	0.043585	0.154199
PLTX	-40.950558	18.6895	4.62305	0.037777	0.042088	0.152818
TAMP	-13.32199	-4.456822	0.283604	0.103999	0.09754	0.424648
TECO	-5.53692	4.716348	0.468843	0.047885	0.043759	0.202708
TNIF	-3.847026	5.77504	0.32928	0.049253	0.046836	0.194131

TNMO	-8.405202	-2.691513	-0.402675	0.042816	0.039172	0.17049
TNMR	-0.868317	3.789422	-6.009436	0.173597	0.151281	0.695666
TNMP	-6.774313	0.32485	-0.360036	0.123831	0.105433	0.491948
TNPJ	-4.305128	5.14898	-0.263952	0.088945	0.071216	0.367852
TNPP	-16.082061	-8.028437	3.019272	0.038089	0.042076	0.150925
TNSJ	-6.856123	-3.789955	5.131128	0.094557	0.079856	0.368253
TOL2	-10.862917	0.145471	0.906817	0.138636	0.125701	0.553977
UNPM	-12.377913	1.376174	-1.473777	0.040195	0.038385	0.16041
USMX	-14.134378	-7.567338	1.74615	0.041425	0.044398	0.174231
UXAL	-9.824478	-6.343401	1.775763	0.04738	0.040527	0.186707
YESX	-14.090098	-7.477961	2.981959	0.044781	0.045914	0.186786

5.1.1 Dominios de Anza, Sierras Peninsulares y Tierras Fronterizas

En la zona de Baja California, abarcando el norte del Golfo de California, se identifican 13 sitios con vectores de velocidad distintos a los de la Placa de Norteamérica. El sitio CIC1, que tiene mediciones desde 1999 hasta 2010, también se encuentra en el Dominio de Tierras Fronterizas. En el caso de la zona de Baja California, los movimientos geodésicos inferidos son consistentes con una transición desde la expansión del fondo marino en el sur del Golfo de California hasta una tectónica predominantemente de desgarre en el extremo sur de California, con la amplitud de la zona de deformación ampliándose al norte del Golfo. Tiene valores de RMS de 0.97 mm al norte, 1.13 mm al este y 3.34 mm hacia arriba, con velocidades de $VE = -28.90$ mm/año (± 0.07); $VN = 30.45$ mm/año (± 0.06); $VU = -0.92$ mm/año (± 0.16).

El Dominio de Sierras Peninsulares está en el centro de Baja California y contiene la falla de Cerro Prieto, que se mueven a una fracción apreciable del movimiento relativo entre la placa del Pacífico y Norteamérica, además está entre las fallas de desgarre de deslizamiento más rápido del mundo. El sitio MEXI es una zona de alta actividad geotérmica, se encuentra en el Dominio Anza, aproximadamente a 32 km de la falla de Cerro Prieto, a una distancia de cualquier área geotérmicamente activa conocida. MEXI tiene valores bastante altos de RMS, en comparación con el modelo de trayectoria simple, de 4.94 mm al norte, 5.41 mm al este y 6.38 mm hacia arriba, con velocidades de $VE = -15.33$ mm/año (± 1.44); $VN = 20.04$ mm/año (± 1.31); $VU = 2.77$ mm/año (± 1.15). El sitio experimentó un gran desplazamiento cosísmico

asociado con el terremoto El Mayor-Cucapah del 4 de abril de 2010 (Mw 7.2). La gran velocidad post-sísmica en las cercanías del terremoto El Mayor-Cucapah sesga la estimación de la tasa de movimiento horizontal en esta región. Sin embargo, la tasa de ~25 mm/año es aproximadamente la mitad de la velocidad total de ~50 mm/año, asociada al movimiento relativo entre HER2 e IPAZ que se manifiesta través del Golfo de California. Esto es consistente con la ubicación del sitio MEXI cerca de la falla de Cerro Prieto, que es el lugar de la deformación del límite transformante en esta latitud. La orientación de la velocidad horizontal de MEXI en relación con el marco de la Placa de Norteamérica es de 43 grados oeste, rotada 133 grados en sentido antihorario con respecto a la dirección del movimiento de la placa del Pacífico en esta latitud. El movimiento del sitio dentro de la zona de límite deformante no se está moviendo paralelo al movimiento relativo entre las placas de Norteamérica y del Pacífico porque el sitio MEXI está ubicado entre los límites de ambas placas.

5.1.2 Dominios de Jalisco, Michoacán y Guerrero

En el límite convergente de México, destacan tres áreas principales: los Dominios Guerrero, Michoacán y Jalisco. Los elementos tectónicos asociados con estos dominios implican la subducción continua de las placas Cocos y Rivera por debajo de la Placa de Norteamérica. Cerca de los límites de los Dominios Michoacán y Jalisco se encuentra el sitio COL2, que, a diferencia de CAYA, es mucho más estable, con valores de RMS de 2.45 mm al norte, 1.82 mm al este y 5.63 mm hacia arriba. Tiene velocidades de $VE = 5.52$ mm/año (± 0.14); $VN = 6.64$ mm/año (± 0.39); $VU = 1.61$ mm/año (± 0.33).

También está el sitio OAX2, que se encuentra entre la zona sísmica del TMVB y la zona de subducción en el Dominio Guerrero, ubicado en una zona bastante inestable y con valores de RMS de 2.48 mm al norte, 2.19 mm al este y 5.83 mm hacia arriba. Tiene velocidades de $VE = 5.07$ mm/año (± 0.26); $VN = 7.30$ mm/año (± 0.32); $VU = 1.95$ mm/año (± 0.37). También es uno de los sitios con mayor número de correcciones por saltos de ciclo y cambios de antena.

El sitio OXTH se encuentra entre la zona de subducción en el Dominio Guerrero y la zona sísmica del TMVB, también ubicado en una zona bastante inestable y con muchas interrupciones, con valores de RMS de 2.03 mm al norte, 2.27 mm al este y 6.08 mm hacia arriba. Tiene velocidades de VE = 4.60 mm/año (± 0.32); VN = 5.36 mm/año (± 0.22); VU = -1.89 mm/año (± 0.51). En su serie temporal, tiene una gran interrupción relacionada con los terremotos del 8 de septiembre de 2017 de Chiapas (Mw 8.2) y del 19 de septiembre de 2017 de Puebla (Mw 7.1).

5.1.3 El Cinturón Volcánico Transmexicano y el Dominio Maya

El TMVB forma parte del límite convergente, por lo que hay una influencia de la subducción en esta zona. El sitio TOL2 está en el TMVB, en una zona bastante inestable con valores de RMS de 1.69 mm al norte, 1.59 mm al este y 4.91 mm hacia arriba. Tiene velocidades de VE = 3.73 mm/año (± 0.15); VN = 5.67 mm/año (± 0.17); VU = -0.21 mm/año (± 0.35).

Entre los sitios más estables que están lejos del límite de placa convergente, destaca el sitio CAM2, ubicado en Yucatán, en el Dominio Maya, con grandes valores de RMS de 1.72 mm al norte, 1.78 mm al este y 5.88 mm hacia arriba. Tiene velocidades de VE = 1.41 mm/año (± 0.06); VN = 1.14 mm/año (± 0.06); VU = -2.26 mm/año (± 0.20).

5.1.4 Placa del Pacífico y Placa de Norteamérica

Entre las áreas restantes donde no se especifican dominios tectónicos específicos, nuestro análisis revela la presencia de 17 sitios situados en la Placa de Norteamérica y 8 sitios adicionales ubicados en la Placa del Pacífico. Estos sitios sirven como puntos de datos críticos para nuestra investigación, contribuyendo a una comprensión integral de la dinámica tectónica dentro de las respectivas placas. En el límite transformante, IPAZ representa uno de los sitios que se presume está ubicado en la Placa del Pacífico. Este sitio tiene bajos valores de RMS de 1.32 mm al norte, 1.22 mm al este y 4.13 mm hacia arriba. Tiene velocidades de VE = -38.57 mm/año (± 0.09); VN = 30.81 mm/año (± 0.21); VU = -1.68 mm/año (± 0.21). Se observa un

desplazamiento en 2016 en el gráfico de series temporales, asociado con un cambio en el receptor que ocurrió en esa fecha.

En el otro lado del límite transformante, el sitio HER2 está ubicado en la Placa de Norteamérica. El RMS de los residuales con respecto al modelo de trayectoria del sitio es de 1.21 mm al norte, 1.57 mm al este y 1.32 mm hacia arriba. Las pendientes generales son $VE = -0.31$ mm/año (± 0.31); $VN = 0.77$ mm/año (± 0.09); $VU = -0.11$ mm/año (± 0.50). Sin embargo, su serie temporal también revela un cambio en la tasa en el componente Este a principios de 2012, probablemente debido a la influencia del terremoto de Ometepec de 2012 (Mw 7.4), y se trató utilizando interrupciones en tsview. La interrupción en el componente este es de 8.56 mm ± 1.41 mm, con una tasa de -1.01 mm/año (± 0.22) antes de la interrupción y una tasa de 1.01 mm/año (± 0.15), un cambio de aproximadamente 2 mm en la tasa de velocidad. La interrupción es mayor que las incertidumbres a nivel de 3 sigmas, por lo que es significativa al 99% de nivel de confianza, asumiendo que las incertidumbres describen con precisión los verdaderos errores en los datos. No hay un cambio aparente en la tasa en el componente norte, pero la posibilidad de deformación post-sísmica compromete un poco esta conclusión.

En la Placa de Norteamérica, cerca del TMVB, INEG es un sitio bastante inestable, con valores de RMS de 2.05 mm al norte, 1.75 mm al este y 6.78 mm hacia arriba. Este sitio tiene velocidades de $VE = 1.16$ mm/año (± 0.19); $VN = 3.12$ mm/año (± 0.19); $VU = -29.48$ mm/año (± 0.92). Presenta subsidencia no lineal que cambia en periodos, comenzando con aproximadamente 68 mm/año hasta 30 mm/año y aumentando a 50 mm/año con una velocidad promedio de 37 mm/año. Este fenómeno probablemente se debe a la actividad tectónica o a la extracción de agua en acuíferos.

También está el sitio TAMP, ubicado en el Golfo de México, en la Placa de Norteamérica, con valores de RMS de 1.66 mm al norte, 2.04 mm al este y 5.91 mm hacia arriba y con velocidades de $VE = 1.08$ mm/año (± 0.20); $VN = 1.12$ mm/año (± 0.07); $VU = -0.03$ mm/año (± 0.40).

En la Figura 5.2, se presenta un mapa que exhibe las velocidades relativas, destacando la magnitud y dirección de cada sitio en consonancia con la placa tectónica de Norteamérica que ejerce influencia en el país. La Figura 5.3 y la Figura 5.4 ofrecen una visualización más detallada para las zonas norte y sur, respectivamente. Se realizó la estimación de coordenadas regionales para 94 sitios con datos GNSS, representados en el ITRF2014 (Figura 5.5), mediante una estrategia de esquema de procesamiento óptimo de datos. Es importante señalar que la duración de la serie temporal para cada sitio difiere, lo que influye definitivamente en los resultados al calcular las velocidades. Se observa que el movimiento de las estaciones es consistente con el desplazamiento de las placas tectónicas. Esta consistencia se percibe mejor al graficar las velocidades residuales de las estaciones con respecto a alguna placa tectónica. Para esto, se recalculó las series de tiempo en relación con la placa de Norteamérica, obteniendo sus correspondientes vectores de velocidad, cuyos resultados se detallan en la Tabla 2.2. Como se evidencia en la Figura 5.3, las estaciones en la placa del Pacífico no siguen el desplazamiento de la placa de Norteamérica, como se refleja en los valores de magnitud, que son significativamente mayores en comparación con los valores de magnitud de los vectores de velocidad en referencia a la placa de Norteamérica. Únicamente la estación MEXI presenta una diferencia menor en los vectores de velocidad entre ambas placas en comparación con el resto, posiblemente debida a la intensa deformación y la zona de transición entre placas en la que se encuentra.

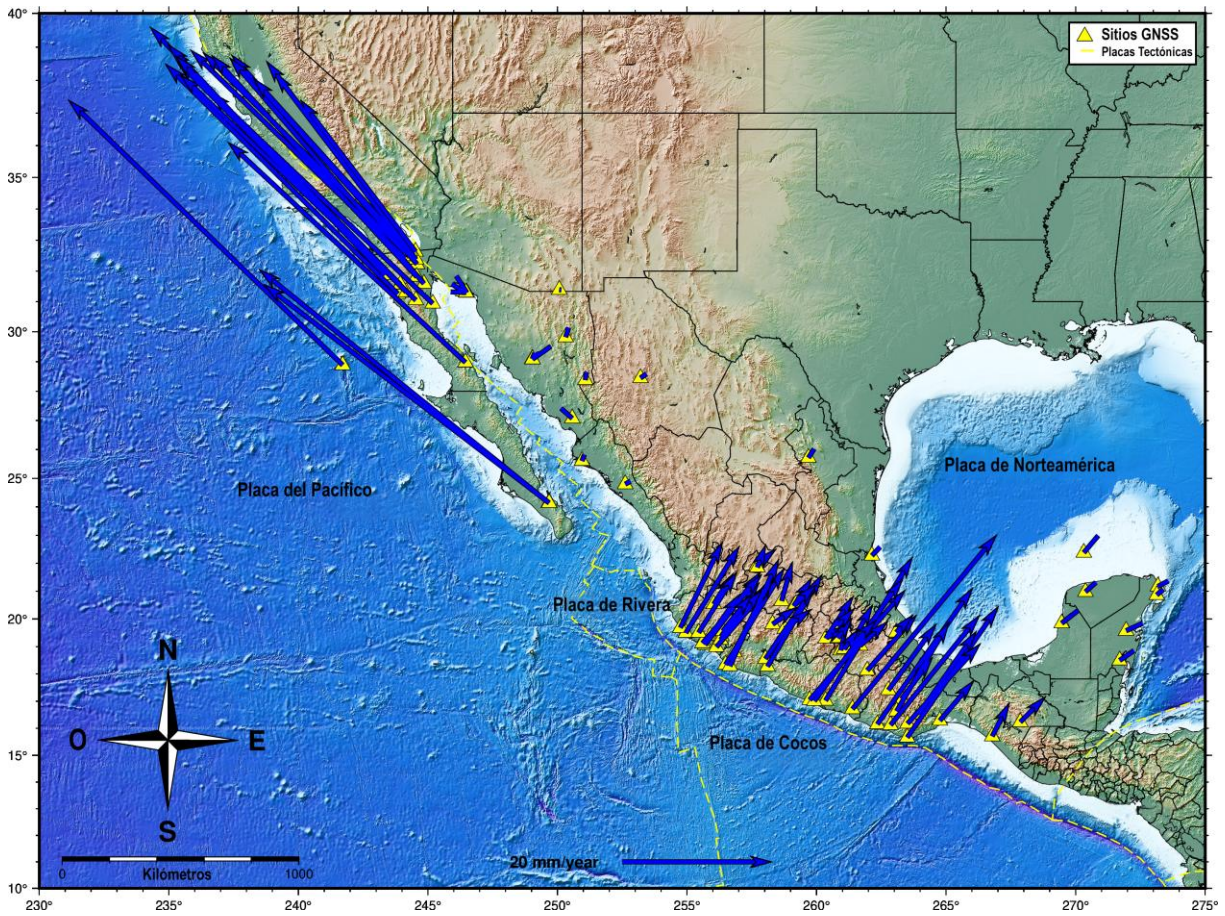


Figura 5.2. Vectores de velocidad en el marco de referencia ITRF2014 referidas a la placa de Norteamérica para estaciones con datos GNSS en todo el territorio mexicano.

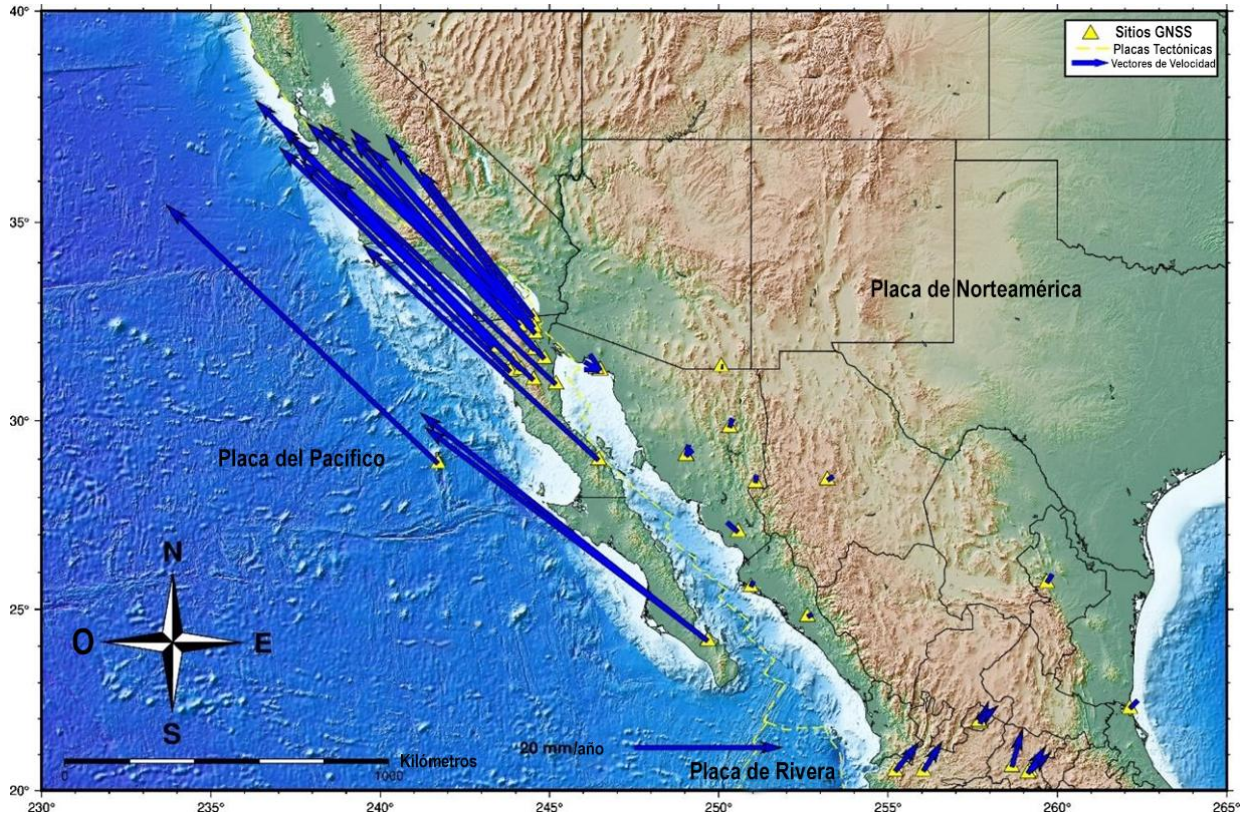


Figura 5.3. Vectores de velocidad para estaciones con datos GNSS ubicadas en el norte de México.

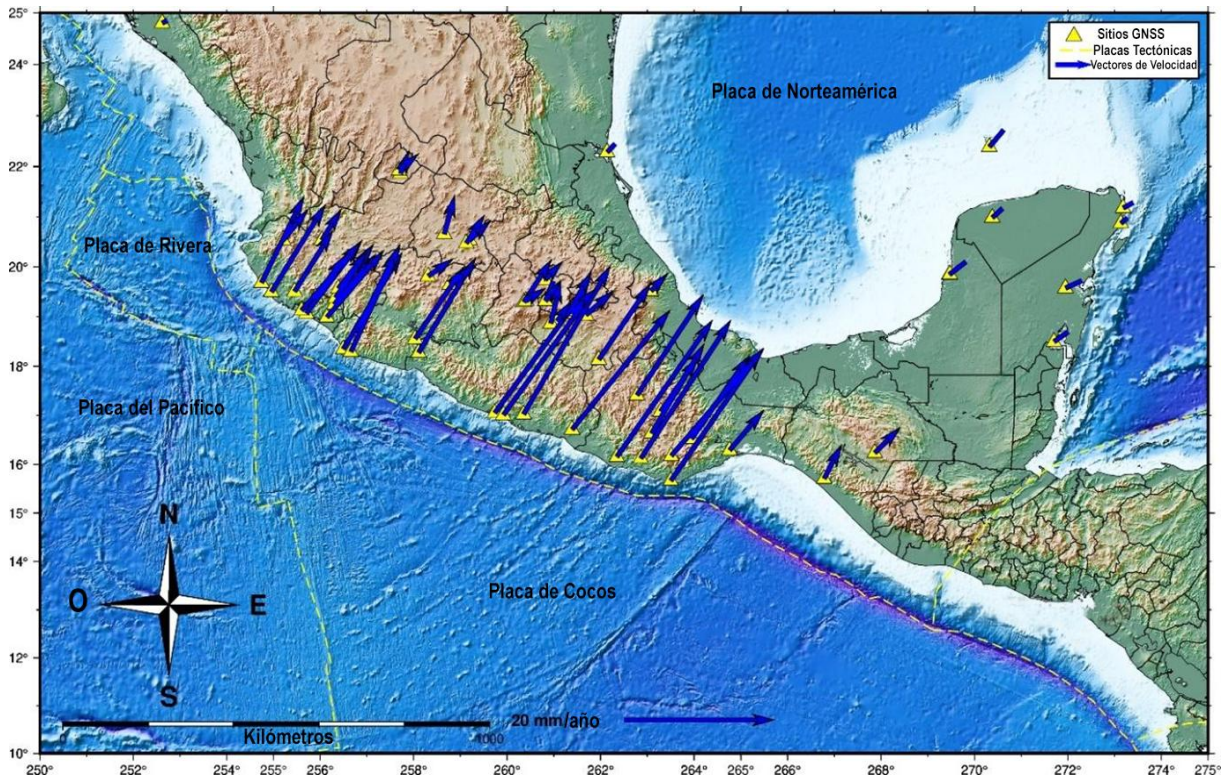


Figura 5.4. Vectores de velocidad para estaciones con datos GNSS ubicadas en el sur de México.

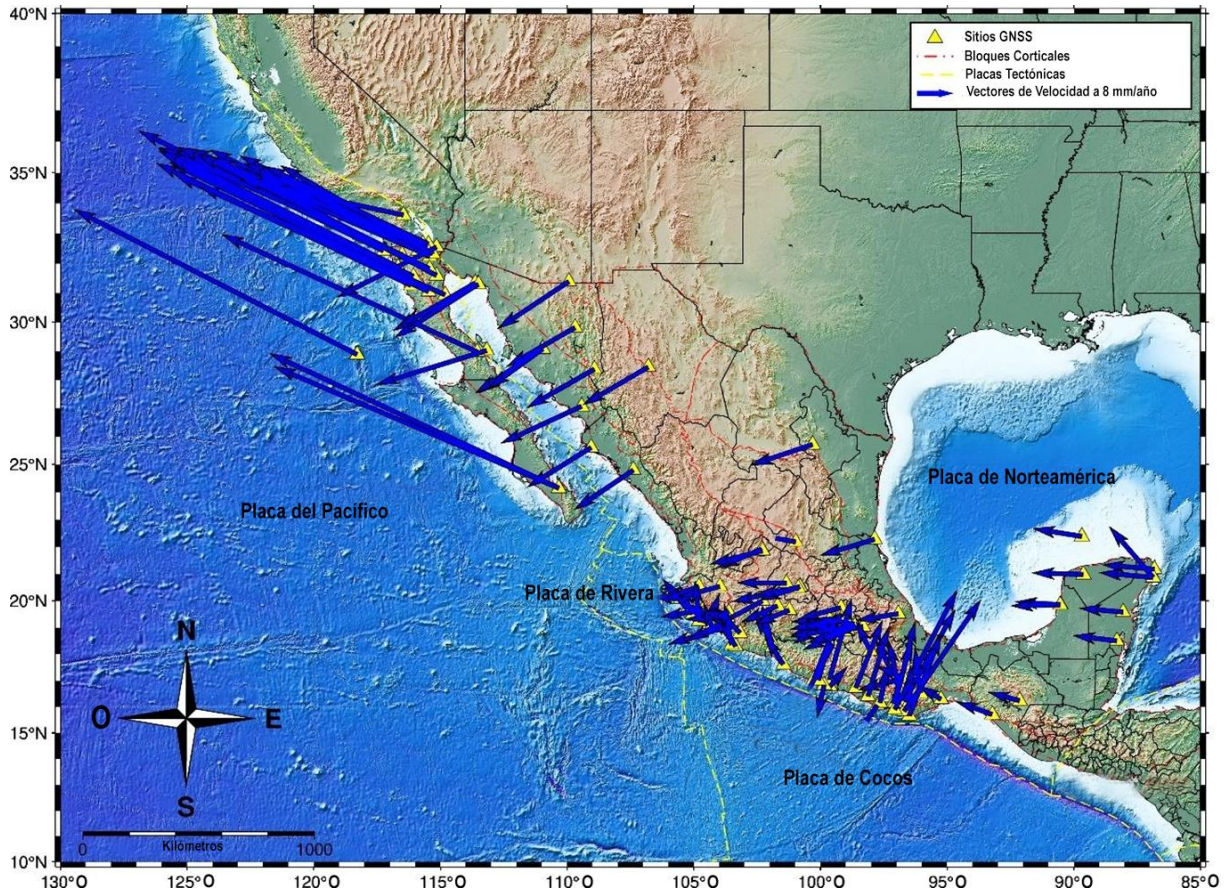


Figura 5.5. Vectores de velocidad en el marco de referencia ITRF2014.

5.3 Modelado de rotaciones elásticas de dominios litosféricos, deformaciones internas y tasas de deslizamiento en fallas.

Las velocidades derivadas de GipsyX (Tabla 5.1) y su comparación con las velocidades observadas se presentan en la Tabla 5.3. La Tabla 5.4 muestra resultados de velocidades derivadas del modelo de dominios corticales utilizando TDEFNODE, y las velocidades calculadas con GAMIT/GLOBK junto con sus residuales e incertidumbre. La Tabla 5.5 resume los datos promedio de velocidad para cada dominio modelado en TDEFNODE. La determinación de los movimientos de los dominios se llevó a cabo minimizando la discrepancia con los datos de velocidad de la corteza mediante un enfoque de mínimos cuadrados. El modelo resultante coincide exitosamente con los datos de velocidad, arrojando un valor de NRMS de 3.010 y un valor de la media cuadrática ponderada de 0.425 mm/año.

Estos valores sugieren que la incertidumbre real en nuestros datos de velocidad podría haber sido subestimada o que aún se pueden realizar mejoras adicionales al modelo. La velocidad residual media real es de 0.08 y 0.15 mm/año en las componentes este y norte, respectivamente, indicando una reproducción del modelo de las observaciones con una precisión muy alta. Las discrepancias promedio entre las velocidades residuales y las incertidumbres fueron de 2.28 y 2.26 en las componentes este y norte, respectivamente.

Tabla 5.4. Resultados de velocidades observadas, calculadas, residuales e incertidumbre en TDEFNODE. Todos los datos de velocidad están en mm/año.

Siti nomb	longitud	latitud	eobs	ecalc	eres	e1sig	eresig	nobs	ncalc	nres	n1sigm	nresig
AZCO	250.0709	31.3911	0.27	-0.33	0.6	0.67	0.9	-0.03	0.96	-0.99	0.39	-2.55
CAM2	269.4598	19.8444	1.41	1.81	-0.4	0.14	-2.85	1.13	1	0.13	0.14	0.95
CAYA	259.7327	17.0485	12.43	12.35	0.08	0.24	0.31	16.74	18.16	-1.42	0.45	-3.16
CECM	259.1931	20.532	2.88	2.3	0.58	0.19	3.07	2.67	3.36	-0.69	0.26	-2.67
CEGA	259.1222	20.4701	2.5	2.32	0.18	0.12	1.54	3.82	3.41	0.41	0.2	2.05
CHET	271.7008	18.4953	1.9	2.16	-0.26	0.26	-0.99	1.3	1.24	0.06	0.17	0.37
CIC1	243.3342	31.8707	-28.9	-28.79	-0.11	0.07	-1.54	30.45	30.39	0.06	0.05	1.11
CICE	243.3326	31.8713	-28.61	-28.79	0.18	0.09	1.97	29.9	30.4	-0.5	0.15	-3.3
CN24	271.9461	19.5756	2.19	2	0.19	0.25	0.77	0.98	1.07	-0.09	0.18	-0.51
CN25	267.8648	16.232	3.47	2.58	0.89	0.42	2.12	3.45	3.08	0.37	0.68	0.54
CN26	270.3176	22.383	1.91	1.24	0.67	0.54	1.25	2.24	0.91	1.33	0.51	2.61
CNC0	273.1791	21.1747	1.37	1.27	0.1	0.13	0.78	0.73	0.68	0.05	0.09	0.55
COL2	256.2981	19.2444	5.52	5.59	-0.07	0.14	-0.49	6.64	6.74	-0.1	0.39	-0.25
COOB	256.3256	19.3814	5.08	4.98	0.1	0.21	0.48	7.1	5.96	1.14	0.62	1.84
CORX	242.7518	32.4154	-29.23	-29.23	0	0.16	0	30.53	30.53	0	0.21	0
COYU	259.9189	17.0084	11.82	12.25	-0.43	0.32	-1.33	16.2	17.98	-1.78	0.52	-3.43
CULI	252.6161	24.7986	0.68	0.52	0.16	0.2	0.8	0.37	0.82	-0.45	0.16	-2.83
DAEX	244.5808	32.2245	-24.7	-24.62	-0.08	0.07	-1.15	27.63	27.6	0.03	0.06	0.48
DOAR	260.3493	17.0211	11.57	11.43	0.14	0.46	0.31	19.58	16.88	2.7	0.63	4.29
FARO	256.4913	18.3446	7.86	9.84	-1.98	0.43	-4.61	12.79	12.91	-0.12	0.57	-0.2
GUAX	241.7103	28.8841	-36.5	-36.48	-0.02	0.17	-0.1	34.98	35.15	-0.17	0.23	-0.76
HER2	249.0328	29.0925	0.31	-0.16	0.47	0.31	1.51	0.77	1	-0.23	0.09	-2.6
ICAM	269.4725	19.8535	2.13	1.81	0.32	0.19	1.7	1.65	1	0.65	0.16	4.09
INEG	257.7158	21.8562	1.16	1.72	-0.56	0.19	-2.96	3.12	1.71	1.41	0.19	7.42
IPAZ	249.6693	24.1453	-38.57	-38.36	-0.21	0.09	-2.32	30.81	29.37	1.44	0.21	6.88
LPAZ	249.6807	24.1388	-37.98	-38.36	0.38	0.12	3.16	28.87	29.35	-0.48	0.12	-4.04
MERI	270.3797	20.98	1.38	1.38	0	0.08	-0.06	1.24	1.23	0.01	0.1	0.08
MEXI	244.5243	32.633	-15.33	-16.77	1.44	1.44	1	20.04	19.89	0.15	1.31	0.11
MNZO	255.7018	19.0639	7.43	5.9	1.53	0.75	2.05	9.69	8.99	0.7	0.9	0.77
MTY2	259.6871	25.7155	0.74	0.75	-0.01	0.06	-0.25	1.16	1.22	-0.06	0.06	-1.08
NVDO	256.3835	19.5656	3.91	4.17	-0.26	0.14	-1.85	4.91	4.93	-0.02	0.16	-0.12
OAX2	263.2833	17.0783	5.07	6.01	-0.94	0.26	-3.6	7.3	8.98	-1.68	0.32	-5.24
OXEC	263.9451	16.52	7.72	6.69	1.03	0.59	1.75	11.02	9.04	1.98	0.58	3.41
OXGU	263.0891	16.6315	7.04	8.26	-1.22	0.23	-5.29	11.84	11.32	0.52	0.37	1.41
OXTH	264.7592	16.2863	4.6	4.27	0.33	0.32	1.03	5.36	6.31	-0.95	0.22	-4.3
OXTU	262.3462	16.1512	12.74	11.8	0.94	0.66	1.42	18.04	15.8	2.24	0.67	3.34
OXUM	263.501	15.6622	12.19	11.55	0.64	0.39	1.63	17.37	14.51	2.86	0.83	3.45
PALX	243.9362	31.5591	-29.91	-29.91	0	0.08	0.01	30.19	30.19	0	0.05	0
PB1Y	244.3076	32.6479	-20.89	-20.84	-0.05	0.06	-0.92	22.85	22.42	0.43	0.15	2.85
PB2Y	244.1104	32.6139	-26.87	-26.97	0.1	0.05	2.01	26.35	26.55	-0.2	0.09	-2.26
PENA	255.8985	19.3905	4.03	4.13	-0.1	0.09	-1.1	5.6	5.64	-0.04	0.16	-0.23
PHJX	244.4495	32.4901	-18.62	-20.24	1.62	0.21	7.74	24.34	24.57	-0.23	0.07	-3.26
PJZX	244.1163	32.417	-28.56	-28.04	-0.52	0.11	-4.7	27.5	27.43	0.07	0.05	1.48

PLCX	243.8419	31.2552	-30.97	-31.04	0.07	0.1	0.68	30.36	30.52	-0.16	0.14	-1.11
PLPX	244.8487	31.5886	-25.88	-26.28	0.4	0.32	1.24	29.83	29.8	0.03	0.17	0.19
PLTX	244.5691	31.8163	-27.31	-27.41	0.1	0.08	1.27	29.23	29.35	-0.12	0.09	-1.31
POP1	261.3719	19.067	3.32	2.58	0.74	0.32	2.31	3.31	3.33	-0.02	0.4	-0.04
PSTX	244.1646	31.3131	-30.49	-30.65	0.16	0.09	1.81	30.49	30.06	0.43	0.1	4.32
PTAX	244.5437	32.3775	-19.96	-19.6	-0.36	0.13	-2.77	26.22	26.12	0.1	0.06	1.61
SA27	249.0386	29.0821	0.34	-0.16	0.5	0.18	2.78	1.51	1.01	0.5	0.29	1.74
SA33	246.4721	31.2952	-2.04	-0.91	-1.13	0.11	-10.24	0.09	1.26	-1.17	0.24	-4.87
SA50	246.5035	31.2913	-1.41	-0.88	-0.53	0.29	-1.83	2.21	1.24	0.97	0.16	6.04
SA61	250.5707	27.0741	-1.5	0.06	-1.56	0.76	-2.05	1.33	0.93	0.4	1.14	0.35
SG21	260.8114	19.7412	2.36	2.43	-0.07	0.2	-0.34	2.46	3.22	-0.76	0.55	-1.39
SPMX	244.5341	31.045	-31.29	-30.75	-0.54	0.13	-4.14	29.74	29.84	-0.1	0.07	-1.47
TAMP	262.136	22.2783	1.08	1.57	-0.49	0.2	-2.47	1.12	1.51	-0.39	0.07	-5.61
TECO	256.139	18.9846	7.58	7	0.58	0.14	4.12	8.8	8.85	-0.05	0.14	-0.33
TNAL	261.3448	19.1187	2.89	2.57	0.32	0.44	0.73	5.2	3.31	1.89	0.3	6.3
TNAM	256.0332	20.5356	2.62	2.8	-0.18	0.17	-1.04	4.12	3.44	0.68	0.32	2.14
TNAT	261.9589	18.1302	6.97	4.76	2.21	0.48	4.61	10.11	8.67	1.44	0.66	2.18
TNBA	246.4527	28.9719	-31.65	-31.79	0.14	0.2	0.69	29.09	28.53	0.56	0.27	2.06
TNCC	256.827	18.7911	5.07	6.83	-1.76	0.45	-3.91	10.15	9.55	0.6	0.62	0.97
TNCM	254.9552	19.4981	7.19	6.97	0.22	0.28	0.77	11.52	11.4	0.12	0.35	0.35
TNCN	258.0292	18.5538	6.56	6.2	0.36	0.26	1.37	9.53	10.35	-0.82	0.42	-1.95
TNCT	254.7412	19.6811	5.67	7.18	-1.51	0.42	-3.59	11.42	11.86	-0.44	0.52	-0.84
TNCU	253.206	28.4506	0.8	0.14	0.66	0.14	4.73	0.53	0.92	-0.39	0.14	-2.79
TNGF	260.824	19.3269	1.03	2.55	-1.52	0.17	-8.96	2.54	3.41	-0.87	0.42	-2.07
TNHM	249.0297	29.0813	0.93	-0.16	1.09	0.16	6.82	0.82	1.01	-0.19	0.22	-0.84
TNIF	258.1044	18.2715	7.62	7.35	0.27	0.36	0.74	12.56	12.11	0.45	0.35	1.27
TNLC	255.4508	19.5061	5.12	5.21	-0.09	0.37	-0.25	8.09	7.94	0.15	0.35	0.43
TNMO	258.7722	19.6488	3.63	3.21	0.42	0.17	2.47	2.63	4.44	-1.81	0.39	-4.64
TNMQ	261.3884	16.7103	13.05	10.84	2.21	2.22	1	15.75	15.73	0.02	1.56	0.01
TNMR	256.6545	18.2885	6.55	9.81	-3.26	1.22	-2.67	14.17	13.1	1.07	1.15	0.93
TNNP	262.8581	16.1205	12.01	10.79	1.22	1.23	0.99	18.23	14.23	4	1.02	3.92
TNNX	262.7761	17.4076	8.88	5.76	3.12	0.61	5.11	13.31	9.16	4.15	0.58	7.16
TNPJ	266.7811	15.7046	2.36	4.01	-1.65	0.68	-2.43	4.54	5.05	-0.51	0.72	-0.71
TNPP	246.3684	31.3355	-1.52	-1.02	-0.5	0.15	-3.35	0.96	1.31	-0.35	0.29	-1.19
TNSJ	263.5105	16.1724	12.34	9.18	3.16	0.65	4.86	14.18	11.88	2.3	0.67	3.43
TNTB	250.9473	25.6059	0.31	-0.07	0.38	0.19	1.98	0.82	0.97	-0.15	0.3	-0.5
TOL2	260.3565	19.2932	3.73	3.3	0.43	0.15	2.88	5.67	4.41	1.26	0.17	7.43
TSFX	245.1894	30.9339	-29.77	-29.92	0.15	0.26	0.58	28.02	28.92	-0.9	0.23	-3.9
UAGU	257.685	21.9185	2.65	1.7	0.95	0.38	2.5	2.23	1.69	0.54	0.34	1.58
UCOC	261.0679	18.9095	1.96	3.92	-1.96	0.53	-3.69	2.72	5.85	-3.13	0.66	-4.74
UCOE	258.3056	19.8132	3.4	3.09	0.31	0.26	1.19	2.34	4.25	-1.91	0.3	-6.38
UCOM	255.5985	19.1241	7.91	6.03	1.88	0.43	4.38	9.09	9.3	-0.21	0.52	-0.4
UIRA	258.652	20.6539	1.46	2.28	-0.82	0.2	-4.1	5.25	3.44	1.81	0.44	4.1
UNIP	260.8187	19.3127	2	2.56	-0.56	0.29	-1.93	2.71	3.42	-0.71	0.54	-1.31
UNPM	273.1318	20.8685	0.87	1.32	-0.45	0.22	-2.04	0.75	0.67	0.08	0.23	0.34
UNTO	260.4024	19.3196	2.7	3.28	-0.58	0.48	-1.22	1.72	4.38	-2.66	0.36	-7.38
USMX	250.319	29.8217	0.39	-0.12	0.51	0.11	4.65	1.24	0.92	0.32	0.1	3.21
UTON	261.6838	19.0334	3.77	2.56	1.21	0.21	5.78	3.26	3.22	0.04	0.27	0.15
UXAL	263.0752	19.5164	2.3	2.31	-0.01	0.1	-0.12	2.37	2.54	-0.17	0.13	-1.32
YAIG	260.9331	18.8624	1.33	3.94	-2.61	0.71	-3.68	5.7	5.95	-0.25	0.93	-0.26
YESX	251.0804	28.3783	0.1	0.08	0.02	0.07	0.34	1.04	0.91	0.13	0.06	2.19

Tabla 5.5. Datos de velocidad media, tasas de rotación y tasa de tensores de deformación para cada dominio modelado en TDEFNODE. NUME (Número de sitios GNSS utilizados para obtener velocidades de dominio), EOBS (Velocidad observada al este), NOBS (Velocidad observada al norte), ECAL (Velocidad calculada al este), NCAL (Velocidad calculada al norte), ERES (Velocidad residual al este), NRES (Velocidad residual al norte), E1 (tasa de deformación más compresiva), SigE1 (error

estándar en E1), E2 (tasa de deformación menos compresiva), SigE2 (error estándar en E2), A1 (azimut de E1), SigA1 (error estándar en A1), Omega (tasa de rotación), SigOm (error estándar de la tasa de rotación). Todos los datos de velocidad están en mm/año, los tensores de tasa de deformación en nanostrain/año y la tasa de rotación en grados/Ma (millones de años). El Dominio Coachella no se incluyó porque no hay estaciones en esta área, por lo que se consideró parte del Dominio de Anza para el modelo.

DO-MAIN	NUME	EOBS	NOBS	ECAL	NCAL	ERES	NRES	E1	SigE1	E2	SigE2	A1	SigA1	Ome-ga	Si-gOm
NOA M	22.00	0.50	1.17	0.46	1.08	0.04	0.10	-0.62	0.14	0.78	0.16	54.99	4.13	0.05	0.01
GUER	14.00	9.89	13.93	9.00	12.76	0.89	1.17	-28.46	1.24	2.14	1.16	43.91	1.36	0.06	0.01
TMVB	17.00	2.58	3.44	2.82	3.85	-0.24	-0.41	-1.05	0.91	0.59	0.53	44.11	13.70	-0.05	0.03
MAYA	5.00	2.26	2.30	2.43	2.33	-0.17	-0.03	-1.48	0.64	2.86	0.82	20.38	7.13	0.02	0.01
JALI	7.00	5.81	8.50	5.52	8.45	0.30	0.05	-111.6	7.66	27.83	6.52	41.78	2.07	0.16	0.27
MICH	9.00	6.19	9.63	6.86	9.39	-0.67	0.24	-48.35	2.19	-2.10	1.65	25.59	1.67	0.49	0.08
PCFC	8.00	-33.40	30.30	-33.42	30.22	0.02	0.08	-7.15	0.38	3.60	0.39	1.71	1.58	-0.94	0.02
ANDO	4.00	-18.70	23.36	-19.36	23.25	0.66	0.11	-189.9	55.68	162.2	80.04	0.61	8.44	-5.23	2.80
PRDO	5.00	-26.66	28.11	-26.66	28.15	0.00	-0.04	-33.41	2.23	84.97	3.99	171.4	0.91	-1.71	0.10
BODO	4.00	-29.16	30.27	-29.18	30.38	0.02	-0.11	-75.97	6.31	15.37	8.24	66.25	3.24	1.54	0.27

5.3.1 Resultados del modelado de dominios corticales

Las velocidades modeladas en TDEFNODE, proporcionan una visualización alternativa del campo de velocidad en todo México. En la Figura 5.6 se presentan comparaciones entre velocidades calculadas y velocidades del modelo, utilizando vectores azules para las velocidades calculadas y rojos para las del modelo. Para obtener una comprensión más completa de la distribución de velocidades, se creó una cuadrícula que cubre la región y muestra los valores de velocidad correspondiente mostrada en la Figura 5.7, donde se exhibe una malla de velocidades modeladas. La Figura 5.8 aborda tasas de deformación y rotación, utilizando líneas amarillas para los límites de placas, vectores azules para la deformación cruzada y líneas verdes y rojas para los límites de dominios corticales y bloqueo en fallas. Las tasas de deformación se expresan en nanostrain por año, y las tasas de rotación en grados por millón de años. Finalmente, la Figura 5.9 presenta tasas de deslizamiento en fallas y velocidades residuales entre velocidades calculadas y modeladas. Se emplean círculos para nodos de fallas y flechas para el

vector de tasa de deslizamiento, con líneas amarillas, verdes y rojas para los límites de placas, dominios corticales y bloqueo en fallas.

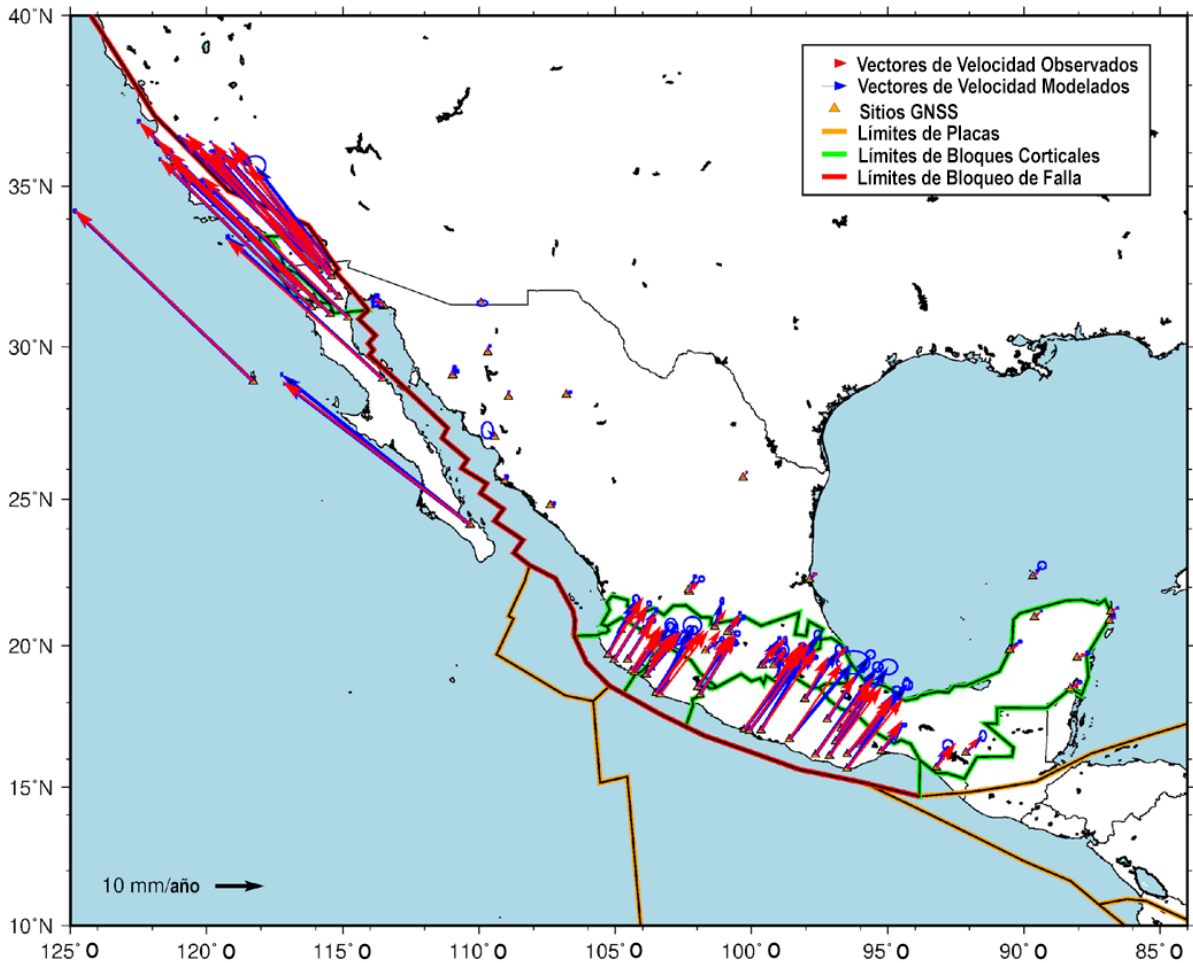


Figura 5.6. Comparaciones entre velocidades calculadas y velocidades del modelo. Los vectores de velocidad en azul son para las velocidades calculadas, las elipses azules son para el error sigma y los vectores de velocidad en rojo son para las velocidades del modelo. Los triángulos amarillos representan los sitios con datos GNSS. Las líneas amarillas representan los límites de las placas. Las líneas verdes representan los límites de los dominios corticales. Las líneas rojas representan el bloqueo en las fallas que delimitan los dominios.

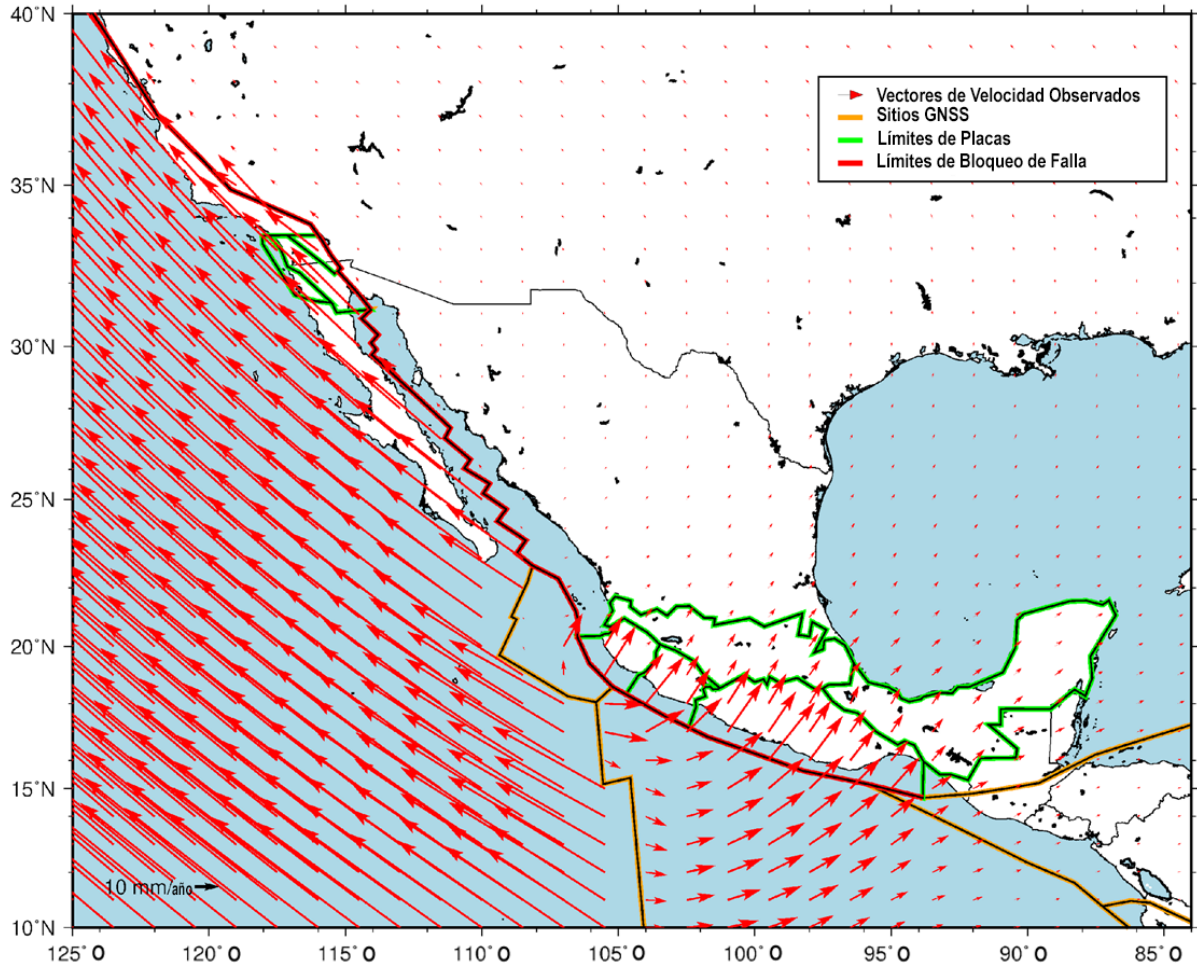


Figura 5.7. Cuadrícula de velocidades modeladas. Los vectores de velocidad en rojo son para las velocidades del modelo. Las líneas amarillas representan los límites de las placas. Las líneas verdes representan los límites de los dominios corticales. Las líneas rojas representan el bloqueo en las fallas que delimitan los dominios.

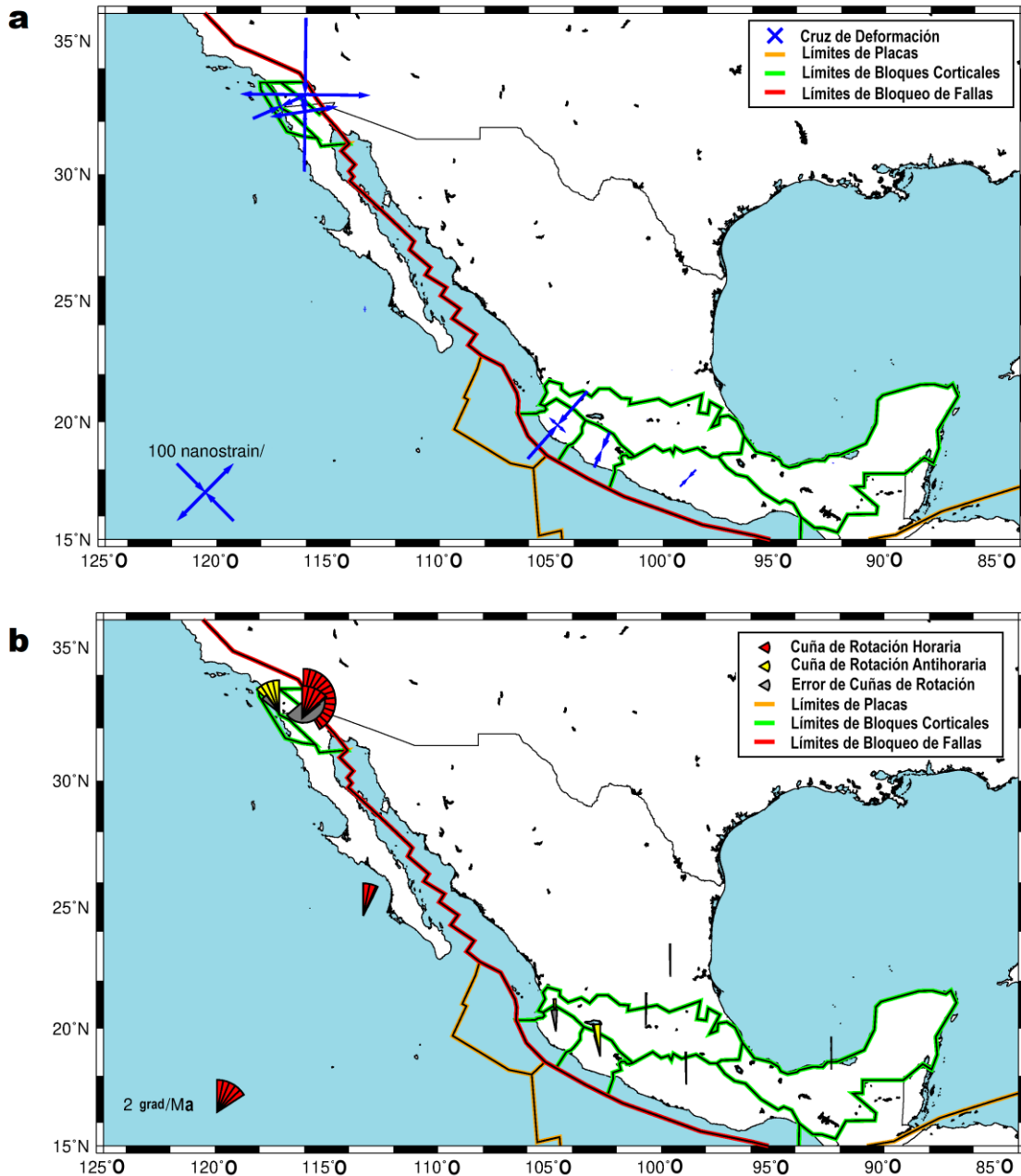


Figura 5.8. Tasas de deformación y rotación. Las líneas amarillas representan los límites de las placas. Los vectores azules son para la deformación cruzada. Las líneas verdes representan los límites de los dominios corticales. Las líneas rojas representan el bloqueo en las fallas que delimitan los dominios. (a) Tasas de deformación en nanostrain por año (10^{-9} por año; negativo indica contracción). (b) Tasas de rotación en grados por millón de años (positivas para el sentido antihorario en vista de mapa). Las tasas se

muestran como abanicos rojos, con cada doblez representando 2 grados por año. El abanico gris representa más o menos una desviación estándar de la misma magnitud.

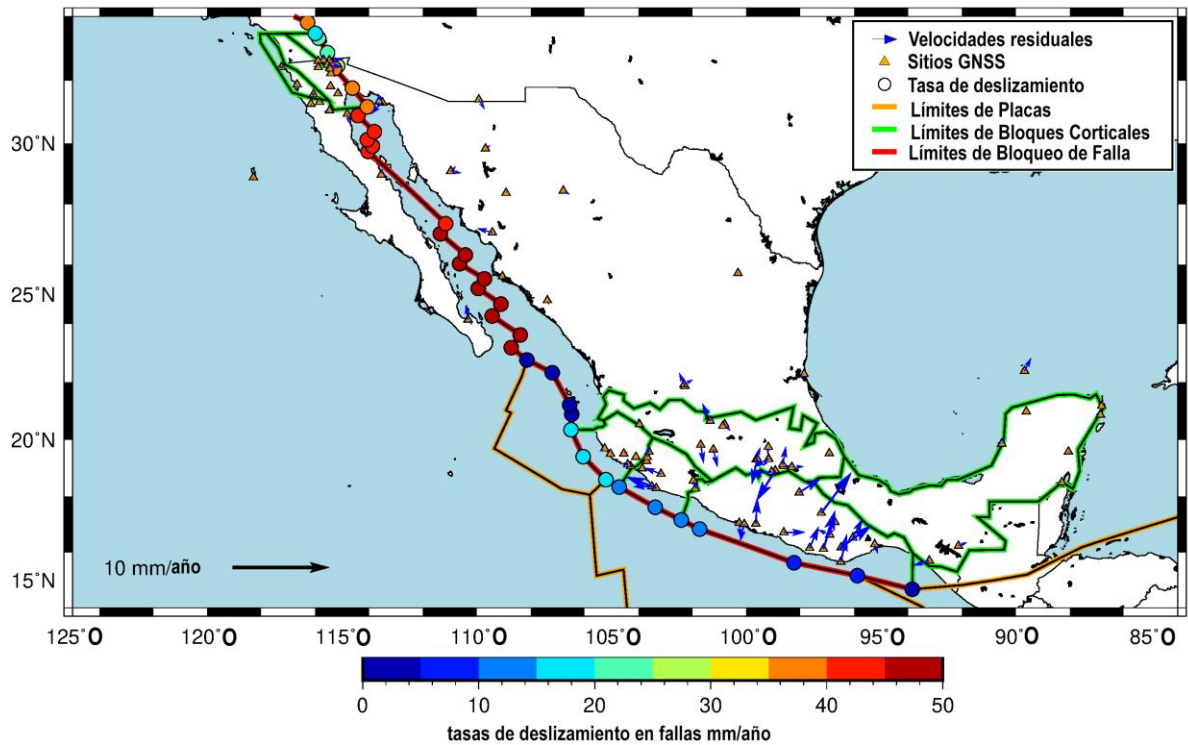


Figura 5.9. Tasas de deslizamiento en fallas y velocidades residuales entre las velocidades calculadas y modeladas en milímetros por año (positivas hacia el este, norte y arriba). Los círculos representan nodos de fallas y las flechas representan el vector de la tasa de deslizamiento. Las líneas amarillas representan los límites de las placas. Las líneas verdes representan los límites de los dominios corticales. Las líneas rojas representan el bloqueo en las fallas que delimitan los dominios.

5.3.2 Velocidades modeladas

Se puede observar que la placa de Cocos tiene un vector de velocidad más bajo que el observado después del límite convergente, ya que los vectores de velocidad son más grandes que en el Dominio de Guerrero. Para la placa de Rivera, se observa cómo en su convergencia con el Dominio de Jalisco tiene una tasa de velocidad más alta. También se observa de manera más clara, al igual que con las observaciones de los sitios GNSS, que las velocidades residuales más al norte del TMVB son más

bajas en comparación con las velocidades residuales más cercanas al límite convergente, incluida el área del TMVB y Jalisco, Michoacán y Guerrero. La placa del Pacífico tiene una velocidad diferente a la de la placa de Norteamérica, y se está separando de la placa de Cocos. Además, para otro enfoque en el análisis, se obtuvieron varios datos promedio para cada dominio analizado. Como se muestra en la Tabla 5.5 para los dominios ubicados en la placa del Pacífico, los dominios BODO, PRDO y ANDO exhiben velocidades promedio diferentes para cada dominio, con las diferencias de velocidades aumentando a medida que se acercan al límite transformante-convergente. La clara distinción en los vectores de velocidad entre BODO y ANDO es evidente en la Tabla 5.5. Las velocidades medias de BODO, midiendo -18.7 mm/año al este y 23.36 mm/año al norte, resaltan su dirección, mientras que ANDO muestra velocidades medias de -29.16 mm/año al este y 30.27 mm/año al norte. En cuanto a sus velocidades residuales y sigmas, y la relación entre ellos, eran más grandes en ANDO que en PRDO y BODO, lo que indica que el Dominio de Anza es una zona con mayor deformación debido a su mayor proximidad al límite de la placa. Las velocidades residuales promedio en los sitios restantes de la placa del Pacífico, donde no se definen dominios, aunque no son las más bajas en comparación con el resto de las velocidades residuales, obtuvieron valores más pequeños en comparación con las velocidades residuales en la placa de Norteamérica, con valores de 0.02 mm/año y 0.08 mm/año en las componentes este y norte, respectivamente.

Para los dominios ubicados en la placa de Norteamérica, es evidente que cada dominio tiene valores de velocidad significativamente diferentes debido a su ubicación en el límite convergente. El dominio con las velocidades residuales más altas es Guerrero, seguido de cerca por Michoacán. Sin embargo, Guerrero muestra sigmas promedio más altos que el resto de los dominios, lo que indica que las velocidades están muy dispersas debido a la alta frecuencia de eventos sísmicos y la no linealidad de las series temporales. También se observa una fuerte relación entre sigmas altos e incertidumbres para Guerrero. El Dominio de Michoacán muestra velocidades en dirección opuesta a Guerrero, sugiriendo una posible deformación

resultante de la rotación, que se discutirá más adelante. Las velocidades residuales promedio en los sitios restantes de la placa de Norteamérica, donde no se definen dominios, fueron las más bajas en comparación con el resto de las velocidades residuales, con valores de 0.04 mm/año y 0.01 mm/año en las componentes este y norte, respectivamente. El Dominio de Jalisco tiene velocidades más altas en la componente este que en la componente norte, lo que indica un error en el modelo diferente al resto de la placa de Norteamérica. En el caso del Dominio Maya, parece que el modelo se ajusta bien debido a sus velocidades residuales bajas.

5.3.3 Tasas de deformación

Como se muestra en la Figura 5.8, el Dominio de Anza, que interactúa entre la falla de Laguna Salada-Elsinore y la placa de Norteamérica, exhibió una tasa de deformación compresiva significativamente alta de -189.87 nanostrain/año (± 55.68), donde el signo negativo en los parámetros de tasas de deformación indica acortamiento de los bloques o dominios corticales. Este valor de E1 indica una compresión intensa con orientación N-S dentro del dominio. El valor de E2 para el Dominio de Anza se midió en 162.16 nanostrain/año (± 80.04), lo que sugiere una liberación de deformación en una dirección diferente Este-Oeste. El azimut fue de 0.61 grados (± 8.44), proporcionando información sobre la orientación de las fuerzas compresivas dominantes dentro del Dominio de Anza. El Dominio Coachella no se incluyó porque no hay estaciones en esta área, por lo que se consideró parte del Dominio de Anza para el modelo.

El Dominio de las Sierras Peninsulares mostró una tasa de deformación compresiva moderada de -33.41 nanostrain/año (± 2.23) en sentido SE-NO. El valor de E2 para el Dominio de fue notablemente más alto en 84.97 nanostrain/año (± 3.99) en sentido NE-SO. El azimut de E1, A1, se midió en 171.44 grados (± 0.91), proporcionando información sobre la orientación de las fuerzas compresivas predominantes dentro del Dominio.

El Dominio de Tierras Fronterizas demostró una tasa de deformación compresiva de -75.97 nanostrain/año (± 6.31) en sentido NE-SO. El valor de E2 para el Dominio de

fue de 15.37 nanostrain/año (± 8.24) en sentido NO-SE. El azimut de E1, A1, se encontró en 66.25 grados (± 3.24), proporcionando información sobre la orientación de las fuerzas compresivas principales dentro del Dominio. Estos resultados destacan las diferentes tasas de deformación y orientaciones de las fuerzas compresivas dominantes dentro del Dominio de Anza, el Dominio de las Sierras Peninsulares y el Dominio de Tierras Fronterizas, lo que contribuye a nuestra comprensión de la dinámica en esta región del límite de la placa de Norteamérica.

En la zona de límite convergente de la placa de Norteamérica, se obtuvieron valores diferentes para cada dominio. El Dominio de Jalisco exhibió una tasa de deformación compresiva muy alta de -77.22 nanostrain/año (± 2.76) en sentido NE-SO. El valor de E1 obtenido para el Dominio de Jalisco indica una compresión significativa en la región. Por el contrario, la tasa de deformación menos compresiva, E2, se midió en 7.03 nanostrain/año (± 2.51) en sentido NO-SE, lo que sugiere una liberación de deformación en una dirección diferente. El azimut, A1, de E1 se encontró en 39.3 grados (± 1.35), proporcionando información sobre la orientación de las fuerzas compresivas dominantes.

El Dominio de Michoacán mostró una tasa de deformación compresiva de -48.35 nanostrain/año (± 2.19) en sentido NE-SO, indicando un nivel moderado de compresión. El valor de E2 para el Dominio de Michoacán fue de -2.1 nanostrain/año (± 1.65) en sentido NO-SE, representando una tasa de deformación compresiva menor en comparación con E1. El azimut de E1, A1, se midió en 25.59 grados (± 1.67), proporcionando información sobre la orientación de las fuerzas compresivas predominantes en el Dominio de Michoacán. De manera similar, el Dominio de Guerrero, ubicado en una longitud de 261.114 y latitud de 17.62, exhibió una tasa de deformación compresiva relativamente más baja de -28.46 nanostrain/año (± 1.24) en sentido NE-SO. El valor de E2 para el Dominio de Guerrero fue de 2.14 nanostrain/año (± 1.16) en sentido NO-SE. El azimut de E1, A1, se encontró en 43.91 grados (± 1.36), proporcionando información sobre la orientación de las fuerzas compresivas principales en el Dominio de Guerrero.

El TMVB demostró una tasa de deformación compresiva menor de -1.05 nanostrain/año (± 0.91) con orientación NE-SO. El valor de E2 para el TMVB fue de 0.59 nanostrain/año (± 0.53) en sentido NO-SE, indicando una liberación mínima de deformación en una dirección diferente. El azimut de E1, A1, se midió en 44.11 grados (± 13.7), proporcionando información sobre la orientación de las fuerzas compresivas dominantes en el TMVB.

Finalmente, el Dominio Maya, ubicado en una longitud de 267.623 y latitud de 18.262 , exhibió una ligera tasa de deformación compresiva de -1.48 nanostrain/año (± 0.64) con orientación NE-SO. El valor de E2 para el Dominio Maya fue de 2.86 nanostrain/año (± 0.82) en sentido NO-SE. El azimut de E1, A1, se encontró en 20.38 grados (± 7.13), proporcionando información sobre la orientación de las fuerzas compresivas principales en el Dominio Maya. Estos hallazgos destacan las variaciones en las tasas de deformación y orientaciones de las fuerzas compresivas dominantes entre los dominios convergentes en la zona del límite de la placa de Norteamérica.

En cuanto a si los resultados están relacionados con el deslizamiento lento, Rivet et al. (2014) indican que la relajación rápida de la perturbación de velocidad, en comparación con la duración del deslizamiento, sugiere que el cambio en la velocidad de las ondas no está directamente relacionado con la deformación producida por el deslizamiento lento. La corteza presenta un comportamiento no lineal cuando se somete a deformaciones relativamente bajas, y el cambio relativo en la velocidad es una medida sólida que está correlacionada con la tasa de dilatación en profundidad. Una buena correlación entre la actividad de temblores no volcánicos y los cambios de velocidad durante 2009-2011 sugiere una relación entre la deformación de la placa sobrepuesta y los temblores no volcánicos.

Cosenza-Murales et al. (2022) afirman que se necesita una mejor cobertura GNSS en el estado de Michoacán y el oeste de Guerrero, donde la seguridad es una preocupación, para determinar si los eventos de deslizamiento lento en el mar o debajo del estado de Michoacán alivian una fracción significativa de la deformación

intersísmica acumulada. Si lo hacen, podrían explicar el bloqueo aparentemente más débil a lo largo de este segmento de la trinchera. También concluyen que hay evidencia de que la deformación elástica acumulada a lo largo del segmento de trinchera de aproximadamente 125 km frente a Puerto Vallarta y otras áreas costeras desarrolladas, donde ocurrió el último gran terremoto de empuje en 1932, es suficiente para liberar un terremoto de $M \sim 8.0$ si toda la energía elástica almacenada se liberara simultáneamente.

5.3.4 Tasas de Rotación

Como se observa en la Figura 5.8, la rotación no es uniforme en toda la zona de subducción; sin embargo, siguen la misma dirección en sentido antihorario, excepto para el Dominio de Michoacán y en menor medida, el Dominio Maya. De acuerdo con los trabajos de Hagstrum y Filmer (1990) y Bennett y Oskin (2014), la rotación en el norte de Baja California exhibe una dirección en sentido horario debido a la extensión causada por la formación del Golfo de California y la presencia de fallas de desgarre.

Las mayores rotaciones en relación con la placa de Norteamérica ocurren en el área de Mexicali, en el Dominio de Anza, con un valor de -5.23 grados/Ma. Para el Dominio de Sierras Peninsulares, en la misma área, se obtuvieron valores de -1.7129 grados/Ma, también en dirección horaria, pero con magnitudes más pequeñas. Sin embargo, en el área de Ensenada y Tijuana, dentro del Dominio de Tierras Fronterizas, se obtuvieron valores de rotación en sentido antihorario, lo que puede atribuirse a problemas de calidad de los datos, ya que esta área tenía menos puntos de datos en comparación con otras.

En cuanto al Dominio de Michoacán, de acuerdo con Rosas-Elguera et al. (2003), los datos paleomagnéticos indican una rotación en sentido antihorario de aproximadamente 24° alrededor de un eje vertical para el Dominio de Michoacán. Esto es consistente con los resultados presentados, ya que muestran diferentes rotaciones entre la rotación en sentido horario en el Dominio de Jalisco y la rotación en sentido antihorario en el Dominio de Michoacán.

5.3.5 Tasas de Deslizamiento

En la Figura 5.9, se muestran los valores de tasa de deslizamiento resultantes del modelo las cuales tienen valores que van de 10 a 50 mm/año. Se puede observar el cambio en la dirección de la tasa de deslizamiento donde la placa del Pacífico interactúa con la placa de Norteamérica, así como donde la placa Rivera interactúa con la placa de Norteamérica. También se observa un cambio en los vectores de tasa de deslizamiento en el límite convergente entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica. Con una disminución gradual hacia el sureste, los dominios de Jalisco, Michoacán y Guerrero presentan vectores de magnitudes decrecientes en ese orden. La región de la placa Rivera exhibe dos tasas de deslizamiento completamente distintas, lo que indica diferentes límites tectónicos de la Placa Rivera, consistentes con la Zona de Fractura Tamayo, el Escarpe Tres Marías y la Fosa Mesoamericana. De acuerdo con estudios previos (DeMets y Stein, 1990), se ha observado una sismicidad de bajo nivel a lo largo del Escarpe Tres Marías y el segmento oriental de la Zona de Fractura Tamayo, lo que sugiere que esta sismicidad refleja el movimiento relativo entre la Placa Rivera y la Placa de Norteamérica.

CAPÍTULO 6

6. Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo Futuro

6.1 Movimiento de placas

Dada la escasez de estudios fuera de las zonas límite de la placa principal descritas en las secciones anteriores, se destaca la necesidad de una mayor cantidad de sitios GNSS con datos continuos distribuidos para obtener una solución más precisa del campo de velocidades de deformación de la corteza en México. La obtención de más datos proporcionará una mejor comprensión de los procesos tectónicos responsables de la deformación en México, especialmente la interacción entre la Placa de Norteamérica y la Placa de Cocos.

Es imperativo realizar un análisis detallado de las tasas y patrones de deformación en diferentes regiones de México, incluyendo el CVTM y el Golfo de California. Dada la falta de claridad en los límites entre los dominios corticales, es necesario profundizar en el campo de deformación moderna dentro de estos dominios. La cobertura limitada de las redes geodésicas en el pasado ha contribuido a esta falta de conocimiento en muchos de los dominios.

Se observa que el movimiento de los sitios es consistente con el desplazamiento de las placas tectónicas, esto se puede observar al analizar las velocidades residuales de los sitios con respecto a alguna placa tectónica. Para ello se utilizó el modelo de la Placa de Norteamérica (NAM08), del cual las velocidades relativas más bajas que se obtuvieron fueron las de los sitios que se ubican sobre dicha placa y los sitios que se encuentran más alejados del límite convergente.

Los sitios con menores velocidades residuales y menor RMS son aquellos ubicados en las áreas más alejadas de la zona de influencia del límite convergente (MTY2, TAMP, ICAM, CAM2, MERI, MMD1, CNC0, TGMX, UNPM y CHET) con excepción del sitio INEG, el cual es un sitio bastante inestable, causado por un alto grado de subsidencia.

Otros sitios con las velocidades residuales más bajas y el RMS más bajo son los más alejados del límite transformante de la placa de Norteamérica (AZCO, USMX, HER2, SA27, YESX, TNTB y CULI) y la placa del Pacífico con vectores de velocidad grandes, pero RMS bajo (CIC1, CICE, DAEX, IPAZ, LPAZ, MSD1, PSTX, PTAX, PTEX, QUEX, SA33, SPMX).

Los mayores resultados de RMS se dieron en aquellos sitios ubicados en el área de influencia del límite convergente, como el Cinturón Volcánico Transmexicano (MMX1, POPN, POSW, SG21, TOL2, UNIP, UTON y YAIG) y el resto de los sitios de la zona (ACAP, CAYA, COL2, COOB, COYU, CPDP, CRIP, DOAR, FARO, IGUA, MPR1, OAX2, OAXA, OXEC, OXLP, OXMC, OXPE, OXTH, OXTU, PINO, PURI, TNAM, TNCN, TNMO UCOE, ZIHP).

6.2 Velocidades residuales

Como resultado, los sitios ubicados en la placa del Pacífico se mueven en relación con el desplazamiento de la placa de Norteamérica con velocidades relativas cercanas a -30 mm/año en el este y 30 mm/año en el norte. El sitio MEXI tiene un vector de velocidad diferente a los sitios en la misma área con -17.36 mm/año en el este y 18.30 mm/año en el norte y tiene un gran break relacionado con el sismo ocurrido el 4 de abril de 2010 (Mw 7.2) El Mayor-Cucapah. Esto posiblemente se deba a la zona de alta deformación y transición entre placas donde se ubica. Con respecto a los sitios ubicados en la placa de Norteamérica, los ubicados en el límite transformante se mueven de acuerdo al movimiento de esta placa con vectores de velocidad que no superan los 2 mm/año en las componentes este y norte. Y los sitios que se ubican en la zona del límite convergente, se mueven de acuerdo con el movimiento de esta placa con velocidades relativas mayores que las del resto de los sitios ubicados en diferentes ambientes. Las velocidades relativas a la placa de Norteamérica de los sitios ubicados en la zona del límite convergente van desde 2 mm/año hasta aproximadamente 4 mm/año para los sitios ubicados al norte del Cinturón Volcánico Transmexicano y desde 2 mm/año hasta aproximadamente 4 mm/año. Se reportan velocidades de 20 mm/año para sitios ubicados al sur del

Cinturón Volcánico Transmexicano. Aunque todos los sitios de esta zona tienen un movimiento hacia el noreste, tienen diferentes magnitudes y direcciones en los vectores de velocidad entre ellos, esto puede estar relacionado con su ubicación en diferentes dominios corticales con diferentes edades y geodinámicas. En el caso de la placa de Norteamérica, los sitios ubicados más al norte del Cinturón Volcánico Transmexicano son los que tienen un movimiento que mejor se ajusta al movimiento dado por el modelo de la placa de Norteamérica y los sitios más al sur tienen un movimiento con mayor diferencia al modelo de la placa de Norteamérica, además de tener menos error que los sitios ubicados más al sur del Cinturón Volcánico Transmexicano con excepción del sitio del INEG. En ambos casos, el sitio del INEG tiene un comportamiento irregular similar en el que se observa una tendencia no lineal y que cambia constantemente de dirección en la serie de tiempo.

6.3 Comparación de velocidades

En este apartado, comparamos los resultados obtenidos en este estudio con datos GNSS de los sitios CHET, CULI, INEG, TAMP, MERI, IPAZ y MEXI con investigaciones previas (Márquez-Azúa y DeMets, 2003; Márquez-Azúa y DeMets, 2009). Las posiciones y velocidades se calcularon en el marco de referencia ITRF2005, utilizado también en el estudio de Márquez-Azúa y DeMets (2009). Ciertas diferencias podrían deberse en función la estimación del tipo de ruido, por ejemplo para la comparación de velocidades procesadas con GipsyX se utilizó la estimación del ruido de caminata aleatoria. La caminata aleatoria, a diferencia del ruido blanco, se caracteriza por la dependencia temporal entre mediciones consecutivas. Mientras que el ruido blanco es un proceso independiente en el que los valores son aleatorios y no están correlacionados, el ruido de caminata aleatoria introduce una correlación entre observaciones sucesivas, lo que puede generar tendencias falsas en las series de tiempo si no se corrige adecuadamente. Esto permite detectar con mayor precisión señales físicas reales, como los movimientos tectónicos, separándolos de artefactos generados por ruido no modelado.

En el sitio CHET, se observa un contraste interesante. Con velocidades de -4.7 mm/año hacia el este y -1.87 mm/año hacia el norte, las diferencias con respecto a 2003 son de 0.46 mm/año hacia el este y -0.33 mm/año en el norte, mientras que en 2009 se mostró un aumento mayor de 2.48 mm/año y -2.7 mm/año. Esto sugiere un aumento significativo de las diferencias de velocidad en las direcciones este y norte, en la misma magnitud y direcciones hacia el sureste. El sitio CULI, con velocidades de -9.99 mm/año hacia el este y -6.9 mm/año hacia el norte, no mostró un cambio significativo en la velocidad hacia el norte según tanto 2003 como 2009, con cambios de -0.69 mm/año y -0.75 mm/año, respectivamente. Pero en la componente norte, hubo un cambio sustancial en las diferencias de velocidades según tanto 2003 como 2009. Para la componente norte, no hay diferencias con respecto los datos de 2003, sin embargo, para 2009 se reportó una diferencia de 2.2 mm/año. El sitio INEG muestra cambios tanto en las velocidades hacia el este como hacia el norte. Con velocidades de -10.81 mm/año hacia el este y -4.28 mm/año hacia el norte, las mayores diferencias en el este se observan en la comparación con 2009 de 2.2 mm/año hacia el este y diferencias más pequeñas en el norte de -0.07. Las mayores diferencias en el norte se observan en la comparación con 2003 de -2.41 mm/año hacia el norte y diferencias más pequeñas en el este de 0.62. En el sitio TAMP, con velocidades de -9.22 mm/año hacia el este y -2.81 mm/año hacia el norte, en 2003 se informó una diferencia significativa en el movimiento hacia el este de 1.69 mm/año, mientras que en 2009 se informó un aumento mayor de 3.05 mm/año. En 2003 se informó una diferencia menor hacia el norte de 1.69 mm/año, mientras que en 2009 se informó una diferencia de -1.9 mm/año. En el sitio MERI, con velocidades de -8.88 mm/año hacia el este y 0.27 mm/año hacia el norte, en 2003 se informó una pequeña diferencia de 0.37 mm/año, mientras que en 2009 se informó un aumento mayor de 2.92 mm/año. En 2003, la componente norte informó una pequeña diferencia de -0.38 mm/año, mientras que en 2009 la diferencia fue mayor con -3.24 mm/año. En el sitio IPAZ, con velocidades de -48.3 mm/año hacia el este y -20.78 mm/año hacia el norte, ubicado en la placa del Pacífico, 2009 informó diferencias con este trabajo de 1.28 mm/año hacia el este y 2.16 mm/año en el norte. El sitio MEXI, con velocidades de -27.7 mm/año hacia el este y 10.31 mm/año hacia el norte, 2009

informó pequeñas diferencias con este trabajo en comparación con otros sitios del mismo trabajo en 2009 de -1.92 mm/año hacia el este y 1.2 en el norte, y esto es notable, ya que este sitio es uno de los más influenciados por terremotos además de estar ubicado en la placa del Pacífico junto con IPAZ.

Como se muestra en la Figura 5.10, los resultados se compararon con otras velocidades publicadas en el marco de referencia de la ITRF. ITRF2014 para los sitios de este estudio, sitios CORS¹⁹ y sitios EarthScope²⁰, ITRF2005 para los sitios RGNA 2009 e ITRF2003 para los sitios RGNA 2003. CORS y EarthScope son más consistentes con los resultados de este estudio que los sitios RGNA 2003 y RGNA 2009, excepto por los sitios de alto RMS como OAX2 o INEG. Tanto para CORS como para EarthScope, la dirección de los vectores de velocidad es ligeramente diferentes en el área del límite convergente.

En la región de Baja California se observa que existe una diferencia notable en los vectores de velocidad de EarthScope, siendo estos de menor magnitud que los sitios procesados (aproximadamente una diferencia de 2 mm/año pero con la misma dirección). Los sitios más cercanos al límite transformante son las que más varían en dirección y magnitud: DAEX con diferencias de 1 a 2 mm en las componentes este y norte, respectivamente; QUEX (Con diferencias de más de 2 mm en la componente norte). En el caso de MEXI, los resultados CORS muestran diferencias de más de 5 mm en la componente Este, y para el estudio RGNA 2003, se muestran resultados de aproximadamente 3 mm en la componente norte. En el caso de Baja California Sur, el sitio IPAZ no supera una diferencia de 0.31 mm/año, en el caso de MSD1 existen diferencias de aproximadamente 1 mm/año y para LPAZ en comparación con CORS las diferencias no superan un milímetro, pero con RGNA 2003 hay una diferencia bastante notable que supera los 2 mm/año.

¹⁹https://geodesy.noaa.gov/corsdata/coord/coord_14/

²⁰<https://data.unavco.org/archive/gnss/products/velocity/>

Los sitios ubicados en Sonora y Sinaloa no reportaron diferencias muy grandes, a excepción de CULI en los estudios RGNA 2003 y CORS con diferencias de casi 3 mm/año. En el límite convergente, los sitios ubicados en la faja volcánica presentan bastantes diferencias en todos los casos, a excepción de los ubicados en las cercanías de Jalisco (MPR1, PURI, TNAM). En Oaxaca las páginas con menos diferencias al trabajo realizado fueron OXTH y OXTU, y las que mayores diferencias encontraron fueron OXPE y OAX2. En el caso de los demás sitios ubicados en la zona de influencia del límite convergente se obtuvieron diferencias de hasta 0.12 mm/año para MTY2, hasta 9 mm/año para INEG y (TAMP) (MTY2). En Península de Yucatán (CAM2, ICAM, MERI, MMD1, CNC0, UNPM, TGMX Y CHET) las diferencias fueron regulares, menores a 1.2 mm. Además, se obtuvieron diferencias de velocidades (Figura 5.11) dependiendo del software utilizado, para esto se compararon los resultados obtenidos por GAMIT/GLOBK Y GipsyX para 37 estaciones y un periodo de tiempo de 3 años que abarca del 2011 al 2013.

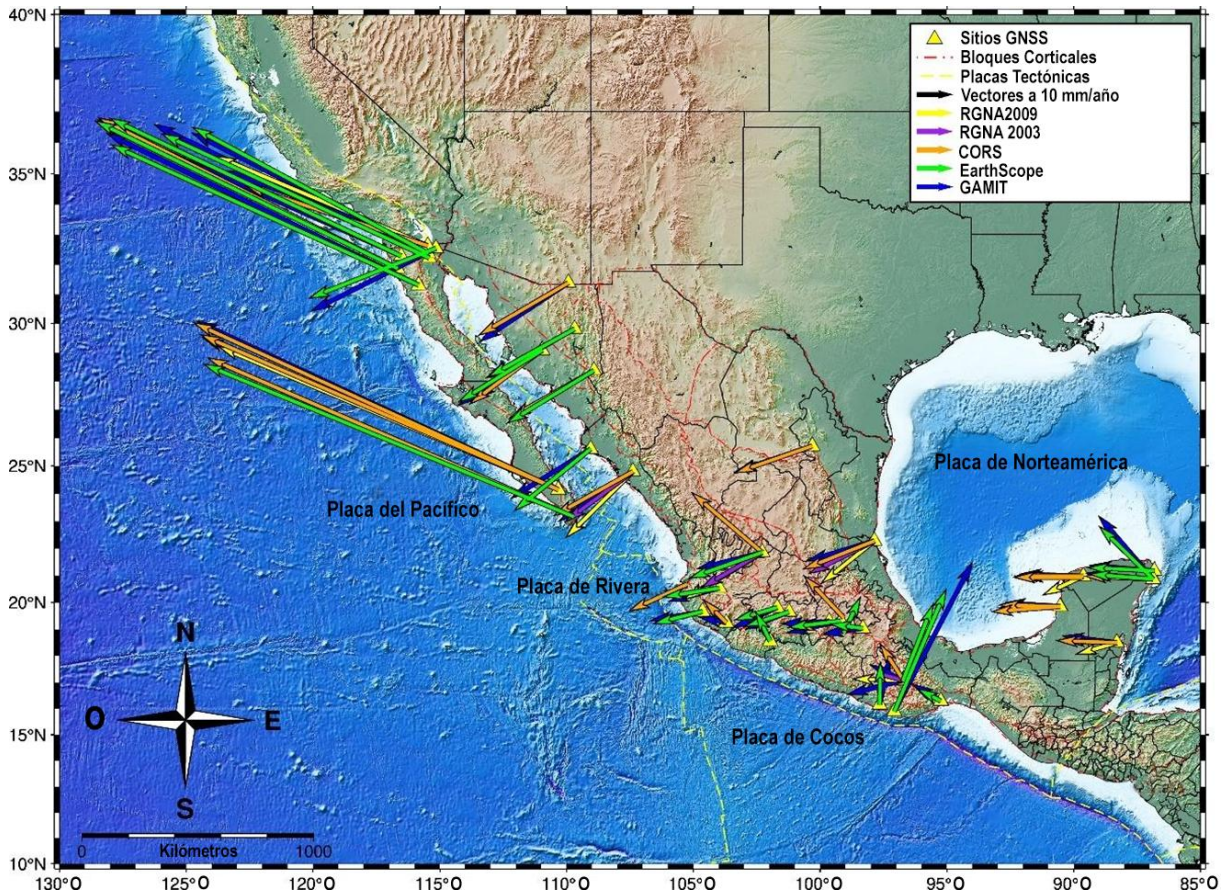


Figura 5.10. Campo de velocidad de la corteza de trabajos anteriores. Las flechas azules representan las velocidades obtenidas en este estudio. Las flechas rojas indican las velocidades publicadas por CORS. Las flechas amarillas indican las velocidades publicadas por EarthScope. Las flechas moradas y verdes indican las velocidades de algunos sitios RGNA que se obtuvieron en 2003 y 2009 respectivamente.

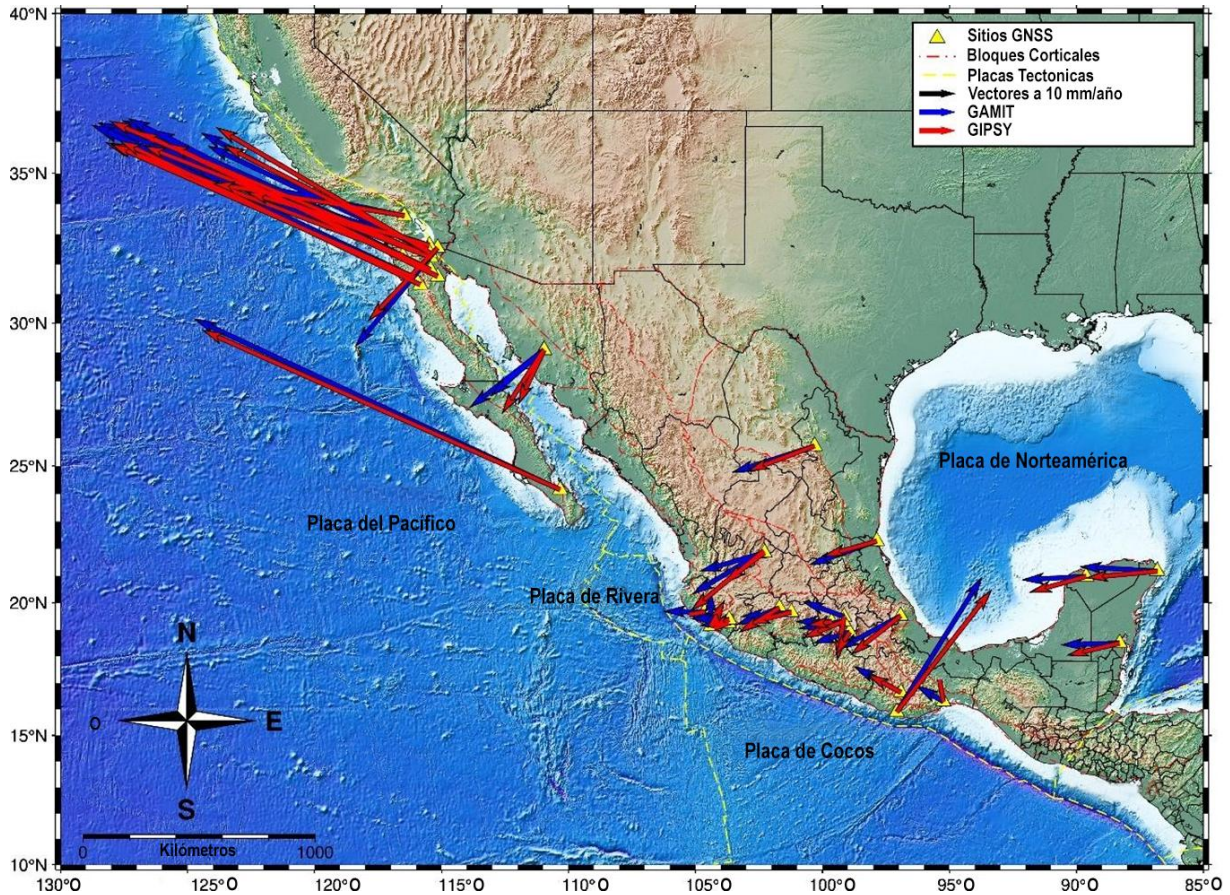


Figura 5.11. Velocidades de los resultados procesados en GAMIT (flechas azules) y GIPSY (Flechas rojas).

6.4 Modelo de Bloques

Como se muestra en la Figura 5.2, las velocidades de los dominios corticales dentro del área de estudio presentan variaciones significativas. Los dominios más cercanos al límite convergente tienden a tener velocidades más altas, lo que indica una mayor deformación y actividad tectónica.

El Dominio de Michoacán evidencia deformación inducida por la rotación, ya que sus velocidades muestran una dirección diferente en comparación con los dominios vecinos, lo que sugiere que la rotación desempeña un papel importante en los patrones de deformación en esta región.

En contraste, no es posible sacar conclusiones definitivas sobre la influencia de la rotación en el Dominio ANDO, debido a la falta de estudios que respalden estos resultados.

Por otro lado, el Dominio de Guerrero presenta una falta de ajuste en el modelo, lo que podría indicar la existencia de un dominio no considerado en este estudio. Para abordar esta limitación, sería necesario instalar un mayor número de estaciones en esta zona y realizar estudios sobre las fallas que delimitan este dominio. Además, un análisis más detallado podría ser objeto de futuras investigaciones.

La Zona de Límite Convergente ya ha sido estudiada por otros autores (Larson et al., 2007; Radiguet et al., 2012), lo que indica que durante los períodos de tiempo entre eventos de deslizamiento lento (SSE), el acoplamiento entre placas es alto en el área donde ocurre el subsiguiente deslizamiento lento. En el caso del "gap de Guerrero" en México, la porción poco profunda de la interfaz de placas desde la trinchera hasta la costa está débilmente acoplada. El déficit promedio de deslizamiento acumulado en el gap de Guerrero durante un período de 12 años, correspondiente a tres ciclos de SSE, es solo una cuarta parte del déficit de deslizamiento acumulado en ambos lados del hueco. Se concluye que los SSE en el gap de Guerrero liberan una parte significativa de la deformación acumulada durante el período entre eventos de deslizamiento lento. Si ocurrieran grandes terremotos de subducción en el gap de Guerrero, es probable que su tiempo de recurrencia sea más largo en comparación con regiones adyacentes. Además, un gran deslizamiento asísmico transitorio ocurrió en el área de Guerrero de abril a diciembre de 2006, generando desplazamientos horizontales de casi 6 cm en dirección opuesta a los registrados durante el período interísmico. Este episodio de deslizamiento transitorio sigue de cerca una serie de eventos de intraplaca profundos con magnitudes de 5 que ocurrieron en la parte noroeste de la región de Guerrero. Este evento de deslizamiento tiene una magnitud de momento mínimo equivalente (M_w) de 7.5. El Dominio de Guerrero tuvo el peor ajuste del modelo, mostrando un alto valor de RMS, las peores incertidumbres y las velocidades residuales más altas en comparación con el modelo. Esto se debe a que

el límite convergente es una zona con alta actividad sísmica debido a la interacción entre placas que ocurre en esta área.

Los resultados de este estudio muestran que las tasas de deformación y las rotaciones en la zona de límite convergente de la placa de Norteamérica no son uniformes. El Dominio de Jalisco exhibe las tasas de deformación y rotaciones más altas, seguido del Dominio de Michoacán y luego del Dominio de Guerrero. Como se mencionó anteriormente, la región de la placa Rivera muestra dos tasas de deslizamiento completamente distintas, lo que indica diferentes límites tectónicos de la Placa Rivera. La rotación en sentido horario observada en Jalisco indica una rotación en sentido antihorario para el Dominio de Michoacán. Esto sugiere que los dos dominios están rotando en direcciones opuestas. Los valores de tasa de deslizamiento en el modelo son consistentes con estudios previos para el límite de desgarre, variando entre 10 y 50 mm/año. Los vectores más grandes se encuentran en el Dominio de Jalisco, seguidos por el Dominio de Michoacán y luego el Dominio de Guerrero, con una disminución gradual hacia el sureste.

También se ajustaron las profundidades de bloqueo de los dominios en el límite de desgarre en el Golfo de California para reducir los residuales cerca de la falla. Estas profundidades se encontraron alrededor de 5 km, indicando profundidades de bloqueo poco profundas, lo cual es consistente con estudios previos (Spinler et al., 2015). También fue beneficioso agregar fallas en la parte norte de Baja California para mejorar la precisión del modelo. El ANDO mostró tasas de deformación notablemente más altas y una rotación significativa en sentido horario de -5.23 grados/Ma, mientras que otros dominios de la placa del Pacífico (BODO y PRDO) mostraron magnitudes y direcciones de rotación diferentes de -1.71 grados/Ma y 1.54 grados/Ma, respectivamente.

Las tasas de deslizamiento en la región fueron consistentes con estudios previos (Bennett et al., 1996), y se observaron patrones distintos a lo largo de diferentes límites tectónicos. Más adelante se comparan las tasas de deslizamiento obtenidas

en la presente tesis con los valores reportados por Bennett et al. (1996) en diferentes segmentos tectónicos al norte y sur de la frontera entre Baja California y California:

En el norte de la frontera Baja California-California Bennett et al. (1996) reportan tasas de deslizamiento para segmentos de la falla de San Andrés (SA1-SA4) y las fallas de Brawley (B) e Imperial (I), con valores que oscilan entre 22 y 35 mm/año. En contraste, esta tesis presenta resultados para los segmentos NOAX-ANDO (19-24 mm/año) y NOAX-PCFC (39-41 mm/año).

En el sur de la frontera Baja California-California, las tasas de Bennett et al. (1996) varían de 16 mm/año en Mexicali (M) hasta 42 mm/año en Cerro Prieto (CP) e Imperial (I). Los resultados de esta tesis incluyen los segmentos NOAM-PRDO (37 mm/año), NOAM-ANDO (26-31 mm/año) y NOAM-PCFC (41 mm/año).

6.5 Conclusión

El movimiento de los sitios analizados es coherente con el desplazamiento de las placas tectónicas. Exceptuando la zona de deformación, todos los sitios se desplazan de manera paralela a los movimientos relativos de las placas a gran escala. Los sitios ubicados en la Placa del Pacífico muestran velocidades relativas respecto a la Placa de Norteamérica cercanas a -30 mm/año hacia el este y 30 mm/año hacia el norte. Para las estaciones situadas en la Placa de Norteamérica, las ubicadas en el límite transformante se mueven de acuerdo con el desplazamiento de dicha placa, con vectores de velocidad que no superan los 2 mm/año tanto hacia el este como hacia el norte.

En el límite convergente, las velocidades relativas a la Placa de Norteamérica varían entre 2 mm/año y ~4 mm/año para los sitios ubicados al norte del Cinturón Volcánico Transmexicano, y entre 2 mm/año y 20 mm/año para los sitios situados al sur de esta zona. Aunque todos los sitios en esta área presentan un movimiento hacia el noreste, las magnitudes y direcciones de los vectores de velocidad varían, lo que podría estar relacionado con su localización en diferentes dominios corticales de distintas edades y características geodinámicas.

Las velocidades dentro de los dominios corticales estudiados muestran variaciones significativas. Los dominios más cercanos a la zona de convergencia tienden a exhibir mayores velocidades, lo que indica una mayor deformación y actividad tectónica. JALI presenta las tasas de deformación más elevadas, con -111 nanostrain/año en la tasa de compresión más alta y 28 nanostrain/año en la más baja, junto con rotaciones anti horarias de +0.156 grados/Ma. MICH muestra tasas de deformación de -48 nanostrain/año en la compresión más alta y -2 nanostrain/año en la más baja, con una rotación de +0.492 grados/Ma. GUER tiene las tasas de deformación más bajas, con -28 nanostrain/año en la compresión más alta, 2 nanostrain/año en la más baja, y una rotación de +0.057 grados/Ma. Los valores de velocidad de deslizamiento en el modelo son consistentes con estudios previos para el límite transformante, que reportan variaciones entre 10 y 50 mm/año. Los vectores de mayor magnitud se registran en JALI (19.7, 19.1, 15.3, y 19.7 mm/año en cada nodo), seguidos por MICH (14.7, 13.5, y 11.5 mm/año en cada nodo), y luego GUER (14.6, 14, 9.4, 5.52, y 2.5 mm/año en cada nodo), mostrando una disminución gradual hacia el sureste.

El análisis de los desplazamientos en las estaciones GNSS muestra una coherencia general con los movimientos tectónicos conocidos, pero las diferencias en las velocidades de deslizamiento y las tasas de deformación dentro de los diferentes dominios corticales sugieren que hay procesos dinámicos adicionales que requieren una mayor investigación. Para continuar profundizando en la comprensión de estos fenómenos, se recomienda realizar estudios adicionales que utilicen series de tiempo más largas y más detalladas, así como el empleo de otros métodos de modelado para investigar la interacción entre diferentes dominios corticales. Finalmente, este estudio proporciona características importantes sobre tasas de deformación, rotaciones y velocidades de deslizamiento dentro de los dominios corticales estudiados. Estos hallazgos contribuyen a una mejor comprensión de los complejos procesos tectónicos en la zona estudiada y sirven como base para futuras investigaciones y evaluaciones de peligros sísmicos en esta región.

Referencias

- Altamimi, Z., Metivier, L. & Collilieux, X. 2012. ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 117.
- Altamimi, Z., Metivier, L., Rebischung, P., Rouby, H. & Collilieux, X. 2017. ITRF2014 plate motion model. *Geophysical Journal International*, 209, 1906-1912.
- Artola, C., Iglesias, A., Kostoglodov, V., Franco-Sánchez, S. I., Hjörleifsdóttir, V., Cabral-Cano, E. & Santoyo, M. A. 2017. A Simplified Method to Invert Slow Slip Events: Examples for the 2002, 2006 and 2014 events in Guerrero, Mexico. *Geofísica Internacional*, 56, 377-389.
- Atwater, T. & Stock, J. 1998. Pacific-North America plate tectonics of the Neogene southwestern United States: an update. *International Geology Review*, 40, 375-402.
- Barckhausen, U., Ranero, C. R., Huene, R. v., Cande, S. C. & Roeser, H. A. 2001. Revised tectonic boundaries in the Cocos Plate off Costa Rica: Implications for the segmentation of the convergent margin and for plate tectonic models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106, 19207-19220.
- Bennett, R., Reilinger, R. & Gonzalez, J. 1992. GPS measurements in southernmost California/northern Baja-Mexicali Valley: Continental deformation in a transcurrent/extensional environment. *EOS, Trans. AGU*, 75, 164.
- Bennett, R. A., Rodi, W. & Reilinger, R. E. 1996. Global Positioning System constraints on fault slip rates in southern California and northern Baja, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101, 21943-21960.
- Bennett, S. E. & Oskin, M. E. 2014. Oblique rifting ruptures continents: Example from the Gulf of California shear zone. *Geology*, 42, 215-218.
- Bertiger, W., Bar-Sever, Y., Dorsey, A., Haines, B., Harvey, N., Hemberger, D., Heflin, M., Lu, W., Miller, M., Moore, A. W., Murphy, D., Ries, P., Romans, L., Sibois, A., Sibthorpe, A., Szilagy, B., Vallisneri, M. & Willis, P. 2020. GipsyX/RTGx, a new

tool set for space geodetic operations and research. *Advances in Space Research*, 66, 469-489.

Blewitt, G. 1989. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 Km. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 94, 10187-10203.

Blewitt, G. 1993. Advances in Global Positioning System technology for geodynamics investigations: 1978–1992. *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Technology*, 195-213.

Blewitt, G. & Lavallee, D. 2002. Effect of annual signals on geodetic velocity. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 107.

Bock, Y. & Melgar, D. 2016. Physical applications of GPS geodesy: A review. *Reports on Progress in Physics*, 79, 106801.

Böhm, J., Niell, A., Tregoning, P. & Schuh, H. 2006. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophysical research letters*, 33.

Broermann, J., Bennett, R. A., Kreemer, C., Blewitt, G. & Pearthree, P. A. 2021. Geodetic extension across the southern Basin and Range and Colorado Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB021355.

Brudzinski, M., Cabral-Cano, E., Correa-Mora, F., DeMets, C. & Márquez-Azúa, B. 2007. Slow slip transients along the Oaxaca subduction segment from 1993 to 2007. *Geophysical Journal International*, 171, 523-538.

Brudzinski, M. R., Hinojosa-Prieto, H. R., Schlanser, K. M., Cabral-Cano, E., Arciniega-Ceballos, A., Diaz-Molina, O. & DeMets, C. 2010. Nonvolcanic tremor along the Oaxaca segment of the Middle America subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115.

Brudzinski, M. R., Schlanser, K. M., Kelly, N. J., DeMets, C., Grand, S. P., Márquez-Azúa, B. & Cabral-Cano, E. 2016. Tectonic tremor and slow slip along the

northwestern section of the Mexico subduction zone. *Earth Planetary Science Letters*, 454, 259-271.

Butler, R. F. 1992. *Paleomagnetism: magnetic domains to geologic terranes*, Blackwell Scientific Publications Boston.

Cabral-Cano, E., Pérez-Campos, X., Márquez-Azúa, B., Sergeeva, M., Salazar-Tlaczani, L., DeMets, C., Adams, D., Galetzka, J., Hodgkinson, K. & Feaux, K. 2018. TLALOCNet: A continuous GPS-Met backbone in Mexico for seismotectonic and atmospheric research. *Seismological Research Letters*, 89, 373-381.

Campa, M. F. & Coney, P. J. 1983. Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1040-1051.

Cetin, S., Aydin, C. & Dogan, U. 2019. Comparing GPS positioning errors derived from GAMIT/GLOBK and Bernese GNSS software packages: A case study in CORS-TR in Turkey. *Survey Review*, 51, 533-543.

Colella, H. V., Sit, S. M., Brudzinski, M. R., Graham, S. E., DeMets, C., Holtkamp, S. G., Skoumal, R. J., Ghouse, N., Cabral-Cano, E. & Kostoglodov, V. 2017. Seismicity rate increases associated with slow slip episodes prior to the 2012 Mw 7.4 Ometepe earthquake. *Earth Planetary Science Letters*, 464, 35-45.

Correa-Mora, F., DeMets, C., Cabral-Cano, E., Marquez-Azua, B. & Diaz-Molina, O. 2008. Interplate coupling and transient slip along the subduction interface beneath Oaxaca, Mexico. *Geophysical Journal International*, 175, 269-290.

Correa-Mora, F., DeMets, C., Cabral-Cano, E., Diaz-Molina, O. & Marquez-Azua, B. 2009. Transient deformation in southern Mexico in 2006 and 2007: Evidence for distinct deep-slip patches beneath Guerrero and Oaxaca. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10.

Cosenza-Murales, B., DeMets, C., Márquez-Azúa, B., Sánchez, O., Stock, J., Cabral-Cano, E. & McCaffrey, R. 2022. GPS-derived interseismic fault locking along

the Jalisco–Colima segment of the Mexico subduction zone. *Geophysical Journal International*, 228, 2174-2197.

Cruz-Atienza, V., Tago, J., Villafuerte, C., Wei, M., Garza-Girón, R., Dominguez, L., Kostoglodov, V., Nishimura, T., Franco, S. & Real, J. 2020. Short-Term Interaction between Silent and Devastating Earthquakes in Mexico.

Cruz-Atienza, V. M., Ito, Y., Kostoglodov, V., Hjörleifsdóttir, V., Iglesias, A., Tago, J., Calò, M., Real, J., Husker, A. & Ide, S. 2018. A seismogeodetic amphibious network in the Guerrero seismic gap, Mexico. *Seismological Research Letters*, 89, 1435-1449.

Dach, R., Lutz, S., Walser, P. & Fridez, P. 2015. Bernese GNSS software version 5.2. University of Bern, Bern Open Publishing.

DeMets, C., Carmichael, I., Melbourne, T., Sanchez, O., Stock, J., Suarez, G. & Hudnut, K. 1995. Anticipating the successor to Mexico's largest historical earthquake. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 76, 417-424.

DeMets, C. & Dixon, T. H. 1999. New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 Ma to present, I: Evidence for steady motion and biases in the NUVEL-1A model. *Geophysical Research Letters*, 26, 1921-1924.

DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F. & Stein, S. 1990. Current Plate Motions. *Geophysical Journal International*, 101, 425-478.

DeMets, C., Márquez-Azúa, B. & Cabral-Cano, E. 2014a. A new GPS velocity field for the Pacific Plate–Part 1: constraints on plate motion, intraplate deformation, and the viscosity of Pacific basin asthenosphere. *Geophysical Journal International*, 199, 1878-1899.

DeMets, C., Márquez-Azúa, B. & Cabral-Cano, E. 2014b. A new GPS velocity field for the Pacific Plate–Part 2: implications for fault slip rates in western California. *Geophysical Journal International*, 199, 1900-1909.

- DeMets, C. & Stein, S. 1990. Present-day kinematics of the Rivera plate and implications for tectonics in southwestern Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95, 21931-21948.
- DeMets, C. & Wilson, D. S. 1997. Relative motions of the Pacific, Rivera, North American, and Cocos plates since 0.78 Ma. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 2789-2806.
- Dixon, T., Decaix, J., Farina, F., Furlong, K., Malservisi, R., Bennett, R., Suarez-Vidal, F., Fletcher, J. & Lee, J. 2002. Seismic cycle and rheological effects on estimation of present-day slip rates for the Agua Blanca and San Miguel-Vallecitos faults, northern Baja California, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107, ETG 5-1-ETG 5-23.
- Dixon, T., Farina, F., DeMets, C., Suarez-Vidal, F., Fletcher, J., Marquez-Azua, B., Miller, M., Sanchez, O. & Umhoefer, P. 2000. New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 Ma to present, II: Evidence for a "Baja California shear zone". *Geophysical Research Letters*, 27, 3961-3964.
- Dixon, T. H., Gonzalez, G., Lichten, S. M., Tralli, D. M., Ness, G. E. & Dauphin, J. P. 1991. Preliminary determination of Pacific-North America relative motion in the southern Gulf of California using the Global Positioning System. *Geophysical Research Letters*, 18, 861-864.
- Dong, D. N. & Bock, Y. J. J. o. G. R. S. E. 1989. Global Positioning System network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California. 94, 3949-3966.
- Dunn, P., Robbins, J., Bosworth, J. & Kolenkiewicz, R. 1996. Crustal deformation around the Gulf of California. *Geophysical research letters*, 23, 193-196.
- Ellis, A., DeMets, C., Briole, P., Cosenza, B., Flores, O., Graham, S. E., Guzmán-Speziale, M., Hernández, D., Kostoglodov, V. & LaFemina, P. 2018. GPS constraints on deformation in northern Central America from 1999 to 2017, Part 1—Time-

dependent modelling of large regional earthquakes and their post-seismic effects. *Geophysical Journal International*, 214, 2177-2194.

Estey, L. H. & Meertens, C. M. 1999. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS solutions*, 3, 42-49.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V. & Manea, M. 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522, 122-149.

Fowler, C. M. R. 1990. *The solid earth: an introduction to global geophysics*, Cambridge University Press.

Frank, W. B. 2016. Slow slip hidden in the noise: The intermittence of tectonic release. *Geophysical Research Letters*, 43, 10,125-10,133.

Frank, W. B., Radiguet, M., Rousset, B., Shapiro, N. M., Husker, A. L., Kostoglodov, V., Cotte, N. & Campillo, M. 2015. Uncovering the geodetic signature of silent slip through repeating earthquakes. *Geophysical Research Letters*, 42, 2774-2779.

Gaidzik, K., Ramírez-Herrera, M. T. & Kostoglodov, V. 2016. Active crustal faults in the forearc region, Guerrero sector of the Mexican subduction zone. *Pure Applied Geophysics*, 173, 3419-3443.

Garate, J., Martin-Davila, J., Khazaradze, G., Echeverria, A., Asensio, E., Gil, A. J., De Lacy, M., Armenteros, J., Ruiz, A. & Gallastegui, J. J. G. S. 2015. Topo-Iberia project: CGPS crustal velocity field in the Iberian Peninsula and Morocco. 19, 287-295.

Godínez-Tamay, A., Castillo, M., Ferrari, L. & Ortega-Gutiérrez, F. 2020. Assessing landscape response to tectonics in the Jalisco block and adjacent areas (west-central Mexico) using topographic analysis. *Journal of South American Earth Sciences*, 98, 102469.

Gonzalez-Garcia, J., Prawirodirdjo, L., Bock, Y. & Agnew, D. 2003. Guadalupe Island, Mexico as a new constraint for Pacific plate motion. *Geophysical research letters*, 30.

- Gonzalez-Ortega, A., Fialko, Y., Sandwell, D., Nava-Pichardo, F. A., Fletcher, J., Gonzalez-Garcia, J., Lipovsky, B., Floyd, M. & Funning, G. 2014. El Mayor-Cucapah (Mw 7.2) earthquake: Early near-field postseismic deformation from InSAR and GPS observations. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 119, 1482-1497.
- Graham, S. E., DeMets, C., Cabral-Cano, E., Kostoglodov, V., Walpersdorf, A., Cotte, N., Brudzinski, M., McCaffrey, R. & Salazar-Tlaczani, L. 2014. GPS constraints on the 2011–2012 Oaxaca slow slip event that preceded the 2012 March 20 Ometepec earthquake, southern Mexico. *Geophysical Journal International*, 197, 1593-1607.
- Gualandi, A., Perfettini, H., Radiguet, M., Cotte, N. & Kostoglodov, V. 2017. GPS deformation related to the Mw 7.3, 2014, Papanao earthquake (Mexico) reveals the aseismic behavior of the Guerrero seismic gap. *Geophysical Research Letters*, 44, 6039-6047.
- Guo, R., Zheng, Y., Xu, J. & Jiang, Z. 2019. Seismic and aseismic fault slip associated with the 2017 Mw 8.2 Chiapas, Mexico, earthquake sequence. *Seismological Research Letters*, 90, 1111-1120.
- Hagstrum, J. & Filmer, P. 1990. Paleomagnetic and tectonic constraints on the Late Cretaceous to early Tertiary northward translation of the Baja California peninsula. *Geofisica internacional*, 29, 175-184.
- Hatanaka, Y. 2008. A compression format and tools for GNSS observation data.
- He, X., Montillet, J.-P., Fernandes, R., Bos, M., Yu, K., Hua, X. & Jiang, W. 2017. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*, 106, 12-29.
- Herring, T. 2003. MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series. *GPS solutions*, 7, 194-199.
- Herring, T., King, R., Floyd, M. & McClusky, S. 2018. Introduction to GAMIT/GLOBK. Introduction to GAMIT/GLOBK.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J. 2012. *Global positioning system: theory and practice*, Springer Science & Business Media.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. 2007. *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*, Springer Science & Business Media.

Hutton, W., DeMets, C., Sanchez, O., Suarez, G. & Stock, J. 2001. Slip kinematics and dynamics during and after the 1995 October 9 M-w=8.0 Colima-Jalisco earthquake, Mexico, from GPS geodetic constraints. *Geophysical Journal International*, 146, 637-658.

Johnson, C. A. & Harrison, C. G. A. 1990. Neotectonics in central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64, 187-210.

Johnson, C. W. & Bürgmann, R. 2016. Delayed dynamic triggering: Local seismicity leading up to three remote $M \geq 6$ aftershocks of the 11 April 2012 M8.6 Indian Ocean earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121, 134-151.

Kaftan, V. & Melnikov, A. Local deformation precursors of large earthquakes derived from GNSS observation data. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017. IOP Publishing, 032030.

Kim, Y., Clayton, R. W. & Keppie, F. 2011. Evidence of a collision between the Yucatán Block and Mexico in the Miocene. *Geophysical Journal International*, 187, 989-1000.

Kostoglodov, V., Singh, S. K., Santiago, J. A., Franco, S. I., Larson, K. M., Lowry, A. R. & Bilham, R. 2003. A large silent earthquake in the Guerrero seismic gap, Mexico. *Geophysical Research Letters*, 30.

Larson, K. M., Kostoglodov, V., Miyazaki, S. & Santiago, J. A. S. 2007. The 2006 aseismic slow slip event in Guerrero, Mexico: New results from GPS. *Geophysical Research Letters*, 34.

- Larson, K. M., Lowry, A. R., Kostoglodov, V., Hutton, W., Sánchez, O., Hudnut, K. & Suárez, G. 2004. Crustal deformation measurements in Guerrero, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109.
- Li, Y., Shan, X., Zhu, C., Qiao, X., Zhao, L. & Qu, C. J. B. o. t. S. S. o. A. 2020. Geodetic Model of the 2018 M w 7.2 Pinotepa, Mexico, Earthquake Inferred from InSAR and GPS Data. 110, 1115-1124.
- Lonsdale, P. 2005. Creation of the Cocos and Nazca plates by fission of the Farallon Plate. *Tectonophysics*, 404, 237-264.
- Lowry, A. R., Larson, K. M., Kostoglodov, V. & Bilham, R. 2001. Transient fault slip in Guerrero, southern Mexico. *Geophysical Research Letters*, 28, 3753-3756.
- Márquez-Azúa, B., Cano, E. C., Mora, F. C. & DeMets, C. 2004. A model for Mexican neotectonics based on nationwide GPS measurements, 1993-2001. *Geofísica Internacional*, 43, 319-330.
- Márquez-Azúa, B. & DeMets, C. 2003. Crustal velocity field of Mexico from continuous GPS measurements, 1993 to June 2001: Implications for the neotectonics of Mexico. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 108.
- Márquez-Azúa, B. & DeMets, C. 2009. Deformation of Mexico from continuous GPS from 1993 to 2008. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10.
- Márquez-Azúa, B. M., DeMets, C. & Masterlark, T. 2002. Strong interseismic coupling, fault afterslip, and viscoelastic flow before and after the Oct. 9, 1995 Colima-Jalisco earthquake: Continuous GPS measurements from Colima, Mexico. *Geophysical research letters*, 29, 122-1-122-4.
- McCaffrey, R. 2009. Time-dependent inversion of three-component continuous GPS for steady and transient sources in northern Cascadia. *Geophysical Research Letters*, 36.

- Meade, B. J. & Hager, B. H. 2005. Block models of crustal motion in southern California constrained by GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110.
- Melbourne, T., Carmichael, I., DeMets, C., Hudnut, K., Sanchez, O., Stock, J., Suarez, G. & Webb, F. 1997. The geodetic signature of the M8.0 Oct. 9, 1995, Jalisco subduction earthquake. *Geophysical Research Letters*, 24, 715-718.
- Melbourne, T. I., Webb, F. H., Stock, J. M. & Reigber, C. 2002. Rapid postseismic transients in subduction zones from continuous GPS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107, ETG 10-1-ETG 10-10.
- Niu, J., Xu, C., Fan, Q. & Yin, Z. 2016. Impact of coseismic deformation fields with different time scales on finite fault modelling in 2010 California Baja Earthquake. 48, 94-100.
- Okada, Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the seismological society of America*, 75, 1135-1154.
- Padilla-Velazco, J., Torres-Carrillo, X. G., Bennett, R. A., Vázquez-Becerra, G. E. & Reinoza, C. E. 2024. Exploration of crustal deformation and tectonic interactions in Mexico based on continuous GPS data. *International Journal of Earth Sciences*, 1-21.
- Pardo, M. & Suárez, G. 1995. Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100, 12357-12373.
- Pindell, J., Kennan, L., Stanek, K. P., Maresch, W. & Draper, G. 2006. Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved. *Geologica Acta: an international earth science journal*, 4, 303-341.
- Plattner, C., Malservisi, R., Dixon, T. H., LaFemina, P., Sella, G., Fletcher, J. & Suarez-Vidal, F. 2007. New constraints on relative motion between the Pacific Plate and Baja California microplate (Mexico) from GPS measurements. *Geophysical Journal International*, 170, 1373-1380.

Polischuk, G., Kozlov, V., Ilitchov, V., Kozlov, A., Bartenev, V., Kossenko, V., Anphimov, N., Revnivkykh, S., Pisarev, S. & Tyulyakov, A. The global navigation satellite system GLONASS: Development and usage in the 21st century. Proceedings of the 34th annual precise time and time interval systems and applications meeting, 2002. 151-160.

Pollitz, F. F., Bürgmann, R. & Thatcher, W. 2012. Illumination of rheological mantle heterogeneity by the M7. 2 2010 El Mayor-Cucapah earthquake. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13.

Radiguet, M., Cotton, F., Vergnolle, M., Campillo, M., Walpersdorf, A., Cotte, N. & Kostoglodov, V. 2012. Slow slip events and strain accumulation in the Guerrero gap, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117.

Radiguet, M., Perfettini, H., Cotte, N., Gualandi, A., Valette, B., Kostoglodov, V., Lhomme, T., Walpersdorf, A., Cano, E. C. & Campillo, M. 2016. Triggering of the 2014 M w 7.3 Papanaoa earthquake by a slow slip event in Guerrero, Mexico. *Nature Geoscience*, 9, 829-833.

Rivet, D., Campillo, M., Radiguet, M., Zigone, D., Cruz-Atienza, V., Shapiro, N. M., Kostoglodov, V., Cotte, N., Cougoulat, G. & Walpersdorf, A. 2014. Seismic velocity changes, strain rate and non-volcanic tremors during the 2009–2010 slow slip event in Guerrero, Mexico. *Geophysical Journal International*, 196, 447-460.

Rizos, C., Janssen, V., Roberts, C. & Grinter, T. 2012. Precise point positioning: is the era of differential GNSS positioning drawing to an end?

Rosas-Elguera, J., Alva-Valdivia, L. M., Goguitchaichvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Ortega-Rivera, M. A., Prieto, J. C. S. & Lee, J. K. 2003. Counterclockwise rotation of the Michoacan Block: implications for the tectonics of western Mexico. *International Geology Review*, 45, 814-826.

Rosas-Elguera, J., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H. & Urrutia-Fucugauchi, J. 1996. Continental boundaries of the Jalisco block and their influence in the Pliocene-Quaternary kinematics of western Mexico. *Geology*, 24, 921-924.

Rousset, B., Campillo, M., Lasserre, C., Frank, W. B., Cotte, N., Walpersdorf, A., Socquet, A. & Kostoglodov, V. 2017. A geodetic matched filter search for slow slip with application to the Mexico subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 10,498-10,514.

Rousset, B., Lasserre, C., Cubas, N., Graham, S., Radiguet, M., DeMets, C., Socquet, A., Campillo, M., Kostoglodov, V. & Cabral-Cano, E. 2016. Lateral variations of interplate coupling along the Mexican subduction interface: Relationships with long-term morphology and fault zone mechanical properties. *Pure Applied Geophysics*, 173, 3467-3486.

Sánchez, L. & Drewes, H. 2016. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. *Journal of Geodynamics*, 102, 1-23.

Sawires, R., Peláez, J. A., Sparacino, F., Radwan, A. M., Rashwan, M. & Palano, M. 2021. Seismic and geodetic crustal moment-rates comparison: new insights on the seismic hazard of Egypt. *Applied Sciences*, 11, 7836.

Schmitt, S. V., DeMets, C., Stock, J., Sánchez, O., Márquez-Azúa, B. & Reyes, G. 2007. A geodetic study of the 2003 January 22 Tecoman, Colima, Mexico earthquake. *Geophysical Journal International*, 169, 389-406.

Selvans, M. M., Stock, J. M., DeMets, C., Sanchez, O. & Marquez-Azua, B. 2011. Constraints on Jalisco Block motion and tectonics of the Guadalajara triple junction from 1998–2001 Campaign GPS Data. *Pure and applied geophysics*, 168, 1435-1447.

Severinghaus, J. & Atwater, T. 1990. Cenozoic geometry and thermal state of the subducting slabs beneath western North America. *Basin and range extensional tectonics near the latitude of Las Vegas, Nevada: Geological Society of America Memoir*, 176, 1-22.

Shen, Z. k., Dong, D., Herring, T., Hudnut, K., Jackson, D., King, R., McClusky, S. & Sung, L. y. 1997. Crustal deformation measured in southern California. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 78, 477-482.

- Singh, S. K., Pérez-Campos, X., Ordaz, M., Iglesias, A. & Kostoglodov, V. 2020. Scaling of peak ground displacement with seismic moment above the Mexican subduction thrust. *Seismological Research Letters*, 91, 956-966.
- Spinler, J. & Bennett, R. 2012. Present-day loading rate of faults in southern California and northern Baja California, Mexico, and post-seismic deformation following the M7. 2 April 4, 2010, El Mayor-Cucapah earthquake from GPS Geodesy. *AGUFM*, 2012, G22B-02.
- Spinler, J. C., Bennett, R. A., Walls, C., Lawrence, S. & González García, J. J. 2015. Assessing long-term postseismic deformation following the M7. 2 4 April 2010, El Mayor-Cucapah earthquake with implications for lithospheric rheology in the Salton Trough. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 3664-3679.
- Suárez, G., Caballero-Jiménez, G. V. & Novelo-Casanova, D. A. 2019. Active crustal deformation in the Trans-Mexican volcanic belt as evidenced by historical earthquakes during the last 450 years. *Tectonics*, 38, 3544-3562.
- Tung, S., Fielding, E., Bekaert, D. & Masterlark, T. J. G. R. L. 2019. Rapid geodetic analysis of subduction zone earthquakes leveraging a 3-D elastic Green's function library. 46, 2475-2483.
- Turcotte, D. L., Schubert, G. & Turcotte, D. L. 2002. *Geodynamics*, Cambridge ; New York, Cambridge University Press.
- Vázquez, G. E., Bennett, R. & Spinler, J. 2013. Assessment of pseudorange multipath at continuous GPS stations in Mexico. *Positioning*, 2013.
- Wang, G., Zhou, X., Wang, K., Ke, X., Zhang, Y., Zhao, R. & Bao, Y. 2020. GOM20: a stable geodetic reference frame for subsidence, faulting, and sea-level rise studies along the coast of the Gulf of Mexico. *Remote Sensing*, 12, 350.
- Wei, E. & Liu, J. 2014. Precision analysis of IGS long-baseline processing based on GAMIT/GLOBK. *Coordinates X*, 20-24.

Wooden, W. H. Navstar Global Positioning System: 1985. Proceedings of the first international symposium on precise positioning with the global positioning system, 1985. 23-32.

Yoshioka, S., Mikumo, T., Kostoglodov, V., Larson, K. M., Lowry, A. R. & Singh, S. K. 2004. Interplate coupling and a recent aseismic slow slip event in the Guerrero seismic gap of the Mexican subduction zone, as deduced from GPS data inversion using a Bayesian information criterion. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 146, 513-530.

Yu, J. & Wang, G. 2016. GPS-derived ground deformation (2005–2014) within the Gulf of Mexico region referred to a stable Gulf of Mexico reference frame. *Survey Review*, 16, 1583-1602.

Zigone, D., Rivet, D., Radiguet, M., Campillo, M., Voisin, C., Cotte, N., Walpersdorf, A., Shapiro, N. M., Cougoulat, G. & Roux, P. 2012. Triggering of tremors and slow slip event in Guerrero, Mexico, by the 2010 Mw 8.8 Maule, Chile, earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117.

Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M. & Webb, F. H. 1997. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 102, 5005-5017.