

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



**Programa de Posgrado en Ciencias
en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología**

**Tectónica de placas en Isla Guadalupe, Baja California, México:
15 años de observación GPS**

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

Presenta:

Hebert Martínez Bárcena

Ensenada, Baja California, México
2016

Tesis defendida por

Hebert Martínez Bárcena

y aprobada por el siguiente Comité

M.C. José Javier González García
Codirector de tesis

Dr. Javier Alejandro González Ortega
Codirector de tesis

Dr. Carlos Francisco Flores Luna

Dr. Jaime Sánchez García



Dr. Juan García Abdeslem
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

Dra. Rufina Hernández Martínez
Directora de Estudios de Posgrado

Hebert Martínez Bárcena © 2016

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

Resumen de la tesis que presenta **Hebert Martínez Bárcena** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geología.

Tectónica de placas en Isla Guadalupe, Baja California, México: 15 años de observación GPS

Resumen aprobado por:

M.C. José Javier González García
Codirector de tesis

Dr. Javier Alejandro González Ortega
Codirector de tesis

Isla Guadalupe, ubicada al Oeste de Baja California, juega un papel importante en la constricción del vector de Euler para la placa Pacífico. Para ello, diversos autores han elaborado modelos tanto geológicos como geodésicos, en los cuales, en general han concluido que Isla Guadalupe no pertenece a dicha placa debido a los altos residuales obtenidos en comparación con los modelos, argumentando que la isla puede estar influenciada por una microplaca: Baja California. Sin embargo, la mayoría de los datos utilizados en la elaboración de modelos para placa Pacífico se localizan en Hawái y en islas del centro y occidente del Océano Pacífico, con lo cual, asociamos que se puede presentar cierto sesgo produciendo los altos residuales que se han observado para la isla.

Los modelos geodésicos están basados en la información de al menos una de las técnicas de la Geodesia espacial, en particular, en este estudio se utiliza sólo información de observaciones del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Se determinó la velocidad tectónica de Isla Guadalupe en 3 estaciones GPS temporales, GAIR, GUAD, RMGU, desde 1999 hasta 2016, y en la estación permanente, GUAX, desde 2001 hasta 2016, con el software GAMIT/GLOBK, dentro de un esquema de red, con tres estaciones en Hawái y seis en la frontera de California/Baja California, en conjunto con estaciones base del *International Geodetic Service*, en el marco de referencia ITRF2008. Los resultados muestran que la estimación de velocidad de las estaciones temporales y la permanente es consistente. La velocidad de GUAX en la componente Norte es 24.8 mm/año y en la componente Este -46.9 mm/año, con un error estimado de 0.3 mm/año. La velocidad de Isla Guadalupe se ajusta al desplazamiento tectónico de placa Pacífico. Más aun, por su ubicación geográfica, Isla Guadalupe es importante en la estimación de la velocidad angular de la placa Pacífico.

Palabras clave: geodesia espacial, GPS, modelos geodésicos, velocidad angular, vector de Euler

Abstract of the thesis presented by **Hebert Martínez Bárcena** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth's Sciences with orientation in Geology.

Plate tectonics on Guadalupe Island, Baja California, Mexico: 15 years of GPS data

Abstract approved by:

M.C. José Javier González García

Thesis codirector

Dr. Javier Alejandro González Ortega

Thesis codirector

Guadalupe Island, located West of Baja California, plays an important role in constraining the angular velocity of the Pacific plate. For this purpose, scientists have developed geological and geodetic models, on which, they have suggested that Guadalupe Island does not belong to the Pacific plate, arguing that Guadalupe Island can be influenced by the Baja California microplate, because of the high residuals presented in comparison with the models. However, most of the data used in their Pacific plate models is from Hawaii, middle and Western Pacific islands, which in turn may influence the residual bias on Guadalupe Island data.

Geodetic models are based on information from at least one of the spatial geodetic techniques. In this work, we used data from Global Positioning System (GPS). The tectonic velocity of Guadalupe Island was determined through three temporal GPS stations from 1999 to 2016: GAIR, GUAD and RMGU, and the permanent station GUAX from 2001 to 2016. This dataset was processed with GAMIT/GLOBK along with three stations in Hawaii and other six located at California/Baja California border, using the International Geodetic Service (IGS) frame network, in the reference frame ITRF20008. Velocity results obtained for the temporal GPS stations and the permanent are consistent. GUAX velocity is 24.8 mm/yr in the North component and -46.9 mm/yr in the East component, having an estimated error of 0.3 mm/yr. Guadalupe Island's velocity is related with the Pacific plate's tectonic displacement, and therefore, its geographical location is important to constrain the angular velocity of the Pacific plate.

Keywords: spatial geodesy, GPS, geodetic models, angular velocity, Euler's vector

Dedicatoria

A mis papás Héctor y Coquis, quienes siempre me apoyaron y brindaron de consejos, conocimiento y cariño para nunca rendirme y seguir siempre adelante.

A mis hermanos Erick y Migue, que pese a la distancia siempre estamos presentes y nos tenemos el uno al otro. A mi hermanita Sandra, te amo.

A mis hermosos sobrinos Ericksito y Leonardito, los amo.

A mi abuela Mamartha y mi prima Janay, siempre las voy a llevar en mi corazón.

A Rocko. A mi Juanito y al Chiquito.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) por abrirme las puertas y darme la oportunidad de seguir continuando con mis estudios.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado en mi estancia.

A mis codirectores de tesis M.C. José Javier González García y Dr. Javier Alejandro González Ortega, por su enorme paciencia, por su apoyo, por compartir sus conocimientos y guiarme de la mejor manera y disposición en el desarrollo de la tesis. Me quedo con la gran satisfacción de haberlos conocido y haber trabajado con ustedes.

A los miembros del comité de tesis Dr. Carlos Francisco Flores Luna y Dr. Jaime Sánchez García por su tiempo, comentarios, sugerencias y apoyo brindado. Al Dr. Sergio Reyes Coca por sus regaños y comentarios.

A la Secretaría de Marina por el apoyo otorgado para el transporte a Isla Guadalupe. A Jhon Galetzka y Chris Walls por compartirme de sus conocimientos y consejos en la salida de campo.

A mi familia en general. A mis padres por su apoyo y cariño. A mis hermanos, sobrinos y cuñadas.

A mis amigos... mi familia en Ensenada, que gracias a ellos tuve una gran experiencia. Quienes estuvieron apoyándome y escuchándome, cada uno a su manera deja una huella muy especial en mí para siempre. En especial a Sergio, Mariana, Leydi, Karina, Yosvany, Leandro, Julia, Germán, Yadira, JavierP y el Flaco. Gracias por todo, desde cuestiones personales como académicas.

A mis amigos de Tampico, que a la distancia siempre cuento con ellos incondicionalmente: Juan, Lizbeth, Benny, Chivo, Eddy, Saúl, Freddy, Philips, Paulo, Villa, Ñoño, Edder, Charmín, Carlo, Gibrán.

Tabla de contenido

| | |
|---|-----------|
| Resumen en español | ii |
| Resumen en inglés | iii |
| Dedicatoria..... | iv |
| Agradecimientos..... | v |
| Lista de figuras..... | viii |
| Lista de tablas..... | x |
| Capítulo 1 Introducción ----- | 1 |
| 1.1 Antecedentes----- | 2 |
| 1.2 Justificación----- | 3 |
| 1.3 Hipótesis----- | 3 |
| 1.4 Objetivos ----- | 4 |
| 1.4.1 Objetivo General----- | 4 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos ----- | 4 |
| 1.5 Área de estudio ----- | 4 |
| 1.6 Tectónica de Placas ----- | 6 |
| 1.7 Modelos geológicos y geodésicos para Tectónica de Placas----- | 8 |
| 1.8 Geodesia Espacial ----- | 9 |
| 1.8.1 Aplicaciones de la Geodesia espacial----- | 10 |
| 1.8.2 Técnicas de observación de la Geodesia espacial ----- | 11 |
| 1.8.3 Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) ----- | 12 |
| Capítulo 2 Metodología ----- | 14 |
| 2.1 Sistema de Posicionamiento Global (GPS) ----- | 14 |
| 2.1.1 Frecuencias de las señales GPS----- | 15 |
| 2.2 Funcionamiento del GPS----- | 16 |
| 2.2.1 Obtención de la posición mediante Pseudorangos ----- | 17 |
| 2.3 Efectos atmosféricos en la señal----- | 20 |
| 2.3.1 Efecto de la Ionósfera ----- | 21 |
| 2.3.2 Efectos de la tropósfera----- | 22 |
| 2.4 Estaciones GPS----- | 22 |
| 2.4.1 Estaciones GPS permanentes (cGPS) ----- | 23 |
| 2.4.1.1 Instalación ----- | 23 |
| 2.4.1.2 Aplicaciones ----- | 25 |
| 2.4.2 Estaciones GPS temporales ----- | 25 |
| 2.4.2.1 Instalación ----- | 25 |
| 2.4.2.2 Aplicaciones ----- | 26 |
| 2.5 Salida de Campo ----- | 27 |
| 2.6 Red de estaciones base ----- | 31 |
| 2.7 Software GAMIT/GLOBK----- | 32 |
| 2.7.1 Dobles diferencias de observaciones de fase----- | 33 |
| 2.7.2 Modelado de órbitas satelitales ----- | 34 |
| 2.7.3 Archivos y Tablas ----- | 35 |
| 2.7.3.1 Archivos de navegación <i>brdc</i> (broadcast ephemerides)----- | 35 |
| 2.7.3.2 Archivo de órbitas <i>igs</i> ----- | 36 |
| 2.7.3.3 Archivos <i>RINEX</i> (Receiver Independent Exchange)----- | 36 |
| 2.7.3.4 Tablas----- | 36 |

| | |
|--|-----------|
| 2.7.4 GLOBK ----- | 37 |
| 2.8 ITRF 2008 ----- | 38 |
| Capítulo 3 Resultados ----- | 39 |
| 3.1 Velocidades de las Estaciones GPS Temporales en Isla Guadalupe ----- | 39 |
| 3.2 Velocidad de la Estación cGPS en Isla Guadalupe ----- | 41 |
| 3.3 Comparación con Modelos de Tectónica de Placas ----- | 43 |
| 3.3.1 Obtención de las Velocidades horizontales ----- | 44 |
| 3.3.2 Obtención de la velocidad en componente Norte y Este ----- | 45 |
| 3.3.3 Resultados ----- | 45 |
| Capítulo 4 Discusiones ----- | 47 |
| Capítulo 5 Conclusiones ----- | 50 |
| Literatura citada ----- | 51 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 Mapa de localización de Isla Guadalupe. | 5 |
| Figura 2 Mapa tectónico mundial. Las líneas rojas representan los límites entre las placas tectónicas. Adaptado de González-Ortega (2014)..... | 6 |
| Figura 3 Esquema representativo de los tres límites de placas. En las dorsales se presenta separación de dos placas y generación de nueva corteza oceánica. Estas dorsales están conectadas por fallas transformes, donde no hay generación ni destrucción de litósfera. Las zonas de subducción se presentan donde convergen dos placas y la más densa subduce hacia el manto. Fuente: http://www.portalciencia.net/ | 7 |
| Figura 4 En una esfera, el movimiento relativo del bloque 2 y el bloque 1 es rotacional sobre el Polo A. Todas las fallas en el límite de los bloques son pequeños círculos concéntricos al polo de rotación. Adaptado de Morgan (1968)..... | 7 |
| Figura 5 a) Determinación del polo de Euler mediante la intersección de líneas perpendiculares a las fallas transformes. b) Las fallas transformes se presentan en semicírculos respecto al polo de rotación. Fuente: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/ | 8 |
| Figura 6 Técnicas de la Geodesia espacial y sus aplicaciones. Adaptado de Rummel (2010), en Pérez (2013). | 9 |
| Figura 7 Vectores de velocidad en el sistema de referencia ITRF08. Las líneas verdes representan los límites de placas principales. Adaptado de Altamimi et al. (2011) | 10 |
| Figura 8 Sistema GNSS, conformado por una Constelación de satélites que emiten de manera constante señales a los receptores situados en la superficie de la Tierra. Fuente: http://www.navipedia.net | 12 |
| Figura 9 Segmentos del Sistema GPS. El segmento espacial está formado por la constelación de satélites GPS, el segmento control es el encargado de enviar información de corrección y monitoreo a los satélites, y el segmento usuario son las estaciones que almacenan la información para su posterior análisis. | 13 |
| Figura 10 Esquema de las orbitas de los satélites GPS. Fuente: http://code7700.com/gps.html#references | 14 |
| Figura 11 Esquema ilustrativo de dobles diferencias, siendo a y b estaciones fijas GPS observando a los satélites p y q. Adaptado de Gonzalez-Ortega (2014). | 15 |
| Figura 12 Esquema de la relación vectorial de los parámetros orbitales para estimar la posición del vector u. Donde s es la localización espacial del satélite (efemérides) y r es la distancia del satélite al receptor (pseudorangos). | 17 |
| Figura 13 1. El satélite emite la señal al tiempo t_1 . 2. Se recibe la señal en el receptor a un tiempo t_2 . 3. El receptor genera una réplica de la señal. 4. Se calcula el desfase de la señal Δt | 18 |
| Figura 14 Relación esquemática entre los diferentes valores de tiempo GPS, involucrados en la estimación de la posición del receptor: del satélite, del receptor y el del sistema. | 19 |

| | |
|---|----|
| Figura 15 Estaciones GPS permanentes ubicadas en México y sur de los Estados Unidos. Fuente: UNAVCO | 23 |
| Figura 16 Instalación de la estación cGPS GUAX en Isla Guadalupe. Se observa el domo protector de la antena GPS, la antena trasmisora, los paneles solares y las cabinas de aluminio con las baterías y receptor GPS..... | 24 |
| Figura 17 Instalación de la estación GPS temporal RMGU en Isla Guadalupe, Baja California, México..... | 26 |
| Figura 18 Mapa de localización de las estaciones GPS en Isla Guadalupe. GAIR está localizada en la parte central de la isla, mientras que las temporales GUAD y RMGU y la cGPS GUAX se encuentran en la parte sur. | 27 |
| Figura 19 a) Se muestra la estación GPS temporal GAIR. Se localiza en la parte central de la isla a un costado de la pista de aterrizaje. Se observa el tripié con antena GPS, el receptor y baterías. b) instalación de la nueva estación cGPS GU2X. | 28 |
| Figura 20 Instalación de la estación GPS temporal GUAD instalada en Isla Guadalupe..... | 29 |
| Figura 21 Instalación de la estación GPS temporal RMGU instalada en Isla Guadalupe. | 29 |
| Figura 22 Instalación de la estación cGPS GUAX. Instalada con el apoyo de UNAVCO, cuenta con 6 paneles solares y antena trasmisora de las observaciones en tiempo real. | 30 |
| Figura 23 Mapa de localización de las 9 estaciones IGS de nuestra red base; 3 de ellas ubicadas en Hawái (KOKB, HNLC y MKEA), 4 en el suroeste de California (BLYT, GNPS, JPLM y VNDP) y 2 al noroeste de Baja California (CIC1 y SPMX)..... | 32 |
| Figura 24 Serie de posición de la estación GAIR. A) componente Norte. B) componente Este. | 39 |
| Figura 25 Serie de posición de la estación GUAD. A) componente Norte. B) componente Este. | 40 |
| Figura 26 Serie de posición de la estación RMGU. A) componente Norte. B) componente Este..... | 40 |
| Figura 27 Serie de posición de la estación GUAX. A) componente Norte. B) componente Este..... | 41 |
| Figura 28 Vectores de velocidad en <i>mm/año</i> para las estaciones GPS en Isla Guadalupe durante un período de observación de 15 años. | 43 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Coordenadas de las estaciones GPS localizadas en Isla Guadalupe..... | 30 |
| Tabla 2 Coordenadas y ubicación de las estaciones IGS seleccionadas para nuestra red de estaciones base. | 31 |
| Tabla 3 Aceleraciones orbitales producidas por diversas fuerzas. Modificada de Xu (2007)..... | 34 |
| Tabla 4 Días por año de información recolectada de cada estación de nuestra red base y en Isla Guadalupe para el procesamiento en GAMIT/GLOBK | 37 |
| Tabla 5 Velocidades estimadas de las estaciones GPS en Isla Guadalupe en $mm/año$ y su orientación. Se presentan en componente Norte, Este y Horizontal (VN , VE y VH). Los errores respectivos se muestran con 3σ . Marco de referencia utilizado ITR08 | 42 |
| Tabla 6 Modelos de Tectónica de Placas para la placa Pacifico y su comparación respecto a nuestro resultado para GUAX. Se incluye el marco de referencia utilizado y si considera o no la velocidad de Isla Guadalupe..... | 46 |

Capítulo 1 Introducción

La Geodesia Espacial y en particular el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), ofrece la posibilidad de ubicar un punto con precisión milimétrica, permitiendo cuantificar el movimiento de la superficie terrestre, esencial para contrastar modelos de los procesos de deformación de la corteza (Nocquet et al., 2009).

La teoría de Tectónica de Placas considera a la superficie de la Tierra compuesta de capas semiesféricas rígidas, cuyo movimiento angular es descrito con un vector de Euler. En esta teoría se han desarrollado dos tipos de modelos: los geológicos y los geodésicos. Los modelos geológicos son derivados de la cuantificación de tres fenómenos: (1) la tasa de expansión de los centros de dispersión en las dorsales oceánicas, calculada a través de la datación de las reversiones del campo magnético terrestre, y su manifestación y permanencia en las anomalías magnéticas marinas, (2) el azimut de las fallas transformes que unen a los centros de dispersión, y (3) los vectores de deslizamiento sísmico producidos por temblores (DeMets et al., 1990). Los modelos geodésicos utilizan el posicionamiento, en función del tiempo, obtenido a partir de una o más de las siguientes técnicas de la geodesia espacial: *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), *Satellite Laser Ranging* (SLR), *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite* (DORIS) y el GPS.

El cambio de posición de los sitios geodésicos con el tiempo (velocidad) sobre la superficie de la Tierra permite obtener modelos cinemáticos de las placas tectónicas. En este trabajo utilizamos solo el GPS por ser el más económico, y por ello, permitir la observación de una mayor cantidad de sitios.

La velocidad tectónica de Isla Guadalupe ha sido contemplada solo marginalmente en la elaboración de los modelos geodésicos de la Tectónica de Placas. Geológicamente, Isla Guadalupe pertenece a la Placa Pacífico (Batiza, 1977); y al ser ésta, constituida mayormente por corteza oceánica, todo vector de velocidad que se ubica en las Islas del Pacífico, particularmente en Isla Guadalupe, es de gran importancia en la cuantificación de su movimiento tectónico. Como señala Morgan (1968) "...si se miden las distancias entre Isla Guadalupe, Wake Island y Tahití, ubicadas en el Océano Pacífico, y vuelven a medirse varios años después, éstas no cambiarán."

Para obtener el valor de la velocidad tectónica en Isla Guadalupe, utilizamos la posición de 3 estaciones GPS temporales RMGU, GAIR y GUAD, y la estación permanente GUAX, medidas desde al menos 1999. Durante la realización de esta tesis re-observamos y procesamos los cuatro sitios, obteniendo un vector

de velocidad con precisión de ≈ 0.5 mm/año, auxiliándonos con estaciones GPS continuas (cGPS) situadas en Hawái y la costa de California y Baja California. Una vez obtenido el vector de velocidad para Isla Guadalupe, realizamos una comparación con los valores predichos por diferentes modelos de Tectónica de Placas, con el fin de determinar cuál modelo se ajusta a nuestro resultado.

Si la diferencia entre nuestro resultado y la velocidad estimada por el modelo respectivo (residual) es mayor que 2 mm/año, y sí además, no se utilizó en dicho modelo la velocidad de Isla Guadalupe, concluimos que éste no es lo suficientemente preciso. Por otro lado, si el residual es menor a 2 mm/año y el error estimado para Isla Guadalupe correspondiente a dicho modelo es mayor a ± 1 mm/año, consideraremos también que dicho modelo no es lo suficientemente preciso; si es menor que ± 1 mm/año sí lo es. Cabe mencionar que Argus et al. (2010), señalan que el error estimado para un vector de velocidad de placa que no incluya la posibilidad de movimiento del centro de masa de la Tierra es de aproximadamente 0.8 mm/año.

La información utilizada en este trabajo comprende observaciones GPS de los años 1999 a 2016. El procesamiento de los datos se realizó con el software GAMIT-GLOBK. Se efectuó una visita de campo a Isla Guadalupe para obtener nuevas observaciones. Durante el transcurso de nuestra visita, tuve la oportunidad de colaborar en la reconstrucción de la cGPS GUAX. Esta estación es de carácter multifuncional; además de ser una estación GPS, es una estación meteorológica y sismológica. Toda esta información se transmite a través de un sistema de enlace satelital a las instalaciones de UNAVCO, ubicadas en Boulder, Colorado, EEUU, donde se encuentra disponible en su página oficial (www.unavco.org).

1.1 Antecedentes

Isla Guadalupe no ha sido contemplada con importancia en la elaboración de modelos de Tectónica de Placas, en especial para Placa Pacífico. La información geodésica considerada en la elaboración de dichos modelos se concentra en la zona Central y Occidental del océano Pacífico.

Gonzalez-Garcia et al. (2003) presentan un modelo para Placa Pacífico utilizando información de 40 sitios GPS. Colectaron datos de las 3 estaciones GPS temporales en Isla Guadalupe, así como estaciones ubicadas en el Sur de California y Norte de Baja California.

Altamimi et al. (2012) realizaron un modelo estimando la velocidad angular de Placa Pacífico, utilizando información de 23 sitios geodésicos, siendo la estación cGPS GUAX la única en la parte Este de la placa, con un período de observación de 4 años. Dos años después, DeMets et al. (2014) argumentan que la velocidad de desplazamiento de Isla Guadalupe difiere significativamente a la velocidad presente en Placa Pacífico con residuales de $1.9 \pm 0.3 \text{ mm/año}$ hacia $S 19^\circ E$.

1.2 Justificación

La mayor parte de la Placa Pacífico está cubierta por mar, esto reduce las localizaciones de estaciones geodésicas en la placa para la estimación de su velocidad angular. Tener observaciones confiables y bien distribuidas en toda la placa es indispensable para tener una buena precisión de las estimaciones de velocidad y elaboración de modelos de Placa Pacífico. La mayoría de los datos recolectados en la elaboración de estos modelos se ubican en la zona Central y Occidental de la placa, por lo que Isla Guadalupe por su ubicación al Este, juega un papel importante en la construcción del desplazamiento de Placa Pacífico.

1.3 Hipótesis

En este trabajo se plantea que el vector de velocidad de Isla Guadalupe se ajusta al desplazamiento de la placa Pacífico. Algunos autores difieren de esto, debido a los altos residuales presentes entre la velocidad observada en la isla y sus modelos, argumentando que la velocidad de Isla Guadalupe está influenciada por una microplaca Baja California. Inferimos que la velocidad estimada de Isla Guadalupe se ha presentado de manera sesgada debido al poco período de observación y la carencia de estaciones geodésicas en la zona Este de placa Pacífico.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Obtener una estimación del vector de velocidad para Isla Guadalupe, a través del procesamiento y análisis de los datos de estaciones GPS ubicadas en el océano Pacífico, Sur de California y Norte de Baja California, durante un período de observación de 15 años.

1.4.2 Objetivos Específicos

Estimar la velocidad del vector de Isla Guadalupe con precisión milimétrica en un marco de referencia global, a través de GAMIT/GLOBK, utilizando información de las estaciones GPS temporales y la permanente ubicadas en la isla.

Realizar una comparación de nuestro resultado con modelos de Tectónica de Placas existentes, para determinar cuál se ajusta mejor a nuestra observación.

1.5 Área de estudio

Isla Guadalupe está localizada aproximadamente a 240 km al oeste de la costa de la península de Baja California, cerca de la latitud 29°N y longitud 118°W con una elevación máxima de 1100 msnm, ubicada en el océano Pacífico. Su forma es alargada en dirección N-S extendiéndose alrededor de 32 km y una anchura que varía de 5 a 11 km (Figura 1).

Por su relevancia biológica y ecológica, el área que comprende a la Isla Guadalupe y a sus islotes fue declarada Reserva de la Biósfera por Decreto Presidencial el 25 de abril de 2005 en el Diario Oficial de la Federación (CONANP, 2009).



Figura 1 Mapa de localización de Isla Guadalupe.

Batiza (1977) afirma que Isla Guadalupe consiste de dos volcanes en escudo parcialmente superpuestos. El volcán escudo sur ha sufrido considerablemente mayor denudación, y sobre esta base, se considera que es el más antiguo de los dos. Conjuntamente los escudos y las fisuras volcánicas forman una serie de basalto alcalino a traquita. Además, yace sobre el eje de una dorsal fósil, la cual es flanqueada por la anomalía 5B (aproximadamente de 15.5 Ma). Se desconoce la edad de la actividad inicial que dio origen a los escudos, pero las rocas más antiguas que han sido fechadas por K-Ar son de 7 ± 2 Ma (Mioceno Superior).

1.6 Tectónica de Placas

La litósfera de la Tierra está formada por bloques de corteza considerados rígidos denominados placas tectónicas y zonas de deformación en el contacto entre estas (Figura 2). La dimensión de las placas puede ser continental (ej. Placa Pacífico y Placa Africana) y sub-continental (ej. Placa Juan de Fuca, Placa del Caribe, etc.). Los límites entre ellas pueden ser de tres tipos (Figura 3) y se determinan por la actividad tectónica presente hoy en día (Morgan, 1968): (1) Dorsal, donde dos placas se separan una respecto a la otra permitiendo el ascenso de magma generando nueva corteza oceánica, (2) Zona de Subducción, donde dos placas convergen entre sí, provocando que la más densa descienda bajo la otra hacia el manto, y (3) Falla Transforme, donde el movimiento relativo de las placas es de cizalla, por lo que no se genera ni se destruye corteza y es el elemento geométrico que une a los segmentos de una dorsal oceánica (Cox, 1972).

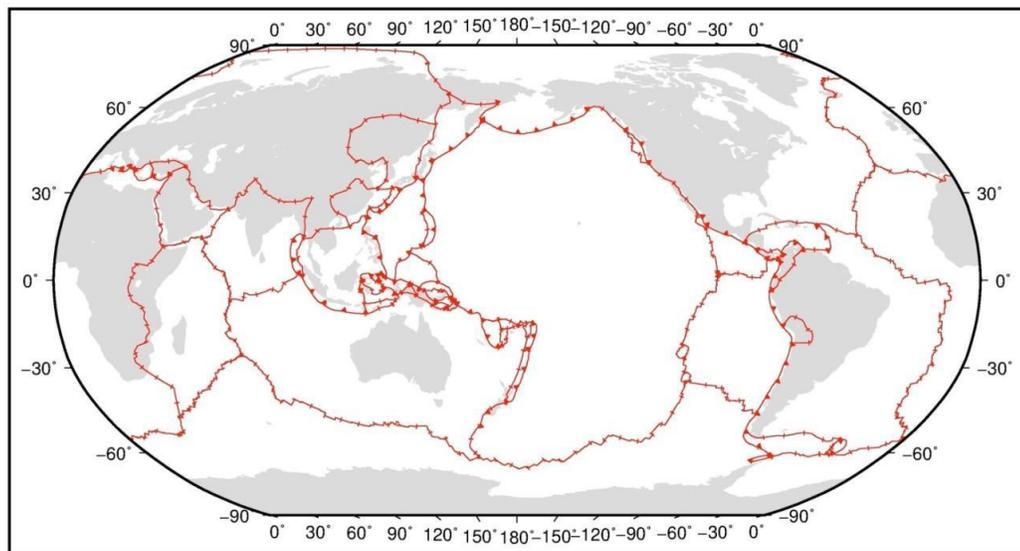


Figura 2 Mapa tectónico mundial. Las líneas rojas representan los límites entre las placas tectónicas. Adaptado de González-Ortega (2014)

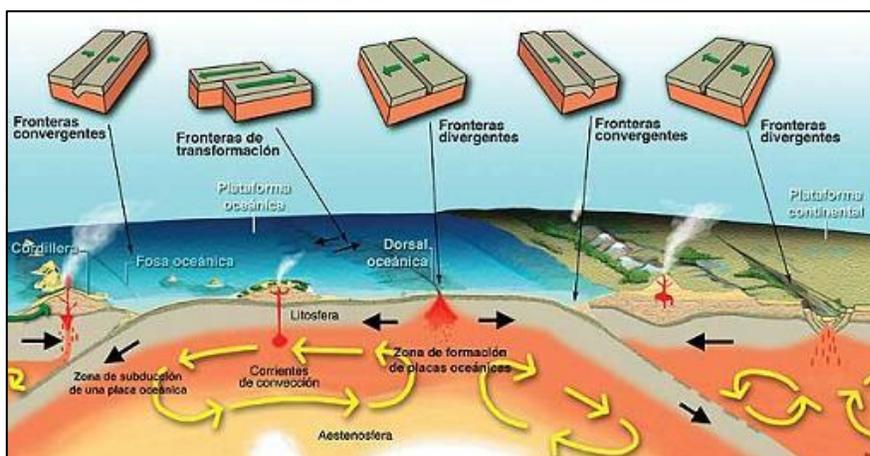


Figura 3 Esquema representativo de los tres límites de placas. En las dorsales se presenta separación de dos placas y generación de nueva corteza oceánica. Estas dorsales están conectadas por fallas transformes, donde no hay generación ni destrucción de litósfera. Las zonas de subducción se presentan donde convergen dos placas y la más densa subduce hacia el manto. Fuente: <http://www.portalciencia.net/>

El movimiento de las placas se supone sobre una superficie esférica, por lo que su cinemática se describe en términos de rotación siguiendo la Ley de Euler. Así, la rotación de una placa con respecto a otra se representa a través de un eje de rotación (Vector de Euler), el cual permanece fijo con respecto a las dos placas pasando por el centro de la Tierra (Figura 4). La proyección de este eje sobre la superficie terrestre se denomina Polo de Rotación, con parámetros de latitud, longitud y velocidad angular.

Específicamente, las fallas transformes son segmentos de arco a lo largo de pequeños círculos concéntricos respecto al Polo de Euler y los centros de dispersión son segmentos a lo largo de círculos mayores que parten del polo a manera de arcos de longitud (Figura 5b). Por ello, el polo puede ser localizado geoméricamente por la intersección de líneas perpendiculares trazadas en cada falla transforme (Figura 5a).

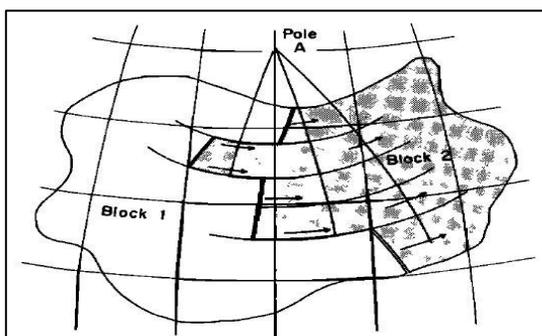


Figura 4 En una esfera, el movimiento relativo del bloque 2 y el bloque 1 es rotacional sobre el Polo A. Todas las fallas en el límite de los bloques son pequeños círculos concéntricos al polo de rotación. Adaptado de Morgan (1968)

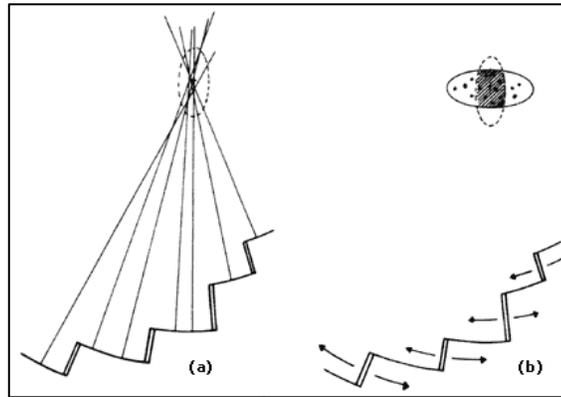


Figura 5 a) Determinación del polo de Euler mediante la intersección de líneas perpendiculares a las fallas transformes. b) Las fallas transformes se presentan en semicírculos respecto al polo de rotación. Fuente: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/>

1.7 Modelos geológicos y geodésicos para Tectónica de Placas

Existen dos tipos de modelos para Tectónica de Placas: geológicos y geodésicos. Cada uno nos proporciona estimaciones de la velocidad angular de cada placa y la ubicación de sus Polos de rotación. Muchos investigadores han realizado estudios con el fin de conseguir la mejor estimación de los vectores de velocidad, esto con diferente cantidad de información observada en cada placa, técnicas utilizadas, metodología del procesamiento, período de observación, etc.

Los modelos geológicos utilizan datos como: (1) las tasas de separación de las dorsales oceánicas, las cuales son calculadas a partir de la distancia entre los bloques de corteza con diferente polaridad magnética, (2) el azimut de las fallas transformes, cuya ortogonal permite la determinación del Polo de Euler, y (3) la dirección de los vectores de deslizamiento sísmico, tangenciales a los semicírculos menores. Estos modelos brindan una estimación de la velocidad angular de las placas en el pasado geológico.

Por otra parte, los modelos geodésicos utilizan los vectores de deslizamiento de sitios cuya medición es actual, sin tomar en cuenta parámetros del comportamiento pasado de la corteza. Estos modelos se elaboran utilizando información proveniente de las técnicas de la geodesia espacial (VLBI, SLR, DORIS y GPS), ya sea utilizando solo una de ellas o en combinación. Con ello, se pueden determinar los vectores de velocidad de sitios localizados en la superficie de la Tierra con muy buena precisión. Esto es, con observación constante y confiable durante el transcurso de varios años.

Ambos modelos resultan de la solución del modelo inverso de la ecuación de Euler (Minster et al., 1974), los resultados difieren entre sí dependiendo de la cantidad de información analizada y peso atribuido a cada parámetro en el procesamiento computacional.

En este trabajo de tesis utilizamos información geodésica GPS para la estimación del vector de velocidad de Isla Guadalupe, el cual comparamos con diversos modelos de Tectónica de Placas.

1.8 Geodesia Espacial

La Geodesia es la ciencia encargada del estudio de la geometría, campo gravitacional y rotacional de la Tierra, así como su evolución en el tiempo. Con la llegada de la Geodesia Espacial, la cual se integra con la observación a cuerpos celestes y satélites artificiales, se ha logrado el posicionamiento muy preciso de sitios sobre la superficie terrestre. La Geodesia ha hecho contribuciones importantes en el estudio del sistema Tierra, su inherente dinámica y respuesta a los cambios climáticos, es también una herramienta que sustenta a una amplia variedad de técnicas de teledetección (Figura 6) (Plag & Pearlman, 2009).

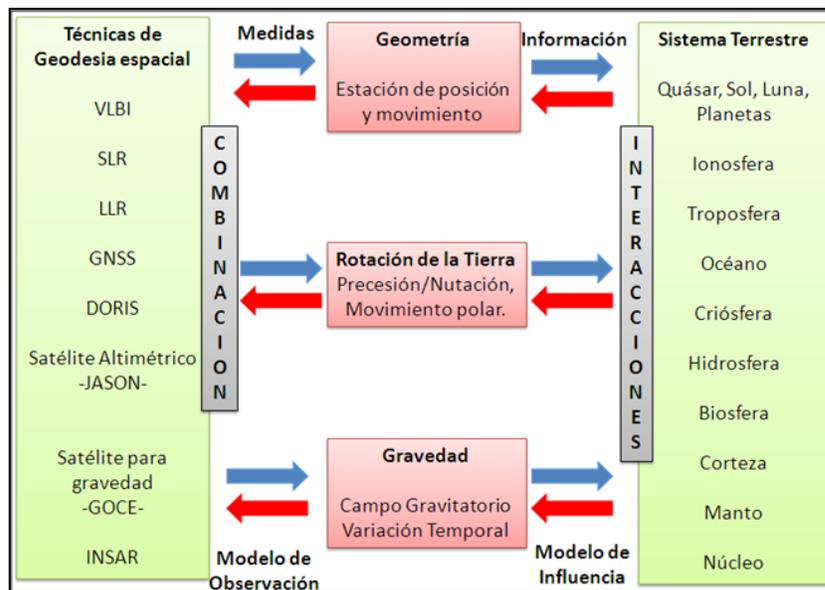


Figura 6 Técnicas de la Geodesia espacial y sus aplicaciones. Adaptado de Rummel (2010), en Pérez (2013).

El posicionamiento, la determinación del campo gravitacional, el monitoreo de la rotación terrestre y la teledetección pueden modelarse de manera precisa y eficiente a través de la Geodesia espacial (Rummel, 2010). Su desarrollo ha dado lugar a un gran aumento en la precisión con la que se obtiene la localización de sitios sobre la superficie terrestre, de modo que no es difícil determinar la velocidad de un punto con respecto a un sistema de coordenadas apropiado, por lo que es necesario contar con un marco de referencia bien determinado (Gárate & Dávila, 2011).

Dos sistemas de referencia son necesarios para la Geodesia: el Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS, por sus siglas en inglés) y el Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS, por sus siglas en inglés). El marco de referencia correspondiente al ITRS es el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF, por sus siglas en inglés), el cual se realiza con las posiciones y velocidades de un conjunto de sitios distribuidos globalmente en la superficie sólida de la Tierra (Plag et al., 2009). El ITRF es el marco de referencia de los vectores de velocidad obtenidos con GPS (Figura 7).

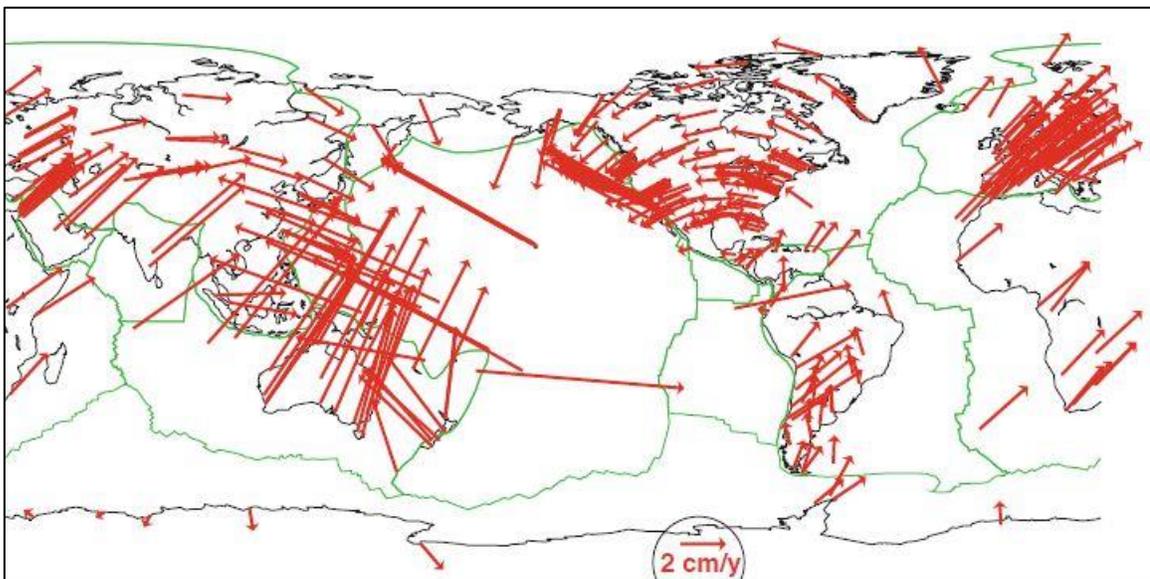


Figura 7 Vectores de velocidad en el sistema de referencia ITRF08. Las líneas verdes representan los límites de placas principales. Adaptado de Altamimi et al. (2011)

1.8.1 Aplicaciones de la Geodesia espacial

La Geodesia espacial tiene diversas aplicaciones en la ingeniería y la investigación científica, con ella es posible la medición de las deformaciones de la Tierra y su relación con los esfuerzos acumulados en el

tiempo, con propósitos de prevención o predicción de la influencia tanto de factores naturales como antropogénicos (Mahmoud, 2003).

Varias técnicas geodésicas han sido utilizadas para medir la deformación y movimiento de la corteza en los límites de las placas de Norteamérica y Pacífico. Los datos más antiguos provienen de la medición de ángulos existentes entre tres sitios utilizando el método de triangulación; luego se utilizó la técnica de medición de la distancia con el uso de aparatos electro-ópticos (EDM, por sus siglas en inglés), ambas están limitadas a distancias menores a unas pocas decenas de kilómetros, requiriendo habilidades especiales y equipo costoso para obtener un buen resultado.

La observación desde la Tierra con SLR y VLBI utilizando objetos en el espacio, hacen posible la medición de distancia entre sitios que se encuentran a cientos de miles y millones de kilómetros. Tomando ello como referencia, se ha logrado una estimación de los movimientos relativos entre las placas tectónicas (Robaudo & Harrison, 1993). El más reciente avance en mediciones geodésicas precisas ha sido el uso de satélites GPS. Los receptores GPS realizan una determinación instantánea de la distancia entre el receptor y los satélites. Con suficientes distancias obtenidas a partir de satélites que se encuentran en diferentes direcciones, se puede calcular la posición de la antena/receptor (Larson et al., 1991).

1.8.2 Técnicas de observación de la Geodesia espacial

Las técnicas de la Geodesia espacial se basan en la geometría, consisten de una componente de estaciones fijas en terreno, con las cuales el movimiento de los satélites u objetos astronómicos son rastreados con ondas electromagnéticas. Estas estaciones pueden ser pasivas, es decir, solo reciben señales de fuentes remotas (GPS, VLBI) o activas (SLR, DORIS) (Plag et al., 2009).

Las principales técnicas usadas en la Geodesia Espacial son:

- Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés), el cual incluye: el GPS propiedad de los EEUU, el ruso GLONASS, el europeo GALILEO y el chino Beidou. Dentro de los GNSS se suele incluir a sistemas regionales complementarios, tales como: el japonés QZSS y el IRNSS de la India (Lechner & Baumann, 2000)
- SLR

- VLBI
- DORIS

Con estas técnicas se realizan investigaciones sobre la física de la Tierra sólida, estudios oceanográficos, atmosféricos, medio ambiente y su impacto en el clima global.

Las mediciones geodésicas realizadas en muchas regiones del mundo han revelado la acumulación de deformaciones producidas por los procesos tectónicos. Dado que la acumulación de la deformación es un proceso que transcurre lentamente en el tiempo, es necesario el uso de técnicas y métodos de alta precisión que puedan captar estas variaciones. De las múltiples técnicas y métodos geodésicos que van desde los más típicos y antiguos hasta los más sofisticados y modernos, se ha podido establecer que el GNSS es el que mejor se ajusta a los requerimientos para obtener mediciones sismo tectónicas confiables.

1.8.3 Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)

El GNSS es una constelación de satélites que transmiten señales en el espectro de las microondas a receptores ubicados en la superficie de la Tierra (Figura 8). Con ello, se obtiene la localización geográfica de los receptores en cualquier parte del globo terrestre (tierra, mar o aire) para fines de navegación, transporte, geodesia, hidrografía, agricultura, entre otras (Lechner et al., 2000).

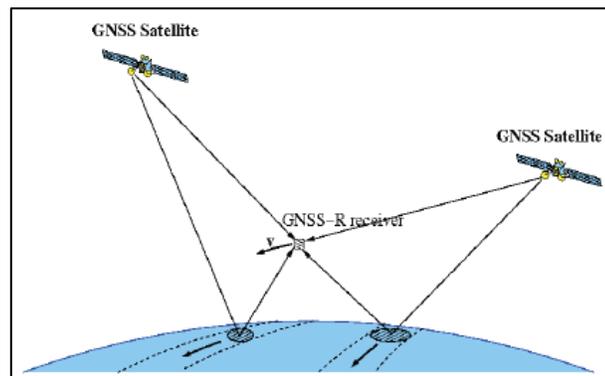


Figura 8 Sistema GNSS, conformado por una Constelación de satélites que emiten de manera constante señales a los receptores situados en la superficie de la Tierra. Fuente: <http://www.navipedia.net>

Dentro del sistema GNSS y específicamente en el GPS, existen tres segmentos, los cuales de manera integrada brindan información necesaria para determinar la posición (Figura 9):

- Segmento Espacial.- Constituido por 32 satélites que continuamente transmiten señales que son registradas en las antenas receptoras en el sitio de observación. Ellos se encuentran distribuidos en seis planos orbitales, situados a una altura aproximada de 22,000 km.
- Segmento Control.- Consiste de una red mundial de estaciones encargadas de monitorear los satélites, la integridad de los mismos, corrigen las órbitas y supervisan el estado de los relojes atómicos.
- Segmento Usuario.- Constituido por el hardware (equipos de recepción) y el software que se utilizan para captar y procesar las señales satelitales. Para los usuarios del sistema GPS este segmento es la parte que más interesa, puesto que la precisión en la posición depende del tipo de instrumento y métodos de procesamiento empleados (El-Rabbany, 2002).

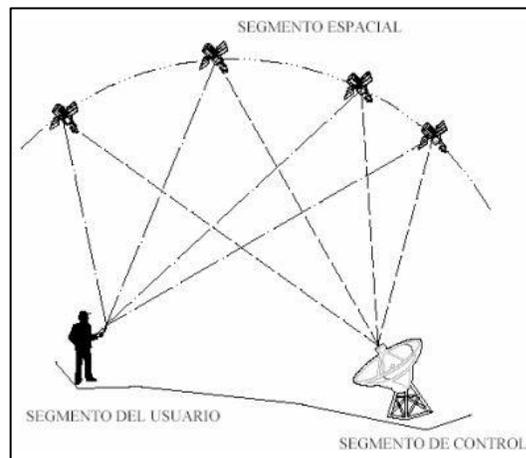


Figura 9 Segmentos del Sistema GPS. El segmento espacial está formado por la constelación de satélites GPS, el segmento control es el encargado de enviar información de corrección y monitoreo a los satélites, y el segmento usuario son las estaciones que almacenan la información para su posterior análisis.

Capítulo 2 Metodología

2.1 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El GPS es un sistema de navegación diseñado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con fines militares para proporcionar estimaciones precisas de posición, velocidad y tiempo; utilizando al menos 4 satélites para determinar por triangulación, la altitud, longitud y latitud de cualquier objeto en la superficie terrestre. Los satélites orbitan la Tierra a una altura aproximada de 22,000 km y completan una rotación aproximadamente cada 12 horas (Figura 10).

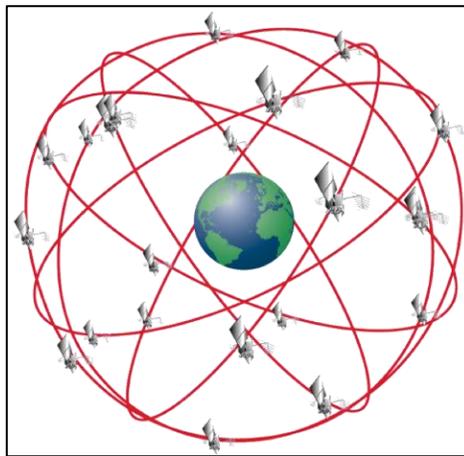


Figura 10 Esquema de las orbitas de los satélites GPS. Fuente: <http://code7700.com/gps.html#references>

Las dos señales electromagnéticas emitidas por los satélites (L_1 y L_2) sirven para la eliminación de la refracción provocada por la ionósfera, y la simultaneidad de observaciones a diferentes satélites permite la eliminación de los errores de sincronización del reloj del receptor respecto al reloj del sistema GPS (Lawrence, 2000). Alternativamente a la estimación de los errores entre los relojes receptor-sistema, se puede realizar la observación en diferencias dobles, esto es, la diferencia entre un receptor GPS y la observación de dos satélites; luego de dos receptores con un solo satélite (Figura 11).

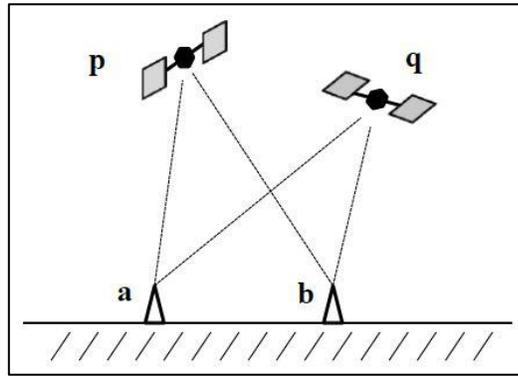


Figura 11 Esquema ilustrativo de dobles diferencias, siendo a y b estaciones fijas GPS observando a los satélites p y q. Adaptado de Gonzalez-Ortega (2014).

En el centro de control del sistema GPS y de red de estaciones globales en operación continua (SOPAC en sopac.ucsd.edu y UNAVCO en www.unavco.org) se genera información para el funcionamiento óptimo del sistema GPS:

- Posiciones satelitales (precisión de pocos cm.)
- Correcciones del reloj satelital (precisiones de 10 picosegundos)
- Coordenadas diarias de las estaciones (precisión de pocos mm)
- Retrasos troposféricos para todas las estaciones, para la estimación del contenido de vapor de agua sobre cada estación.

Los datos continuamente suministrados por estos centros de procesamiento permiten detectar pequeños desplazamientos de la corteza terrestre, monitorear el estado de la deformación tectónica en el tiempo, realizar un seguimiento del comportamiento de los esfuerzos en la corteza, principalmente en las fallas, entre otros.

2.1.1 Frecuencias de las señales GPS

Los satélites transmiten la señal en dos frecuencias portadoras:

- L_1 a 1575.42 MHz con $\lambda \sim 19$ cm. Transmite los códigos C/A (Coarse/Acquisition) y P (Precise).

- L_2 a 1227.60 MHz con $\lambda \sim 24\text{cm}$. Transmite información militar modulada en código P.

El satélite transmite además una señal de 50 Hz. en ambas frecuencias portadoras, que incluye la corrección al reloj satelital y efemérides que permiten determinar su posición.

Sobre las dos frecuencias portadoras se insertan varios códigos cifrados que rigen el funcionamiento del sistema, los cuales transportan en código binario la información necesaria para el cálculo de las posiciones. El más básico es el código C/A, que va dentro de la señal L_1 , es leído por todos los receptores (incluidos los navegadores más sencillos). Otro código modulado sobre ambas frecuencias portadoras es el denominado P (incluidos en los navegadores geodésicos). En función del número de satélites que un receptor es capaz de leer y analizar va el precio del mismo.

2.2 Funcionamiento del GPS

El GPS tiene por objetivo calcular la posición de un punto cualquiera en un espacio de coordenadas (X, Y, Z), partiendo del cálculo de las distancias del punto a un mínimo de tres satélites cuya localización es conocida. La distancia entre el usuario (receptor GPS) y un satélite se mide multiplicando el tiempo de vuelo de la señal emitida desde el satélite por su velocidad de propagación ($c\Delta t$). Para medir el tiempo de vuelo de la señal es necesario que los relojes de los satélites y de los receptores estén sincronizados, pues deben generar simultáneamente el mismo código de identificación. Ahora bien, mientras los relojes atómicos de los satélites son muy precisos, los de los receptores son de osciladores de cuarzo, de bajo costo y por tanto imprecisos. Las distancias con errores debidos al asincronismo se denominan *pseudodistancias* o *pseudorangos*. La desviación en los relojes de los receptores añade una incógnita más, por lo cual se hace necesario un mínimo de cuatro satélites para estimar correctamente X, Y y Z (Pozo-Ruz et al., 2000).

Un receptor GPS básicamente puede hacer dos tipos de mediciones: (a) pseudorangos y (b) por conteo de ciclos completos de las fases portadoras. En aplicaciones tales como la navegación y cartografía, donde la precisión que se requiere es baja, del orden de unos cuantos metros, las mediciones que se utilizan son los pseudorangos, mientras que para aplicaciones que requieran mayor precisión, del orden de unos cuantos milímetros, tales como las geodésicas, las mediciones se basan en ciclos de la fase. La medida por el conteo de fase para las señales portadoras es la de mayor importancia para estudios sismotectónicos (Wells et al., 1987). Por otro lado, las estaciones terrestres de control revisan

periódicamente los relojes atómicos de los satélites, enviando las efemérides y correcciones. La precisión de los relojes y la estabilidad de la trayectoria de los satélites son claves en el funcionamiento del sistema GPS.

2.2.1 Obtención de la posición mediante Pseudorangos

Para la obtención de la posición de un punto es necesario conocer las posiciones satelitales y tomar en cuenta la desincronización de los 3 relojes: satelital, del receptor y del sistema GPS.

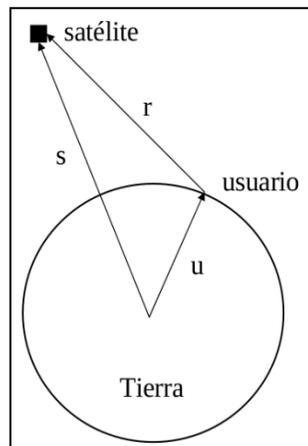


Figura 12 Esquema de la relación vectorial de los parámetros orbitales para estimar la posición del vector u . Donde s es la localización espacial del satélite (efemérides) y r es la distancia del satélite al receptor (pseudorangos).

De la Figura 12, la relación entre la distancia del satélite al receptor es:

$$|\vec{r}| = |\vec{s}| - |\vec{u}| = c\Delta t \quad (1)$$

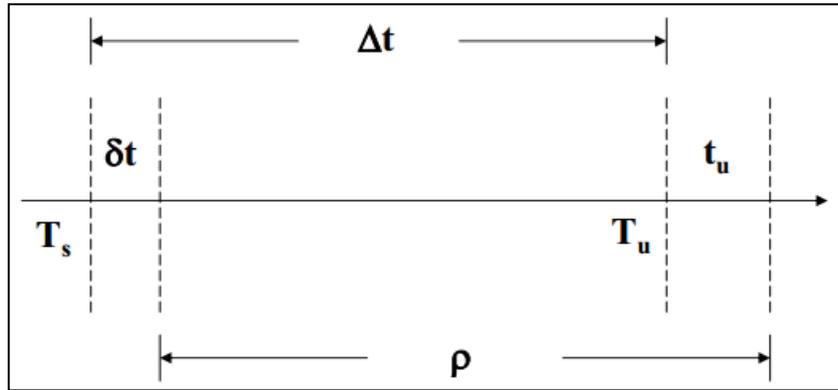


Figura 14 Relación esquemática entre los diferentes valores de tiempo GPS, involucrados en la estimación de la posición del receptor: del satélite, del receptor y el del sistema.

Donde T_s es el tiempo del Sistema GPS cuando se transmite la señal desde el satélite, T_u es el tiempo del Sistema GPS al llegar la señal al receptor, Δt es la diferencia entre el tiempo del Sistema GPS y el tiempo del reloj satelital, t_u es la diferencia entre el tiempo del Sistema GPS y el tiempo del receptor. Por lo tanto, $T_s + \delta t$ es la lectura del reloj del satélite corregida y $T_u + t_u$ es la lectura del reloj del receptor corregida. Ambas correcciones con respecto al tiempo absoluto de referencia del Sistema GPS.

Para resolver la ecuación 3 y estimar la posición del receptor, se necesitan al menos cuatro observables (pseudorangos). El esquema de solución se inicia considerando una posición inicial aproximada del sitio (X_o, Y_o, Z_o) , con las efemérides o posiciones satelitales $(X_j, Y_j$ y $Z_j)$ y los pseudorangos medidos por el receptor GPS.

Con la ecuación 4 obtenemos pseudorangos calculados, utilizando las coordenadas iniciales y satelitales:

$$\rho^j(t) = \sqrt{((X_j - X_o)^2 + (Y_j - Y_o)^2 + (Z_j - Z_o)^2)} \quad (4)$$

Ahora, podemos realizar derivadas parciales respecto a X, Y y Z, de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \rho^j}{\partial X} = \frac{-(X_j - X_o)}{\rho^j(X_o, Y_o, Z_o)}, \quad \frac{\partial \rho^j}{\partial Y} = \frac{-(Y_j - Y_o)}{\rho^j(X_o, Y_o, Z_o)}, \quad \frac{\partial \rho^j}{\partial Z} = \frac{-(Z_j - Z_o)}{\rho^j(X_o, Y_o, Z_o)} \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que necesitamos 4 satélites; por lo tanto 4 conjuntos de ecuaciones, es más conveniente utilizar la siguiente notación matricial:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial \rho^1}{\partial X} | X_o, Y_o, Z_o & \frac{\partial \rho^1}{\partial Y} | X_o, Y_o, Z_o & \frac{\partial \rho^1}{\partial Z} | X_o, Y_o, Z_o & -1 \\ \frac{\partial \rho^2}{\partial X} | X_o, Y_o, Z_o & \frac{\partial \rho^2}{\partial Y} | X_o, Y_o, Z_o & \frac{\partial \rho^2}{\partial Z} | X_o, Y_o, Z_o & -1 \\ \frac{\partial \rho^3}{\partial X} | X_o, Y_o, Z_o & \frac{\partial \rho^3}{\partial Y} | X_o, Y_o, Z_o & \frac{\partial \rho^3}{\partial Z} | X_o, Y_o, Z_o & -1 \\ \frac{\partial \rho^4}{\partial X} | X_o, Y_o, Z_o & \frac{\partial \rho^4}{\partial Y} | X_o, Y_o, Z_o & \frac{\partial \rho^4}{\partial Z} | X_o, Y_o, Z_o & -1 \end{bmatrix} \quad l = \begin{bmatrix} P^1 - c\delta^1 - \rho^1 \\ P^2 - c\delta^2 - \rho^2 \\ P^3 - c\delta^3 - \rho^3 \\ P^4 - c\delta^4 - \rho^4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde P son los pseudorángos medidos de cada satélite, $c\delta$ es la velocidad de la luz multiplicada por el desfase del tiempo satelital (de los archivos orbitales) y ρ son los pseudorángos calculados.

La solución final está dada por la siguiente ecuación:

$$x = (A^T A)^{-1} A^T l \quad (7)$$

El proceso se realiza iterativamente hasta encontrar la solución convergente en la posición.

2.3 Efectos atmosféricos en la señal

La señal electromagnética deberá atravesar tres zonas con distintas características físicas: el vacío, la ionósfera y la tropósfera, antes de llegar al receptor en superficie. Se define entonces el retardo como el incremento del tiempo de propagación de una onda electromagnética entre dos puntos cuando se

propaga en un medio material, comparado con el tiempo de propagación en el vacío, ya que la velocidad de propagación en el vacío es mayor.

2.3.1 Efecto de la Ionósfera

La ionósfera es un medio dispersivo que se localiza en un rango de 70 - 1000 Km por encima de la superficie terrestre. En esta región los rayos UV ionizan las moléculas, dejando electrones libres. Estos electrones interfieren con la señal electromagnética, en forma de densidad electrónica TEC (Total Electron Content), el cual es principalmente función de la hora del día. El retraso temporal que sufre la señal de GPS al viajar a través de la ionosfera se puede describir como:

$$\Delta_{ionósfera} \propto \frac{TEC}{frecuencia} \text{FactorOblicuidad} \quad (8)$$

Depende de las frecuencias L_1 - L_2 y del ángulo de elevación (factor de oblicuidad). Debido a que el retraso de la señal por medio de la ionósfera es dependiente de la frecuencia, se puede eliminar casi por completo haciendo uso de un receptor con doble frecuencia (Wanninger & Jahn, 1993). Por ejemplo, diferenciando las mediciones de los pseudorangos en ambas frecuencias se obtiene una estimación de los retrasos de la ionosfera en términos de L_1 y L_2 :

$$\Delta_{ionósfera_{L1}} = \left(\frac{L_2^2}{L_2^2 - L_1^2} \right) (\rho_{L1} - \rho_{L2}) \quad (9)$$

2.3.2 Efectos de la tropósfera

El efecto de la tropósfera, por otro lado, no depende de las frecuencias usadas en GPS. El retraso de la señal es función de la temperatura local, presión y humedad, parámetros contenidos en el índice de refracción de la Tropósfera:

$$\Delta_{tropósfera} = \frac{10^{-6}}{5} [N_{seca}F_s(h) + N_{húmeda}F_h(h)] \quad (10)$$

Donde $N_{seca} \approx a_1 \frac{P_o}{T_o}$; $N_{húmeda} \approx a_2 \frac{e_o}{T_o} + a_3 \frac{e_o}{T_o^2}$, con P_o y e_o son las presiones parciales de la capa seca y de vapor de agua a nivel del mar. T_o es la temperatura al nivel del mar y a_1, a_2, a_3 son constantes empíricas (Mendes & Langley, 1994). Para cuando no se está a nivel del mar hay una función $F(h)$, que depende de la topografía.

2.4 Estaciones GPS

Las estaciones GPS forman parte del segmento usuario. Consiste del equipo situado en la superficie de la Tierra, encargado de la observación y recaudación de la información de señales satelitales. Se dividen en dos tipos: estaciones temporales y estaciones permanentes. Las diferencias entre ellas son el período de observación y de instalación, así como sus aplicaciones. Ambas son colocadas en lugares estratégicos, según el interés de estudio, considerando una buena ubicación, por ejemplo: situadas en zonas altas y roca sólida, alejadas de vegetación alta, construcciones u obstáculos que puedan interferir en la recepción de la señal. A continuación se describen con mayor detalle, su instalación y aplicaciones.

2.4.1 Estaciones GPS permanentes (cGPS)

Su principal característica radica en su instalación, ya que está diseñada con el fin de perdurar realizando observaciones y grabación de las señales satelitales de manera constante por el transcurso de varios años. Son instaladas principalmente por organizaciones geodésicas como UNAVCO, la cual es una organización que se enfoca en la investigación y en la educación en el ámbito de las geociencias a través de la Geodesia. La información de las cGPS es libre y se puede conseguir vía internet a través de la página de UNAVCO, SOPAC, entre otras (Figura 15).



Figura 15 Estaciones GPS permanentes ubicadas en México y sur de los Estados Unidos. Fuente: UNAVCO

2.4.1.1 Instalación

La instalación está diseñada de manera que puedan mantenerse funcionando por un largo período de años. Existen diferentes técnicas de instalación, en el caso de GUAX en Isla Guadalupe, se construyó un tripié con barras de acero inoxidable, las cuales fueron enterradas a dos o tres metros de profundidad, con el fin de que permanezca fijo y sea resistente a diferentes factores como golpes, animales, clima, entre otros. Al no quedar fijo y resistente, la información no será fiable para la obtención de precisiones milimétricas.

Sobre el tripié colocamos una base de nivel, asegurándonos que el punto de estudio quede correctamente centrado y nivelado. Una vez asegurado el tripié y calibrado, se inserta la antena GPS de manera que se encuentre orientada al Norte. La antena se resguarda bajo un domo, con el fin de protegerla del intemperismo, y a su vez está conectada al receptor GPS.

La fuente de energía es proporcionada por baterías de gel, que junto al receptor, se colocan dentro de unas cabinas de acero inoxidable, para su protección de robo y efectos atmosféricos. Además, se instalaron 6 paneles solares, con el fin de estar recargando las baterías y proveer de energía a la antena transmisora, la cual está enviando de manera constante la información en tiempo real. La estación cGPS GUAX, es además una estación meteorológica y sismológica (Figura 16).



Figura 16 Instalación de la estación cGPS GUAX en Isla Guadalupe. Se observa el domo protector de la antena GPS, la antena trasmisora, los paneles solares y las cabinas de aluminio con las baterías y receptor GPS.

2.4.1.2 Aplicaciones

En términos generales, las cGPS tienen diferentes aplicaciones y sirven de apoyo para:

- Levantamientos Geodésicos y Topográficos
- Apoyo como puntos de control para trabajos fotogramétricos y cartográficos
- Localización con alta precisión presísmica, postsísmica y cosísmica
- Determinación de velocidad tectónica
- Estimación de vapor de agua en la atmósfera
- Investigación y monitoreo de fenómenos geodinámicos y geofísicos (subsistencia, fallas, etc.)
- Junto con otras técnicas de la Geodesia espacial, forma la base para elaborar el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF)

2.4.2 Estaciones GPS temporales

Las estaciones GPS temporales no tienen un funcionamiento continuo como en el caso de las estaciones permanentes. La instalación está diseñada para que realice observaciones y almacene información por un período de días (depende del uso y energía de las baterías). La información de éste tipo de estaciones es más restringida, en general los datos no están disponibles como las permanentes, de modo que la información obtenida está resguardada por el usuario que realizó la medición. Aunque se tiene esa desventaja, este tipo de estaciones permite una mayor densificación de observaciones, ya que se tiene la facilidad de utilizar el mismo equipo en diferentes sitios de interés y de manera rápida ante cualquier evento o necesidad, como en el caso de algún evento sísmico, construcciones de ingeniería (edificios, calles, puentes) entre otras.

2.4.2.1 Instalación

Su instalación se presenta de una manera más sencilla que las cGPS, pero en ambas se requieren de ciertas especificaciones. El tripié es topográfico y es colocado de manera que quede firme y sujeto al terreno. Se coloca la antena sobre la base nivelante, asegurándonos de que la base esté nivelada y

centrada, así como la antena orientada al Norte. La antena se conecta al receptor GPS junto con las baterías (Figura 17). El tiempo de observación dependerá de los requerimientos del estudio, así como del período de energía suministrada. En ambas estaciones nos cercioramos de que el equipo esté funcionando correctamente y se toman lecturas del equipo utilizado, si se realizó bien la nivelación, el centrado y orientación de la base y la antena, así como su altura, esto se realiza al momento de la instalación y en la desinstalación del equipo.



Figura 17 Instalación de la estación GPS temporal RMGU en Isla Guadalupe, Baja California, México.

2.4.2.2 Aplicaciones

En términos generales, estas estaciones tienen diferentes aplicaciones y sirven de apoyo para:

- Levantamientos Geodésicos y Topográficos
- Apoyo como puntos de control para trabajos fotogramétricos y cartográficos
- Localización con alta precisión presísmica, postsísmica y cosísmica
- Con una red densa de estaciones, se puede obtener mayor detalle y control de la localización y desplazamiento de sismos y fallas
- Determinación de velocidad tectónica

- Investigación y monitoreo de fenómenos geodinámicos y geofísicos (subsistencia, fallas, etc.)

2.5 Salida de Campo

Con el apoyo de la Secretaría de Marina/Armada de México, y con los permisos necesarios otorgados por SEMARNAT, CONANP, SEGOB y PROFEPA, se realizó la visita vía marítima a Isla Guadalupe el mes de Junio del presente año, con el fin de reinstalar la cGPS GUAX y obtener mediciones de las estaciones temporales: GAIR, GUAD y RMGU (Figura 18). La estación permanente GUAX fue instalada con el trabajo de John Galetzka y Chris Walls por parte de UNAVCO y con el apoyo de Alejandro González Ortega.

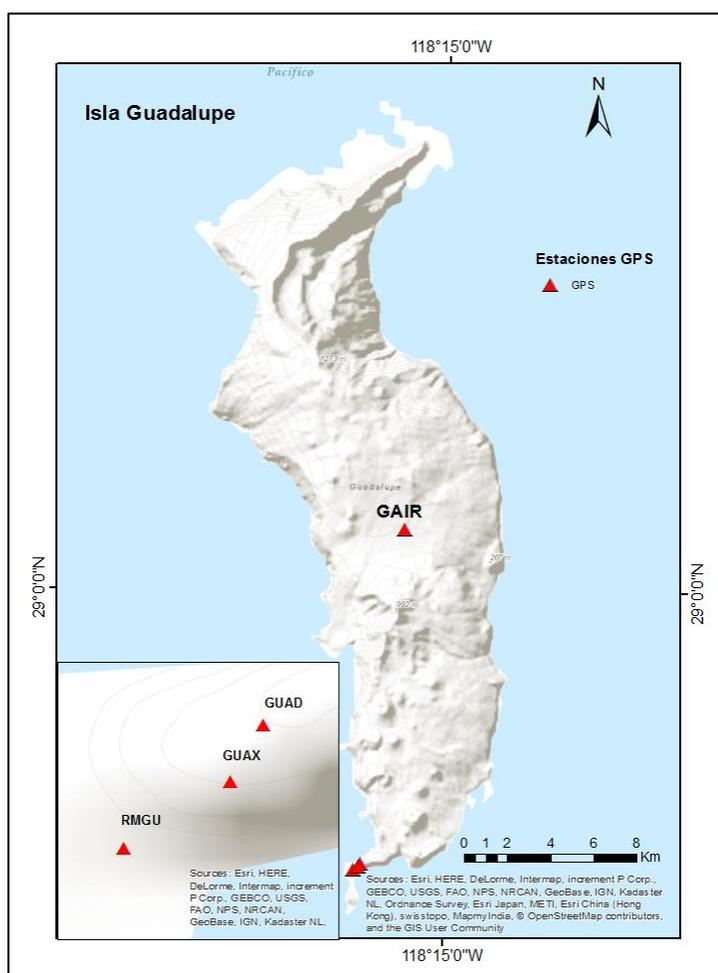


Figura 18 Mapa de localización de las estaciones GPS en Isla Guadalupe. GAIR está localizada en la parte central de la isla, mientras que las temporales GUAD y RMGU y la cGPS GUAX se encuentran en la parte sur.

En las Figuras 19, 20 y 21 se presentan las estaciones temporales instaladas. La estancia en la Isla fue durante un período de 7 días, por lo que se colectó información entre 5 y 6 días. La cGPS cuenta con una antena satelital transmisora (Figura 22), la cual está enviando constantemente los datos observados en tiempo real a UNAVCO, la información es libre y se encuentran disponibles a través de su página de internet. Para tener consistencia de información entre las 4 estaciones de la isla, se realizó el análisis de los datos GPS considerando observaciones de 7 días para GUAX.

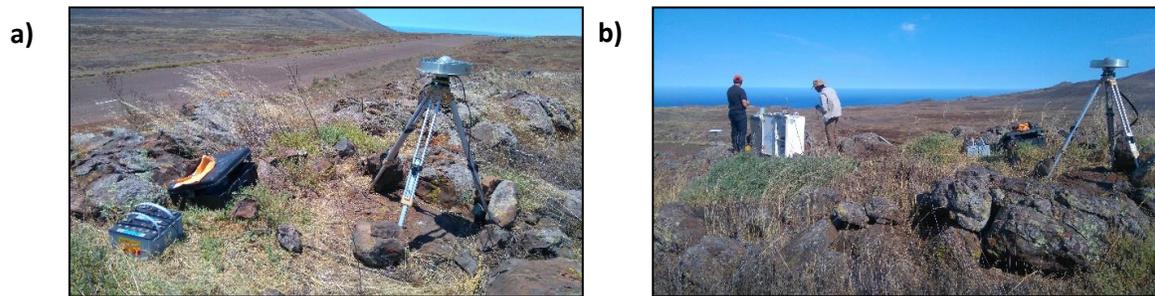


Figura 19 a) Se muestra la estación GPS temporal GAIR. Se localiza en la parte central de la isla a un costado de la pista de aterrizaje. Se observa el tripié con antena GPS, el receptor y baterías. b) instalación de la nueva estación cGPS GU2X.

A un costado de la estación temporal GAIR, instalamos una nueva estación permanente en la isla nombrada GU2X (Figura 19b), esta estación no se instaló con equipo sofisticado como en el caso de GUAX, ni envía sus datos en tiempo real. Este nuevo sitio está planteado de manera que con el transcurso de varios años se pueda obtener el vector de velocidad de la isla considerando mayor número de mediciones en la parte central.



Figura 20 Instalación de la estación GPS temporal GUAD instalada en Isla Guadalupe.



Figura 21 Instalación de la estación GPS temporal RMGU instalada en Isla Guadalupe.

GUAX se instaló con 6 paneles solares, los cuales proveen de energía a 8 baterías de gel, 4 de ellas para alimentar al receptor y las restantes para la antena transmisora. Las baterías y el receptor se encuentran protegidos por unas cabinas de aluminio instaladas en el sitio, junto con el domo donde se protege a la antena GPS.



Figura 22 Instalación de la estación cGPS GUAX. Instalada con el apoyo de UNAVCO, cuenta con 6 paneles solares y antena transmisora de las observaciones en tiempo real.

En la tabla 1 se especifican las coordenadas de las estaciones ubicadas en Isla Guadalupe, con una precisión del orden de 10 metros; la estación cGPS GUAX y las temporales RMGU y GUAD están localizadas en la parte sur de la isla. GAIR se encuentra en la parte central.

Tabla 1 Coordenadas de las estaciones GPS localizadas en Isla Guadalupe

| Estaciones GPS en Isla Guadalupe | | |
|---|------------------|-------------------|
| ID | Latitud ° | Longitud ° |
| Temporales | | |
| GAIR | 29.0258 | -118.2696 |
| GUAD | 28.8851 | -118.2893 |
| RMGU | 28.8827 | -118.2923 |
| Permanente | | |
| GUAX | 28.8840 | -118.2900 |

Una vez terminado el trabajo de campo, el regreso se realizó vía aérea. Después de recolectar las mediciones observadas, se realizó el análisis y procesamiento de toda la información recolectada desde

1999 a 2016. Con este período de tiempo de información, podemos obtener una estimación precisa del vector de velocidad para Isla Guadalupe.

2.6 Red de estaciones base

Para realizar el procesamiento de la información, seleccionamos varias estaciones del International GNSS Service (IGS) (Dow et al., 2009), las cuales nos conforman una base para el cálculo de las diferencias dobles y posiciones calculadas en GAMIT. La principal importancia de nuestra red base es formar una red que envuelva nuestra zona de estudio para poder tener un buen ajuste y mejores resultados.

Seleccionamos 9 estaciones IGS; tres en Hawái: HNLC, KOKB y MKEA, y las restantes en la zona costera del sur de California y en Baja California: *VNDP*, *GNPS*, *JPLM*, *BLYT*, *SPMX* y *CIC1* (Figura 23).

En la tabla 2 se presenta la ubicación y coordenadas de la red de estaciones base utilizada en este estudio.

Tabla 2 Coordenadas y ubicación de las estaciones IGS seleccionadas para nuestra red de estaciones base.

| Red de Estaciones Base | | Coordenadas | |
|------------------------|-----------------------|-------------|------------|
| ID | Ubicación | Latitud ° | Longitud ° |
| BLYT | Blythe, CA. | 33.6104 | -114.7149 |
| CIC1 | Ensenada, BC. | 31.8707 | -116.6658 |
| GNPS | Parker, CA. | 34.3086 | -114.1895 |
| HNLC | Honolulu, HI. | 21.3033 | -157.8645 |
| JPLM | JPL, CA. | 34.2048 | -118.1732 |
| KOKB | Kauai, HI. | 22.1263 | -159.6649 |
| MKEA | Mauna Kea, HI. | 19.8014 | -155.4563 |
| SPMX | San Pedro Martir, BC. | 31.045 | -115.4659 |
| VNDP | Vandenberg, CA. | 34.5563 | -120.6164 |

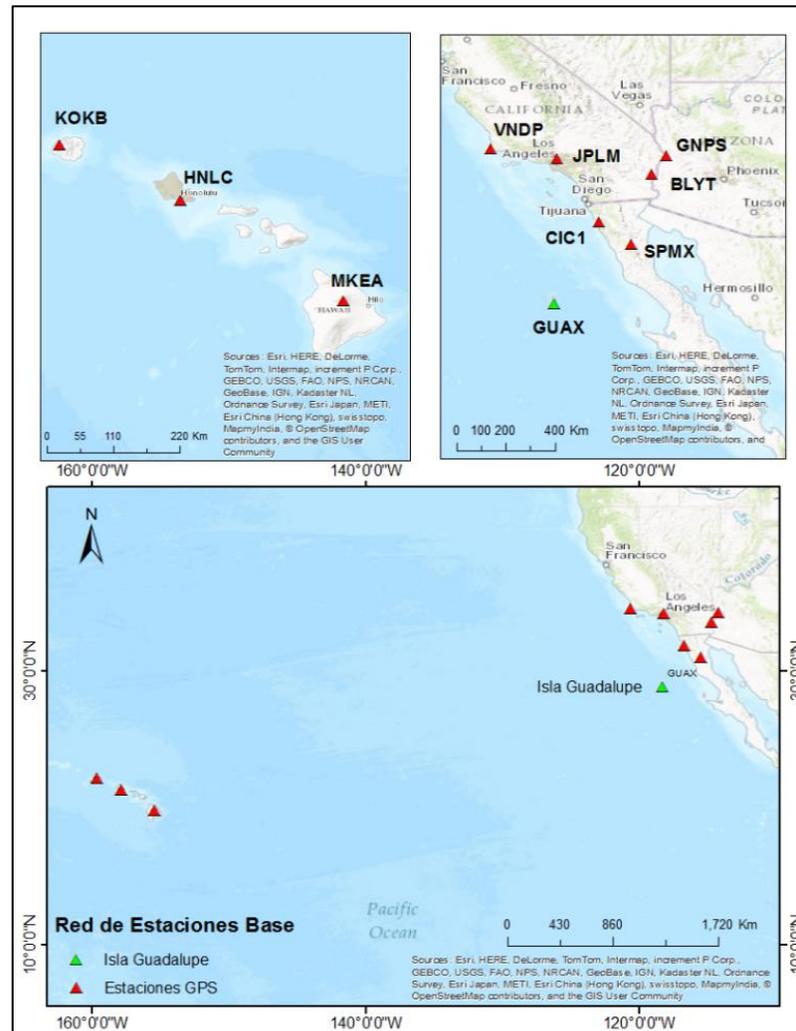


Figura 23 Mapa de localización de las 9 estaciones IGS de nuestra red base; 3 de ellas ubicadas en Hawái (KOKB, HNLC y MKEA), 4 en el suroeste de California (BLYT, GNPS, JPLM y VNDP) y 2 al noroeste de Baja California (CIC1 y SPMX).

2.7 Software GAMIT/GLOBK

GAMIT/GLOBK es un paquete de análisis de datos GPS desarrollado por investigadores del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), el Centro Harvard-Smithsoniano para Astrofísica (CfA), el Instituto Scripps de Oceanografía (SIO) y la Universidad Nacional de Australia, para estimar la posición de estaciones GPS dentro de un marco de dobles diferencias y modelado de órbitas satelitales (Herring et al., 2015c).

2.7.1 Dobles diferencias de observaciones de fase

La medición por pseudorangos es obtenida usando el código C/A con longitud de onda de 300 m o el código P con longitud de onda de 30 m, ambas transmitidas por el satélite. Esta medición provee la observación GPS primaria para navegación, pero no lo suficientemente precisa para ser usada en estudios geodésicos, las cuales se realizan utilizando las fases de las ondas portadoras. Esta observación es la diferencia entre la fase de la onda portadora en la señal satelital y la fase de un oscilador local dentro del receptor.

Para realizar las dobles diferencias, es necesario contar con información de mínimo dos estaciones GPS observando el mismo satélite, la primera diferencia de fases elimina el efecto de error o inestabilidad en el reloj satelital, ésta medición es comúnmente llamada “diferencia entre estaciones”. La segunda diferencia de fases se realiza al incorporar otro satélite que esté observando las estaciones GPS, eliminando ahora el efecto o inestabilidad del reloj de las estaciones. Si las estaciones están poco espaciadas, unos cuantos kilómetros, la diferenciación entre las estaciones puede reducir también los efectos por refracción ionosférica.

Con las dobles diferencias se pretende eliminar los efectos de variación en el tiempo de los receptores (Herring et al., 2015a):

$$\Delta\nabla\Phi = \Delta\nabla\rho + \lambda\Delta\nabla N + d_{ionósfera} + d_{tropósfera} + \epsilon_{multipath} \quad (11)$$

Donde Φ es la diferencia de fase, ρ los pseudorangos, N los ciclos de las frecuencias L_1 y L_2 , d los retrasos producidos por la ionósfera, tropósfera y ϵ los efectos por multipath (repeticiones de la señal producidos por reflexiones en superficies).

2.7.2 Modelado de órbitas satelitales

Una primera condición para cualquier estudio geodésico con GPS es un modelo preciso del movimiento y posición de los satélites en todo momento. Los satélites en su movimiento alrededor del planeta se ven afectados directamente por factores que provocan aceleraciones, y por lo tanto perturban sus órbitas, teniendo como consecuencia errores en las estimaciones de posición. Dichos factores son: la gravedad terrestre, la oblicuidad de la Tierra, gravedad de la Luna y el Sol, la radiación solar, mareas terrestres y oceánicas, la nutación, entre otras (Tabla 3) (Xu, 2007).

Tabla 3 Aceleraciones orbitales producidas por diversas fuerzas. Modificada de Xu (2007)

| Fuerzas que producen perturbaciones satelitales | m/s^2 |
|---|---------------------|
| Campo gravitacional de la Tierra | 0.59 |
| Oblicuidad de la Tierra | 5×10^{-5} |
| Atracción gravitacional Lunar | 5×10^{-6} |
| Atracción gravitacional Solar | 2×10^{-6} |
| Atracción por Radiación Solar | 1×10^{-7} |
| Mareas terrestres | 2×10^{-9} |
| Mareas oceánicas | 5×10^{-10} |

El campo gravitacional terrestre es el factor que introduce la mayor perturbación en las órbitas satelitales, produciendo aceleraciones de 0.56 m/s^2 . La Luna, a pesar de tener mucho menor masa que el Sol, se encuentra más cerca de los satélites, contribuyendo con una aceleración de $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$. El Sol se presenta con aceleraciones de $2 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$. Existen tablas anuales de las posiciones Lunar y Solar respecto a la Tierra, para poder determinar la alteración satelital generadas e incorporarlas al procesado en GAMIT.

Los satélites, a su vez, se encuentran expuestos a vientos solares o radiación, impactando directamente a los satélites produciendo aceleraciones de $1 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2$. En el transcurso del tiempo, se han elaborado modelos en base al estudio de las alteraciones por la radiación solar. El modelo comúnmente utilizado es el modelo Berne (Jun-ping & Jie-xian, 2007).

Las mareas terrestres son un efecto indirecto por la atracción gravitacional de la Luna y el Sol hacia la Tierra. Debido a que la Tierra no está compuesta en su totalidad por material sólido, estas atracciones gravitacionales interactúan con la litósfera, produciendo mareas terrestres, induciendo a los satélites aceleraciones de aproximadamente $2 \times 10^{-9} \text{ m/s}^2$. Por otro lado, las mareas oceánicas también son el resultado de los efectos gravitacionales del Sol y de Luna, afectando las masas acuosas del planeta produciendo así las mareas altas y bajas. Este efecto causa cambios del orden de $5 \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$.

2.7.3 Archivos y Tablas

Para el procesamiento de los datos, GAMIT/GLOBK requiere de diversa información representada en tablas o archivos de texto, en los cuales se presentan los parámetros a utilizar en el procesamiento, los modelos de las perturbaciones satelitales, archivos que permiten el intercambio de datos crudos independientemente del receptor (RINEX), archivos de efemérides, modelos orbitales IGS, posicionamiento preliminar de las estaciones base, etc.

Los archivos y tablas a utilizar dependen del período de observación a procesar; por ejemplo, en este trabajo, procesaremos información de los días de observación de las estaciones en Isla Guadalupe, por lo tanto, es necesario contar con todos los archivos y tablas que correspondan solo a esos días.

A continuación se explicarán los archivos y tablas que son necesarios recaudar y organizar para el procesamiento de los datos.

2.7.3.1 Archivos de navegación *brdc* (broadcast ephemerides)

El *brdc* es un archivo de navegación que contiene parámetros diarios que sirven para la estimación de las posiciones satelitales. Se encuentran disponibles para todos los usuarios mediante IGS y CDDIS (en: <http://cddis.gsfc.nasa.gov/>, perteneciente a la NASA).

2.7.3.2 Archivo de órbitas *igs*

Utilizando mediciones de fase de una red global de estaciones permanentes, el IGS puede estimar el movimiento de los satélites con buena precisión, teniendo como resultado los tres tipos de archivos *igs*: *ultra-rápidos*, *rápidos* y *finales*. Los productos finales son la base para el Sistema de Referencia IGS y tienen la mejor precisión. Están disponibles con un retraso de 12 a 18 días al término de cada día GPS.

2.7.3.3 Archivos *RINEX* (Receiver Independent Exchange)

Son los archivos que se generan en cada estación GPS proveniente de la observación satelital. Consta de las frecuencias L_1 y L_2 , pseudorángos, satélites observados, tipo de antena y receptor GPS, altura de la antena respecto al punto de observación, período de observación, etc.

2.7.3.4 Tablas

En esta carpeta se colocan diversos archivos en tablas con diferente información necesaria para el procesamiento, por ejemplo:

- *process.defaults*: determina los parámetros del procesamiento a utilizar, fuentes de datos internos - externos y archivos de órbitas, intervalo del muestreo, tiempo de inicio y las instrucciones para el resguardo de los resultados.
- *sites.defaults*: especifica las estaciones locales e IGS que se desea considerar y cómo se manejarán los metadatos.
- *station.info*: contiene el nombre y las características de las estaciones a utilizar, así como el tipo de antena y receptor, altura del instrumento, etc.
- *l-file*: contiene las coordenadas preliminares de las estaciones GPS a utilizar.
- En esta carpeta también se incorporan los modelos anuales: Lunar, Solar, de Tiempo, Rotación de la Tierra, etc. y el marco de referencia ITRF a utilizar en GLOBK.

Todos los archivos necesarios en el procesamiento y mencionados con anterioridad, fueron recolectados y organizados para ser utilizados en GAMIT/GLOBK. Los archivos RINEX se consiguieron mediante SOPAC, para cada una de las estaciones dentro de nuestra red base, y por ende, sólo para los días de observación con que se cuenta de las estaciones en Isla Guadalupe (Tabla 4).

Tabla 4 Días por año de información recolectada de cada estación de nuestra red base y en Isla Guadalupe para el procesamiento en GAMIT/GLOBK

| Estación GPS | 1999 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2007 | 2008 | 2016 |
|--------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| BLYT | 5 | 39 | 346 | 183 | 356 | 91 | 12 | 24 | 7 |
| CIC1 | 5 | 33 | 342 | 175 | 357 | 91 | 12 | 23 | - |
| GAIR | - | - | 7 | 3 | - | - | - | - | 5 |
| GNPS | - | 39 | 264 | 183 | 361 | 91 | 12 | 24 | 7 |
| GUAD | 5 | 10 | 8 | 2 | - | - | - | - | 6 |
| GUAX | - | 35 | 346 | 183 | 361 | 91 | 12 | 24 | 7 |
| HNLC | 5 | 37 | 343 | 176 | 159 | 57 | - | 24 | 7 |
| JPLM | 5 | 39 | 346 | 183 | 361 | 91 | 12 | 23 | 7 |
| KOKB | 5 | 39 | 212 | 183 | 349 | 91 | 12 | 24 | 7 |
| MKEA | 5 | 39 | 346 | 183 | 352 | 88 | 12 | 24 | 7 |
| RMGU | 2 | 1 | 6 | 2 | - | - | - | - | 5 |
| SMPX | - | 32 | 330 | 86 | 236 | - | - | 4 | - |
| VNDP | 5 | 39 | 332 | 179 | 316 | 78 | - | 24 | 7 |

2.7.4 GLOBK

Su principal propósito es combinar soluciones del procesamiento de datos primarios de observaciones de la geodesia espacial. Acepta como datos las estimaciones y matrices de covarianza asociadas para las coordenadas de cada estación, parámetros de rotación de la Tierra, parámetros orbitales y posiciones generadas a partir de análisis de observaciones primarias de GAMIT (Herring et al., 2015b). Una vez calculadas las dobles diferencias, ajustamos nuestros resultados al marco de referencia global ITRF2008 (Altamimi et al., 2011).

Para obtener un mejor ajuste de nuestros datos, se utilizó información de subredes globales IGS. Aplicando ajustes lineales por mínimos cuadrados, obtenemos las velocidades correspondientes en las componentes Norte y Este.

2.8 ITRF 2008

El marco de referencia ITRF que utilizamos en este trabajo de tesis es el correspondiente al año 2008, debido a que hasta el momento su campo de velocidad es considerado el de la más alta calidad (en febrero de este año se ha concretado el ITRF2014 que vendrá a sustituir al ITRF2008). Es una versión refinada de soluciones reprocesadas basadas en las 4 diferentes técnicas de la geodesia espacial, abarcando la totalidad de los periodos de observación respectivos. Se concreta al utilizar 206 velocidades de sitios geodésicos distribuidos alrededor del globo terráqueo (Altamimi et al., 2011).

El ITRF2008 fue aplicado en GLOBK, utilizando las soluciones calculadas por GAMIT, con el fin de ajustar esos resultados a un marco global y obtener los vectores de velocidad respectivos de cada sitio.

Capítulo 3 Resultados

A continuación se muestran las series de posición de las tres estaciones temporales y una permanente GPS durante el periodo de observación de 15 años. Ello se realizó utilizando el software GAMIT/GLOBK, en el marco de referencia ITRF2008.

3.1 Velocidades de las Estaciones GPS Temporales en Isla Guadalupe

En las Figuras 24, 25 y 26 se muestran las series de posición y el ajuste lineal de las estaciones temporales: GAIR, GUAD y RMGU, respectivamente.

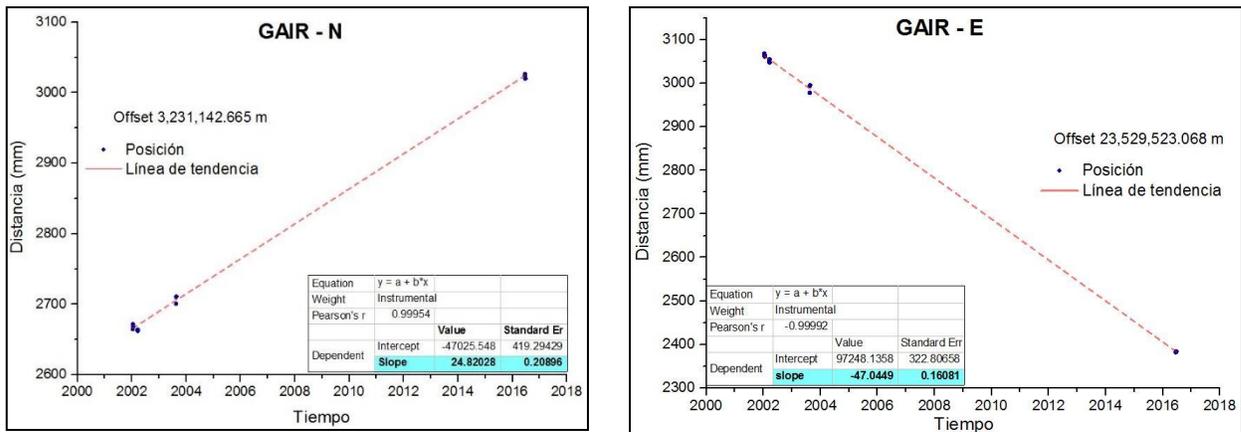


Figura 24 Serie de posición de la estación GAIR. A) componente Norte. B) componente Este.

Aunque GAIR es la estación temporal con menos días de observación (solo 15 días), las estimaciones obtenidas se consideran confiables, ya que se asemejan a los resultados obtenidos en las otras estaciones GPS con mayor información. La velocidad para GAIR en la componente Norte es de $24.8 \pm 0.20 \text{ mm/año}$ con una desviación estándar (1σ). En el componente Este la velocidad estimada es de $-47.0 \pm 0.16 \text{ mm/año}$ con 1σ . La velocidad Horizontal es de 53.2 mm/año en dirección $N 62.15^\circ W$.

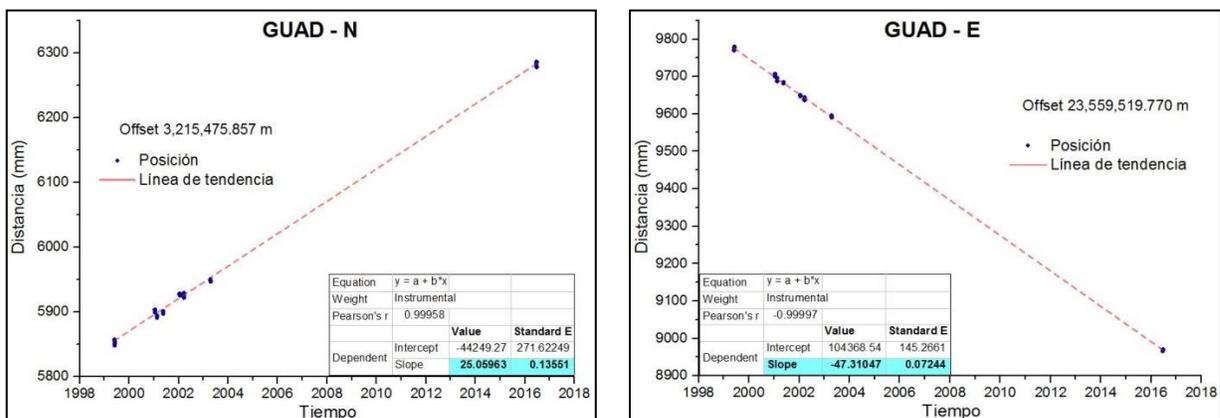


Figura 25 Serie de posición de la estación GUAD. A) componente Norte. B) componente Este.

GUAD es una estación temporal localizada en la parte sur de la isla, cerca de la estación permanente GUAX. Tiene información desde 1999 – 2003 y en el presente año. Con un total de 31 días de observación GPS, GUAD es la estación temporal en Isla Guadalupe con mayor cantidad de datos. La velocidad en la componente Norte es de $25.1 \pm 0.13 \text{ mm/año}$, mientras que en la componente Este es $-47.3 \pm 0.07 \text{ mm/año}$, ambas con 1σ . La velocidad horizontal es 53.5 mm/año en dirección $N 62.10^\circ W$.

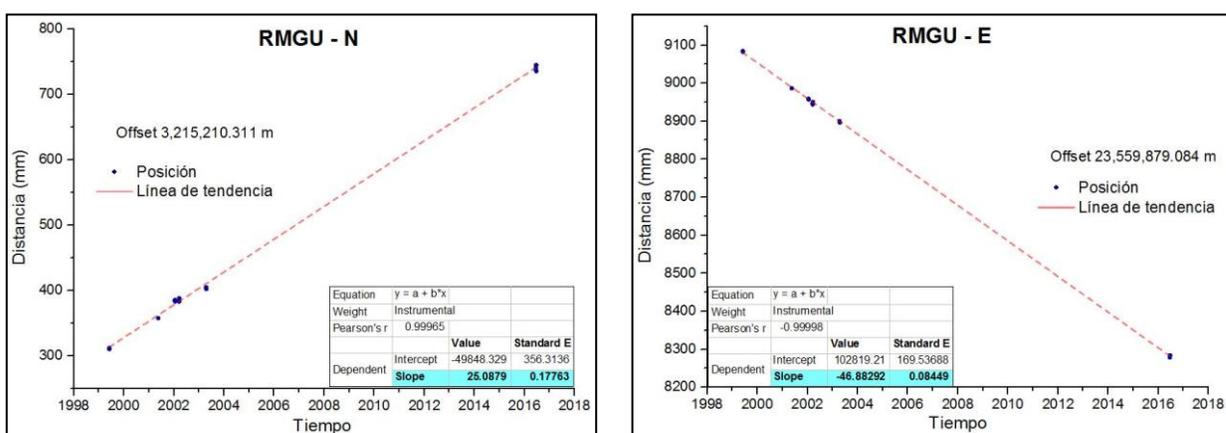


Figura 26 Serie de posición de la estación RMGU. A) componente Norte. B) componente Este.

RMGU es la estación GPS temporal que se encuentra más al sur en Isla Guadalupe. Se cuenta con información de la estación desde el año 1999 hasta el 2003, y la más reciente del presente año. La velocidad en el componente Norte es $25.1 \pm 0.17 \text{ mm/año}$ con 1σ , y en la componente Este $-46.9 \pm 0.08 \text{ mm/año}$ con 1σ . La velocidad horizontal es de 53.2 mm/año en dirección $N 61.86^\circ W$. Las tres estaciones temporales arrojan resultados similares en sus velocidades, lo que fortalece nuestros resultados del vector de velocidad para Isla Guadalupe.

3.2 Velocidad de la Estación cGPS en Isla Guadalupe

La estación GUAX es la más importante en este estudio, debido a que es la que cuenta con información más constante por año. En primera instancia, el valor resultante de velocidad de GUAX puede considerarse como la mejor estimación debido al período de observación diaria – anual. Este resultado será complementado con los resultados de las estaciones temporales.

Se cuenta con información de GUAX en los años 2001-2005, 2007-2008 y las mediciones observadas en 2016. En la Figura 27 se muestra la serie de posición correspondiente a las componentes Norte y Este, los resultados obtenidos con los ajustes lineales para GUAX son de $24.8 \pm 0.11 \text{ mm/año}$ y $-46.9 \pm 0.10 \text{ mm/año}$ con 1σ , respectivamente. La horizontal es 53.1 mm/año en dirección $N 62.12^\circ W$.

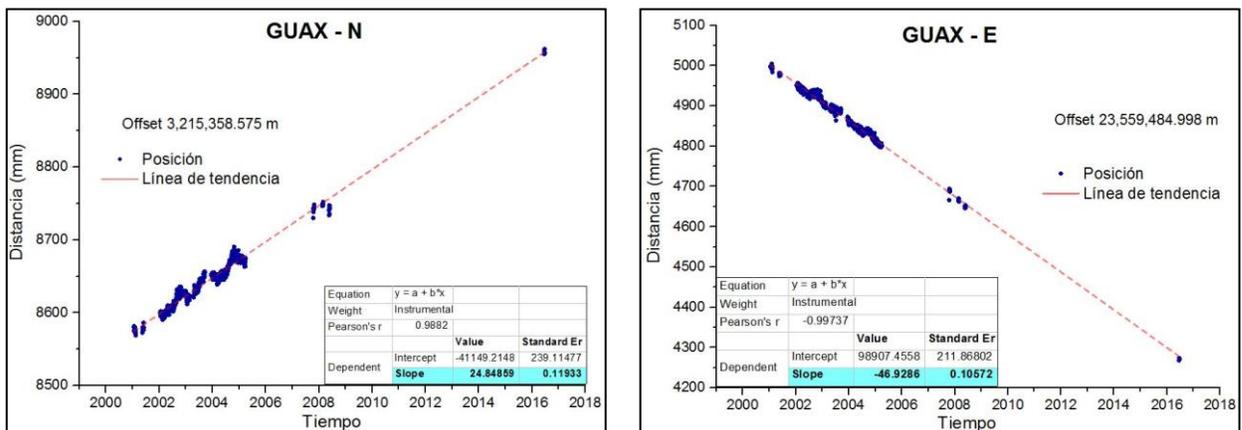


Figura 27 Serie de posición de la estación GUAX. A) componente Norte. B) componente Este.

En ambas componentes se observa un buen ajuste de los datos de posición con la línea de tendencia. Por tener una cantidad más densa de información, podemos observar tendencias cíclicas anuales de los datos. Estos ciclos se asocian a factores producidos por la posición de la Tierra respecto al Sol y de la posición de la Luna, favoreciendo a cambios en las perturbaciones gravitacionales, efectos de mareas, climáticos, etc. (Dong et al., 2002). Un estudio detallado de estos ciclos en la estación GUAX, está fuera del alcance de esta tesis.

Los ajustes lineales de las series de posición se realizaron con el método de ajuste por mínimos cuadrados mediante el software OriginLab. Se utilizó la distribución *t de student* para realizar el cálculo de los errores a 1σ dependiendo del número de muestras por estación. Las velocidades estimadas para GUAX se relacionan favorablemente con los resultados de las estaciones temporales, por lo que contamos con un vector de velocidad confiable para Isla Guadalupe.

Cabe mencionar que en tectónica de placas se contempla sólo movimiento horizontal, por lo que la componente vertical no fue considerada en este estudio. Las estimaciones de velocidad obtenidas en las diferentes estaciones en la isla son muy similares entre sí (Tabla 5; Figura 28). Puesto que estos resultados son coherentes (como era de esperarse debido a su cercanía), podemos decir que contamos con un vector de velocidad confiable y robusto que representa el desplazamiento de Isla Guadalupe. Con este vector de velocidad se realizará la comparación con los modelos de Tectónica de Placas existentes, correspondientes a Placa Pacífico.

Tabla 5 Velocidades estimadas de las estaciones GPS en Isla Guadalupe en $mm/año$ y su orientación. Se presentan en componente Norte, Este y Horizontal (V_N , V_E y V_H). Los errores respectivos se muestran con 3σ . Marco de referencia utilizado ITR08

| Estación en Isla Guadalupe | Coordenadas | | Velocidades $mm/año$ | | | | | | Orientación |
|----------------------------|-------------|---------|----------------------|-------|-------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| | Lat. ° | Long. ° | V_N | V_E | V_H | σV_N | σV_E | σV_H | |
| GAIR | 29.0 | -118.3 | 24.8 | -47.0 | 53.2 | 0.6 | 0.5 | 0.8 | N 62.2° W |
| GUAD | 28.9 | -118.3 | 25.1 | -47.3 | 53.5 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | N 62.1° W |
| GUAX | 28.9 | -118.3 | 24.8 | -46.9 | 53.1 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | N 62.1° W |
| RMGU | 28.9 | -118.3 | 25.1 | -46.9 | 53.2 | 0.5 | 0.3 | 0.6 | N 61.9° W |



Figura 28 Vectores de velocidad en *mm/año* para las estaciones GPS en Isla Guadalupe durante un período de observación de 15 años.

3.3 Comparación con Modelos de Tectónica de Placas

Después de haber estimado el vector de velocidad en Isla Guadalupe, realizamos una comparación con los modelos existentes de Tectónica de Placas, para determinar qué modelo se ajusta de mejor manera a nuestras observaciones. Considerando que la estación cGPS GUAX es la que tiene mayor densidad de mediciones satelitales y en un período de tiempo mayor, fueron sus coordenadas y sus velocidades en ambos componentes y horizontal, los utilizados en los cálculos de comparación.

3.3.1 Obtención de las Velocidades horizontales

Se calcularon las velocidades de cada modelo utilizando las coordenadas de GUAX, así como sus respectivos residuales.

Para calcular las velocidades horizontales (V_H) en cada uno de los modelos utilizamos la ecuación 12 (Minster et al., 1974):

$$V_{ij} = |\overline{W} \times \bar{r}| \quad (12)$$

Donde W es la velocidad angular de la placa en mm/año y r es el vector de posición del sitio de observación.

Utilizando la ecuación 13 calculamos los parámetros correspondientes al vector r :

$$r = \begin{bmatrix} \cos\theta_j \sin\theta_i \sin\lambda_j - \sin\theta_j \cos\theta_i \sin\lambda_i \\ \sin\theta_j \cos\theta_i \cos\lambda_i - \cos\theta_j \sin\theta_i \cos\lambda_j \\ \cos\theta_j \cos\theta_i \sin(\lambda_i - \lambda_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

Donde i y j son las coordenadas del sitio de estudio y del polo de rotación, respectivamente. θ representa la latitud y λ la longitud. La magnitud de r está dada por:

$$r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} \quad (14)$$

3.3.2 Obtención de la velocidad en componente Norte y Este

Una vez obtenida la velocidad horizontal en cada modelo, utilizamos las ecuaciones 15 y 16 para obtener la velocidad en componente Norte y Este (Minster et al., 1974):

$$V_N = r w \cos \theta_i \operatorname{sen} (\lambda_i - \lambda_j) \quad (15)$$

$$V_E = r w [\cos \theta_i \operatorname{sen} \theta_j - \operatorname{sen} \theta_i \cos \theta_j \cos(\lambda_i - \lambda_j)] \quad (16)$$

Con esos resultados, procedemos a realizar la comparación de las velocidades entre los modelos de Tectónica de Placas para Pacífico y nuestra observación en Isla Guadalupe, donde:

$$\text{residual} = \text{Observación} - \text{Modelo} \quad (17)$$

3.3.3 Resultados

En la Tabla 6 se presentan los modelos considerados en nuestras comparaciones, así como la localización de los Polos de rotación y velocidad angular para la Placa Pacífico estimados de cada modelo. También, se presentan las velocidades calculadas para GUAX (V_N, V_E, V_H), utilizando las ecuaciones 15 y 16, así como orientación, para cada uno de los modelos y sus respectivos residuales respecto a nuestra observación de la velocidad de GUAX.

Tabla 6 Modelos de Tectónica de Placas para la placa Pacífico y su comparación respecto a nuestro resultado para GUAX. Se incluye el marco de referencia utilizado y si considera o no la velocidad de Isla Guadalupe.

| Modelo | Polo de Rotación | | | Velocidad mm/a | | | Residuales | | | Orientación | ITRF | Datos en IG |
|-------------------------------|------------------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|--------|-------------|
| | Lat ° | Lon ° | °/Ma | V _N | V _E | V _H | V _N | V _E | V _H | | | |
| Sella et al. 2002 (REVEL) | -64.2 | 112.7 | 0.655 | 24.6 | -47.8 | 53.8 | 0.1 | 0.9 | -0.7 | N 62.7 ° W | ITRF97 | No |
| Altamimi et al. 2002 (ITRF00) | -64.2 | 110.2 | 0.666 | 24.2 | -48.0 | 53.8 | 0.6 | 1.1 | -0.7 | N 63.3 ° W | ITRF00 | No |
| Beavan et al. 2002 | -63.8 | 110.9 | 0.677 | 25.2 | -48.6 | 54.7 | -0.4 | 1.7 | -1.6 | N 62.6 ° W | ITRF00 | No |
| Gonzalez-García et al. 2003 | -63.8 | 108.4 | 0.666 | 23.8 | -47.3 | 53.0 | 1.0 | 0.4 | 0.1 | N 63.3 ° W | ITRF00 | Temporales |
| Prawirodirdjo y Bock 2004 | -63.8 | 110.2 | 0.670 | 24.6 | -48.0 | 53.9 | 0.2 | 1.1 | -0.8 | N 62.9 ° W | ITRF00 | No |
| Kreemer et al. 2006 | -64.3 | 108.5 | 0.654 | 23.0 | -46.9 | 52.2 | 1.8 | 0.0 | 0.9 | N 63.9 ° W | ITRF00 | No |
| Altamimi et al. 2007 (ITRF05) | -62.6 | 112.9 | 0.682 | 27.2 | -48.4 | 55.5 | -2.4 | 1.5 | -2.4 | N 60.6 ° W | ITRF00 | No |
| DeMets et al. 2009 (MORVEL) | -63.4 | 111.8 | 0.677 | 25.9 | -48.5 | 55.0 | -1.1 | 1.6 | -1.9 | N 61.9 ° W | ITRF05 | Geológico |
| Altamimi et al. 2012 (ITRF08) | -62.8 | 111.7 | 0.677 | 26.4 | -47.9 | 54.7 | -1.6 | 1.0 | -1.6 | N 61.1 ° W | ITRF05 | GUAX |
| DeMets et al. 2014 | -62.5 | 110.8 | 0.680 | 26.4 | -47.7 | 54.5 | -1.6 | 0.8 | -1.4 | N 61.1 ° W | ITRF08 | GUAX |
| Kreemer et al. 2014 | -63.1 | 109.6 | 0.66 | 24.7 | -46.8 | 52.9 | 0.0 | -0.1 | 0.2 | N 62.1 ° W | ITRF08 | No |

Capítulo 4 Discusiones

Para poder determinar qué modelo se ajusta mejor a nuestras estimaciones, consideramos que los residuales entre cada modelo y nuestros resultados deberían estar dentro del rango $\pm 1 \text{ mm/año}$. Si los residuales son mayores, se concluye que dicho modelo no es lo suficientemente preciso para ser considerado como un modelo rígido para placa Pacífico.

El modelo global REVEL (Sella et al., 2002) describe las velocidades relativas de 19 placas y bloques continentales, utiliza 303 sitios principalmente de GPS con datos desde 1993 al 2000, de los cuales 24 corresponden a Placa Pacífico, dentro del marco de referencia ITRF97. En este modelo no se contempla información de Isla Guadalupe. Los residuales entre el modelo y nuestras mediciones son: $0.1 V_N$, $0.9 V_E$ y $-0.7 V_H \text{ mm/año}$, con una diferencia en la orientación de 0.6° . En el mismo año, Altamimi et al. (2002) elaboran ITRF2000 utilizando 96 sitios geodésicos con información de las 4 técnicas de la geodesia espacial, con lo cual se obtiene un modelo de Tectónica de Placas ITRF2000 PMM (Plate Motion Model), sin incluir información en Isla Guadalupe. Los residuales obtenidos con la comparación del modelo con nuestra observación son de $0.6 V_N$, $1.1 V_E$ y $-0.7 V_H \text{ mm/año}$, con una diferencia en la orientación de 1.2° .

Beavan et al. (2002) elaboraron un modelo para placa Pacífico utilizando 11 años de datos globales GPS, incluyendo 12 estaciones en dicha placa (ninguna en Isla Guadalupe), utilizando ITRF00. Los residuales entre este modelo y nuestras mediciones son mayores a 1.5 mm/año en V_E y V_H , presentando una diferencia en la orientación de 0.5° .

Gonzalez-Garcia et al. (2003) presentan un modelo para Placa Pacífico, realizando la inversión de datos GPS utilizando 40 estaciones distribuidas en placa Pacífico y Norteamérica. Utilizaron información de las 3 estaciones GPS temporales en Isla Guadalupe del año 1991 al 2002, con ITRF00. Los residuales al comparar este modelo con nuestros resultados son $1.0 V_N$, $0.4 V_E$ y $0.1 V_H \text{ mm/año}$ y 1.2° de diferencia en la orientación. Considerando las pocas estaciones GPS utilizadas en este modelo y el poco tiempo de observación, el modelo se ajusta a nuestros resultados, esto lo asociamos al uso de información en Isla Guadalupe con las estaciones temporales. Prawirodirdjo and Bock (2004) elaboran un modelo para 17 placas tectónicas utilizando información de 106 sitios GPS distribuidos globalmente, con ITRF00 de marco de referencia. Analizaron información de 6 estaciones GPS en placa Pacífico, sin considerar datos en Isla Guadalupe. Los residuales obtenidos con este modelo son de $0.2 V_N$, $1.1 V_E$ y $-0.8 V_H \text{ mm/año}$, con una diferencia en la orientación de 0.8° .

Dos años después, Kreemer et al. (2006) realizan un modelo para 25 placas tectónicas, utilizando 5700 velocidades geodésicas con GPS y el ITRF00. Al realizar la comparación entre los parámetros de Placa Pacífico y nuestra observación, se obtienen residuales de $1.8 V_N$, $0.0 V_E$ y $0.9 V_H$ *mm/año*, con 1.8° de diferencia en la orientación. Aunque en el componente Este el residual es igual a 0, el componente Norte casi alcanza los 2 *mm/año*. Por lo que el modelo no se ajusta a los márgenes de error aceptados.

El ITRF05 fue creado por Altamimi et al. (2007); compuesto por 608 estaciones distribuidas en 338 sitios geodésicos, con información combinada de técnicas de la Geodesia Espacial. Colectaron datos de 10 sitios en Placa Pacífico, sin utilizar a Isla Guadalupe. Con ésta información elaboraron el modelo ITRF05 PMM, los residuales obtenidos en nuestra comparación son de $2.4 - 2.4 V_N$, $1.5 V_E$ y $-2.4 V_H$ *mm/año*, con una diferencia en la orientación de -1.5° . Este modelo es el que presenta mayor error en nuestras comparaciones y por lo tanto no lo consideramos un modelo preciso para Placa Pacífico.

DeMets et al. (2009) presentan el modelo de Tectónica de Placas geológico MORVEL. Tasas de expansión del fondo oceánico y el azimut de fallas transformes fueron utilizados para determinar las velocidades angulares de 19 placas; además, incorporaron información de velocidades utilizando GPS. Utilizaron 21 estaciones GPS en Placa Pacífico, ninguna de ellas en Isla Guadalupe, con ITRF05 de marco de referencia. Los residuales de este modelo respecto a nuestra observación son de $-1.1 V_N$, $1.6 V_E$ y $-1.9 V_H$ *mm/año*, con -0.2° de diferencia en la orientación. Los residuales están por el encima de 1 *mm/año*, por lo que dicho modelo no tiene buen ajuste como un modelo de placas preciso.

Altamimi et al. (2012) elaboran ITRF08 PMM, estimando movimientos absolutos de 19 placas, utilizando información de 206 sitios geodésicos consistentes con el marco de referencia ITRF08. Colectaron datos para la Placa Pacífico de 23 sitios, uno de ellos GUAX en Isla Guadalupe. Los residuales obtenidos en nuestra comparación son $-1.6 V_N$, $1.0 V_E$ y $-1.6 V_H$ *mm/año*, con una diferencia en la orientación de -1.0° . Estas altas diferencias las asociamos a la distribución de los sitios utilizados en el modelo, ya que sólo utilizan GUAX en la zona Este; por lo que los datos están sesgados hacia la zona central y occidental de la placa.

En el año 2014 se elaboraron otros dos modelos de Tectónica de Placas; DeMets et al. (2014) presentan un modelo para Placa Pacífico, a través de la estimación de las velocidades de 26 sitios GPS, sin incluir la velocidad de GUAX, debido a que argumentan que su velocidad difiere dentro de la velocidad de dicha placa. Usaron el ITRF08 como marco de referencia. Los residuales obtenidos de nuestra comparación son de $-1.6 V_N$, $0.8 V_E$ y $-1.4 V_H$ *mm/año*, presentando -1.0° de diferencia en la orientación.

Finalmente, el modelo de Kreemer et al. (2014), presenta velocidades angulares para 36 placas, a través de la estimación de un conjunto de 22,500 velocidades horizontales de sitios GPS distribuidos globalmente, con ITRF08 de marco de referencia. No consideraron datos de GUAX debido a que no lo asocian con un movimiento sobre la Placa Pacífico, ellos afirman que la velocidad de Isla Guadalupe tiene una influencia por una microplaca Baja Californiana. Los residuales entre nuestra observación y el modelo son de $0.0 V_N$, $-0.1 V_E$ y $0.2 V_H$ $mm/año$, con la misma orientación. Por lo tanto, este modelo es el que mejor ajuste tiene con nuestras observaciones en Isla Guadalupe, tanto en las velocidades como en la orientación del desplazamiento.

Capítulo 5 Conclusiones

El vector de velocidad calculado en GAMIT/GLOBK, ajustado al marco de referencia ITRF2008 para la cGPS GUAX en Isla Guadalupe es $V_N = 24.8 \pm 0.30 \text{ mm/año}$, $V_E = -46.9 \pm 0.27 \text{ mm/año}$ y $V_H = 53.1 \pm 0.40 \text{ mm/año}$ con 3σ , en dirección $N 62.12^\circ W$.

Las velocidades obtenidas para las estaciones GPS temporales en Isla Guadalupe son consistentes con GUAX, reforzando nuestro resultado como un vector confiable.

Nuestro vector de velocidad para Isla Guadalupe se ajusta a los modelos de Tectónica de Placas, en especial para Placa Pacífico. Por lo que afirmamos que en efecto se encuentra sobre dicha placa, ajustándose respecto a su velocidad angular.

El modelo que mejor se ajusta a nuestras observaciones es el de Kreemer et al., 2014, con residuales de $0.0 V_N$, $-0.1 V_E$ y $0.2 V_H \text{ mm/año}$, ajustándose también a la dirección del desplazamiento de la isla. Este modelo no utiliza información de Isla Guadalupe, pero cuenta con información de 22,500 velocidades GPS distribuidas globalmente, con el marco de referencia ITRF2008.

El segundo modelo que mejor se ajusta a nuestras observaciones es el de González-García et al., 2003. Es un modelo que determina la velocidad angular de Placa Pacífico utilizando 40 sitios GPS, incluyendo estaciones temporales en Isla Guadalupe. Los residuales en nuestra comparación son $1.0 V_N$, $0.4 V_E$ y $0.1 V_H \text{ mm/año}$.

Los altos valores residuales que se han observado en Isla Guadalupe con los diversos modelos de Tectónica de Placas para Placa Pacífico, los asociamos a la distribución de las estaciones geodésicas, debido a que la mayoría están ubicadas en la parte Central-Occidental se presenta información con valores sesgados hacia esa dirección.

La mayor parte de la placa Pacífico está cubierta por mar, esto hace a Isla Guadalupe como un sitio de gran importancia para mediciones geodésicas en la parte Este de la placa; utilizar su información en la elaboración de futuros modelos de Tectónica de Placas ayudaría a la construcción de la estimación de la velocidad de Placa Pacífico.

Literatura citada

- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B., & Boucher, C. 2007. ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B9).
- Altamimi, Z., Collilieux, X., & Métivier, L. 2011. ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy*, 85(8), 457-473. doi: 10.1007/s00190-011-0444-4
- Altamimi, Z., Métivier, L., & Collilieux, X. 2012. ITRF2008 plate motion model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B7).
- Altamimi, Z., Sillard, P., & Boucher, C. 2002. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B10).
- Argus, D. F., Gordon, R. G., Heflin, M. B., Ma, C., Eanes, R. J., Willis, P., Peltier, W. R., & Owen, S. E. 2010. The angular velocities of the plates and the velocity of Earth's centre from space geodesy. *Geophysical Journal International*, 180(3), 913-960. doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04463.x
- Batiza, R. 1977. Petrology and chemistry of Guadalupe Island: an alkalic seamount on a fossil ridge crest. *Geology*, 5(12), 760-764.
- Beavan, J., Tregoning, P., Bevis, M., Kato, T., & Meertens, C. 2002. Motion and rigidity of the Pacific Plate and implications for plate boundary deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B10).
- CDDIS. NASA's Archive of Space Geodesy Data. Consultado en marzo de 2016, en: <http://cddis.gsfc.nasa.gov/>
- CONANP, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2009. Programa de manejo. Reserva de la Biósfera Isla Guadalupe. Consultado en Marzo de 2016, de: <http://www.conanp.gob.mx/anp/consulta/Borrador%20PM%20RBIG%20agosto%2009.pdf>
- Cox, A., 1972. *Plate Tectonics and Geomagnetic Reversals*. Freeman, United State of America
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D., & Stein, S. 1990. Current plate motions. *Geophysical Journal International*, 101(2), 425-478.
- DeMets, C., Gordon, R. G., & Argus, D. F. 2009. Geologically current plate motions. *Geophysical Journal International*, 181(1), 1-80.
- DeMets, C., Márquez-Azúa, B., & Cabral-Cano, E. 2014. 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(3), 1878-1899. doi: 10.1093/gji/ggu341
- Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Cheng, M. K., & Miyazaki, S. 2002. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4), ETG 9-1-ETG 9-16. doi: 10.1029/2001JB000573

- Dow, J. M., Neilan, R. E., & Rizos, C. 2009. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*, 83(3), 191-198. doi: 10.1007/s00190-008-0300-3
- El-Rabbany, A., 2002. *Introduction to GPS: the global positioning system*. Artech House, Norwood, MA
- Gárate, J., & Dávila, J. M. 2011. La geodesia espacial, una herramienta de Futuro. *Revista Española de Física*, 17(6).
- 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(16).
- Herring, T., King, R., Floyd, M., & McClusky, S. 2015a. GAMIT reference manual. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, MIT. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. Consultado el 15 de enero de 2016, de: http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/GAMIT_Ref.pdf
- Herring, T., King, R., Floyd, M., & McClusky, S. 2015b. GLOBK reference manual. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, MIT. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. Consultado el 15 de enero de 2016, de: http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/GLOBK_Ref.pdf
- Herring, T., King, R., Floyd, M., & McClusky, S. 2015c. Introduction to Gamit/Globk. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, MIT. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. Consultado el 15 de enero de 2016 de: http://www-gpsg.mit.edu/~simon/gtgk/Intro_GG.pdf
- Jun-ping, C., & Jie-xian, W. 2007. Models of Solar Radiation Pressure in the Orbit Determination of GPS Satellites. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 31(1), 66-75.
- Kreemer, C., Blewitt, G., & Klein, E. C. 2014. A geodetic plate motion and global strain rate model. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(10), 3849-3889.
- Kreemer, C., Lavallée, D. A., Blewitt, G., & Holt, W. E. 2006. On the stability of a geodetic no-net-rotation frame and its implication for the International Terrestrial Reference Frame. *Geophysical research letters*, 33(17).
- Larson, K. M., Webb, F. H., & Agnew, D. C. 1991. Application of the Global Positioning System to crustal deformation measurement: 2. The influence of errors in orbit determination networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B10), 16567-16584.
- Lawrence, L., 2000. *GPS Fácil: Uso del Sistema de Posicionamiento Global*. Paidotribo, Barcelona
- Lechner, W., & Baumann, S. 2000. Global navigation satellite systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25(1), 67-85.
- Mahmoud, S. 2003. Seismicity and GPS-derived crustal deformation in Egypt. *Journal of Geodynamics*, 35(3), 333-352.
- Mendes, V., & Langley, R. 1994. *A comprehensive analysis of mapping functions used in modeling tropospheric propagation delay in space geodetic data*. En: KIS94, International Symposium on

Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, Banff, Canada, August 30 - September 2. Citeseer, 87-98

- Minster, J. B., Jordan, T. H., Molnar, P., & Haines, E. 1974. Numerical Modelling of Instantaneous Plate Tectonics. *Geophysical Journal International*, 36(3), 541-576. doi: 10.1111/j.1365-246X.1974.tb00613.x
- Morgan, W. J. 1968. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *Journal of Geophysical Research*, 73(6), 1959-1982.
- Nocquet, J.-M., Mothes, P., & Alvarado, A. 2009. Geodesia, geodinamica y ciclo sismico en Ecuador. *Geologia y Geofisica Marina y Terrestre del Ecuador*, 83-95.
- Ortega, J. A. G. (2014). *Análisis sismo-geodésico del sismo El Mayor-Cucapah (Mw=7.2) del 4 de abril de 2010, Baja California*. (Tesis de Doctorado en Ciencias), Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.
- Pérez, J. L. (2013). *Consideraciones sismotectónicas para localización de estaciones GNSS, con propósitos geodinamicos en embalses*. (Licenciatura Tesis de Licenciatura), Universidad del Valle, Santiago de Cali.
- Plag, H.-P., & Pearlman, M., 2009. *Global geodetic observing system: Meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020*. Springer USA
- Pozo-Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M., García, L., Guinea, D., & Sandoval, F. 2000. Sistema de posicionamiento global (gps): Descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro. ETS Ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Málaga. Consultado el 9 de febrero de 2016, de: http://www.oocities.org/es/foro_gps/infografia/gps5.pdf
- Prawirodirdjo, L., & Bock, Y. 2004. Instantaneous global plate motion model from 12 years of continuous GPS observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 109(B8).
- Robaudo, S., & Harrison, C. G. A., 1993. Plate Tectonics from SLR and VLBI Global Data. En Smith, D.E. & Turcotte, D.L. Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal Dynamics. American Geophysical Union. (pp. 51-71).
- Rummel, R. 2010. The interdisciplinary role of space geodesy. *Journal of Geodynamics*, 49(3), 112-115.
- Sella, G. F., Dixon, T. H., & Mao, A. 2002. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4).
- SOPAC. Scripps Orbital and Permanent Array Center. Consultado en marzo de 2016, en: sopac.ucsd.edu
- Wanninger, L., & Jahn, C.-H. 1993. *Effects of severe ionospheric conditions on GPS data processing*. En: Permanent Satellite Tracking Networks for Geodesy and Geodynamics, Vienna, Austria, 11-24 August 1991. Springer Verlag, 141-150
- Wells, D., Beck, N., Kleusberg, A., Krakiwsky, E. J., Lachapelle, G., Langley, R. B., Schwarz, K.-p., Tranquilla, J. M., Vanicek, P., Delikaraoglou, D., & Nakibogklu, M., 1987. *Guide to GPS positioning*. Canadian GPS Associates, Fredericton, New Brunswick, Canadá
- UNAVCO. Consultado en abril de 2016, en: www.unavco.org.

Xu, G., 2007. Perturbed Orbit and its Determination. En Xu, G. (2nd ed.). GPS: Theory, Algorithms and Applications. Springer. Berlin. (pp. 243-304).