



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA  
GEODINÁMICA Y GEOFÍSICA MARINA

**LA EXTENSIÓN MARINA DEL LÍMITE ENTRE LAS PLACAS DE CARIBE Y  
NORTE AMÉRICA EN EL MARGEN OCCIDENTAL DE MÉXICO**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

**DIEGO ARMANDO AGUILAR ANAYA**

TUTOR

**DR. CARLOS A. MORTERA GUTIÉRREZ**  
(INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM)

COMITÉ TUTOR

**DR. WILLIAM L. BANDY** (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM)  
**DR. GERARDO SUÁREZ REYNOSO** (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM)  
**DR. MARCO GUZMÁN SPEZIALE** (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM)  
**DRA. MARINA MANEA** (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, ABRIL 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# *Agradecimientos*

A mis padres por su apoyo en todos estos años, y por su confianza en que podré lograr lo que me propongo.

Agradezco enormemente al Dr Carlos Mortera y al Dr. Bandy por darme la oportunidad de trabajar con ellos, enseñarme bastante sobre geofísica marina e investigación científica y, por la gran amistad que hemos construido.

Un especial agradecimiento al Ingeniero Francisco Ponce Núñez, al Ingeniero Miguel Ángel García Palacios, al Maestro en Ciencias Daniel Armando Pérez Calderon, a la Maestra en Ciencias Sandra Valle Hernández, y a la Licenciada Graciela Solache Ramírez, por su gran apoyo técnico a lo largo de mi estancia por el posgrado.

Al Instituto de Geofísica y al instituto de Ciencias del Mar, por la oportunidad de ser parte de su comunidad y apoyarme de distintas maneras en mi formación profesional.

Al Laboratorio Universitario de Cartografía Océanica (LUCO) por el espacio y equipo otorgado durante la culminación de este proyecto de maestría, así como al equipo de trabajo del mismo: Ely, Carmen, Víctor, Ara, Pablito, Omar, Emilio; por toda su ayuda y por compartir grandes convivencias en las campañas oceanográficas.

Se agradece al proyecto CONACYT-SENER 201441 CICESE, con registro UNAM 40187-3-XII-14, por la beca de proyecto de investigación otorgada para poder concluir el presente trabajo.

Se agradece al proyecto PAPIIT con número IN115613 por el apoyo económico otorgado y, permitir la culminación de mi tesis de investigación.

# ÍNDICE

<i>Resumen</i> .....	3
<i>Abstract</i> .....	4
<b>CAPÍTULO I – Introducción</b> .....	5
• <i>1.1 – Antecedentes</i> .....	6
• <i>1.2 – Marco Geológico</i> .....	10
• <i>1.3 – Sismicidad</i> .....	15
• <i>1.4 – Arco Volcánico Chiapaneco</i> .....	17
<b>CAPÍTULO II – Metodología</b> .....	18
• <i>2.1 - Mecanismos focales</i> .....	18
• <i>2.2 - Datos Geofísicos Marinos</i> .....	27
♦ <i>2.2.1 – Batimetría</i> .....	27
♦ <i>2.2.2 - Reflexión Sísmica</i> .....	29
<b>CAPÍTULO III - Análisis de Resultados</b> .....	30
• <i>3.1 - Mecanismos Focales</i> .....	30
• <i>3.2 – Batimetría</i> .....	38
• <i>3.3 - Reflexión Sísmica</i> .....	41
<b>CAPÍTULO IV – Discusión</b> .....	44
<b>CAPÍTULO V – Conclusiones</b> .....	48
<i>Bibliografía</i> .....	49
<i>Anexos</i> .....	63

## *Resumen*

En el sur de México, el límite tectónico entre las placas del Caribe y Norte América es complejo cercano a las costas del Estado de Chiapas y de la República de Guatemala. Los bloques corticales de esta región son continuamente afectados por la intensa actividad sísmica originada por el movimiento de estas placas a lo largo de este límite. Sin embargo, aún en la actualidad existe el dilema hacia dónde y cómo se extiende este límite en la parte marina del margen continental de Chiapas y Guatemala. Este trabajo examina tres escenarios posibles de la extensión del límite tectónico entre estas placas en el margen de Chiapas, y con un enfoque particular del escenario en donde se ha propuesto que el límite se extiende hacia el Golfo de Tehuantepec con orientaciones sur o sur-occidental. Para estos escenarios se revisaron: (1) los vectores de deslizamientos de las soluciones de mecanismos focales del catálogo sísmico del Global CMT, como también de las soluciones dadas por el Servicio Sismológico Nacional de México (SSN), (2) la morfología submarina inferida de los escasos datos de batimetría existente, y (3) las estructuras geológicas de la región que han sido documentadas en revistas científicas. Concluyendo que el escenario preferente es el que este límite probablemente se extienda hacia el sur, submarinamente, como una prolongación de la falla Motagua, hacia la trinchera de Guatemala, donde se ha mapeado un cañón submarino en la misma dirección. Alternativamente, otro escenario sería la posibilidad de que la falla Motagua se prolongue en dirección E-NW, a lo largo de la costa de Chiapas, uniéndose a la zona de cizalla Tonalá. En el caso de la hipótesis del escenario que la extensión submarina de este límite se propaga hacia el punto de intersección entre la Trinchera Mesoamericana y la Dorsal de Tehuantepec, no se ha podido validar o invalidar por los escasos datos geofísicos en el sector marino del sur de México.

## ***Abstract***

At the southern Mexican territory, the boundary between Caribbean and North America plates is complex near the coasts of Chiapas state and Republic of Guatemala. The crustal blocks of this region are continually affected by the intense seismic activity, originated by the movement of these plates along this limit. However until today, it is not clear where this limit extends into the marine sector of Chiapas and Guatemala continental margin. This study review three possible settings of the extension of this plate boundary at the Chiapas margin, and particularly to the setting where it has been proposed that the limit extends into the Tehuantepec Gulf to either south or south-west direction. For these settings were reviewed: (1) slip rakes obtained from focal mechanism solutions of Global CMT seismic catalog and solutions given by the Mexican National Seismic Service (*Servicio Sismológico Nacional de México*, SSN), (2) the inferred submarine morphology given by a sparse bathymetry value sets, and (3) the regional geologic structures documented on scientific journals. From this review, the most likely setting is where the limit probably extends underwater to the south, as a extension of Motagua fault, that reaches the Guatemala trench where a submarine canyon have been mapped in the same trend. Nevertheless, another setting could be considered where the Motagua fault extends eastward, trending NW direction along Chiapas coast, connecting with the Tonalá shear zone. Although in the review of these possible settings, the hypothesis that the submarine extension of this tectonic boundary spreads to the point of intersection between Mesoamerica trench and Tehuantepec Ridge can be neither validate nor invalidate due to the sparse geophysical data at this marine sector of southern Mexico.

# *CAPÍTULO I – INTRODUCCIÓN*

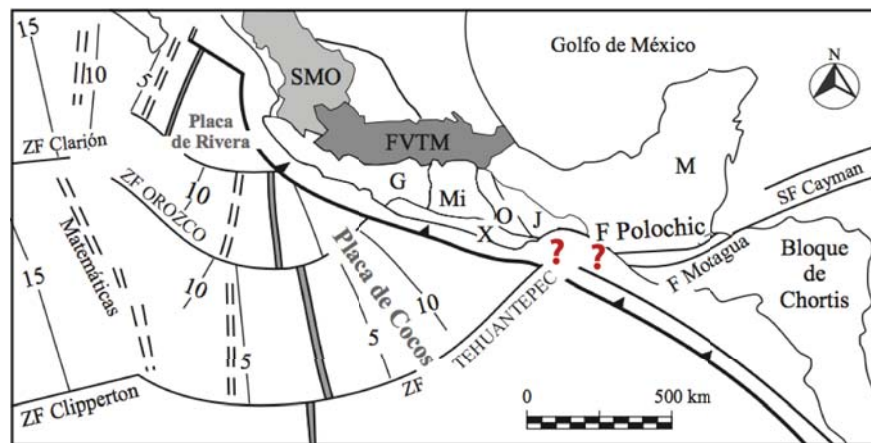
El estudio de las zonas de subducción así como de los límites entre placas tectónicas es de gran importancia para la evaluación del riesgo sísmico que está asociado a una particular región. El límite de placas entre Caribe (CA) y Norte América (NA) ha presentado grandes dificultades para identificar su continuación occidental que pudiese estar ligado a un punto triple entre los límites de las placas del Caribe, Cocos (CO) y NA; lo que convierte en zona de alto riesgo sísmico al sur de México. Distintos autores [e.g., Burkart 1983; Gúzman-Speziale, 2001; Authemayou *et al.*, 2011], han propuesto modelos que pudiesen explicar la evolución tectónica de la zona, haciendo discusiones sobre los límites de las placas involucradas, así como de los terrenos y litologías que se encuentran ahí. Sin embargo, aún no se ha podido explicar con claridad la geometría de estos límites en la region marina. La región sur de México está conformada de distintas etapas geológicas, por lo que el implementar un modelo general que se apegue a todas las observaciones ha sido un gran reto debido a la carencia de mayor información en el sector marino de la extensión del límite CA-NA hacia la Trinchera Mesoamericana.

La presente tesis aborda el problema, haciendo una revision bibliográfica de la geología estructural, la tectónica, geomorfología, sismicidad, etc., de la region, recopilando los modelos geológicos propuestos por diferente autores. Para la metodología, se utilizan los datos simológicos, en particular la naturaleza de los mecanismos focales a través de sus vectores de desplazamiento, su relación con datos de GPS y lo reportado geológicamente en campo. A su vez, se analizan los datos marinos disponibles, batimetría y reflexión sísmica, con el fin de encontrar relaciones estructurales y geomorfológicas. Esta información se asocia con los modelos tectónicos propuestos por otros autores [e.g., Lyon-Caen *et al.*, 2006; Andreani *et al.*, 2008; Franco *et al.*, 2009; Witt *et al.*, 2012], para abrir la discusión geológica de la región de estudio. Para el capítulo de análisis de resultados, se integra la información y se hace una descripción de lo observado en los mapas y figuras realizadas. Asociando los resultados con los modelos propuestos o incluso, aportando ideas propias. Finalmente para la discusión y conclusiones, se regresa al planteamiento del problema y con base en los datos que hay publicados se hace una correlación de la información para afirmar o descartar algunas propuesta de otros autores, mientras que para aportar algo propiamente original, es necesario obtener datos marinos que permitan realizar un mejor análisis.

## 1.1 - ANTECEDENTES

El problema al que se enfoca este trabajo es el de la extensión del límite CA-NA y su relación con el punto triple CA-CO-NA. Para poder entenderlo, primero revisaremos los trabajos previos y la evolución de estos estudios hasta la actualidad. El primer trabajo integral geológico que consideró la tectónica de la región de América Central y el Caribe fue realizado por Schuchert [1935]. Posteriormente, otras investigaciones geológicas en el área han sido enfocadas hacia la evolución tectónica del Caribe en el Mesozoico y Cenozoico [e.g., Pindell and Barret, 1990; Heubeck and Mann, 1991; Beccaluva *et al.*, 1995; Meshede and Frisch, 1998; Rogers, 2003]. Iturralde-Vinent and Lidiak [2006], compila un completo volumen geológico dedicado a las implicaciones tectónicas de esta región.

México es un país tectónicamente activo por lo que existen diferentes condiciones geológicas que siguen en discusión y controversia, como la extensión del límite Caribe (CA)-Norte-América (NA) [e.g., Burkart 1983; Authemayou *et al.*, 2011], la zona difusa de punto triple Caribe-Cocos-Norte-América, la relación de estos procesos con el bloque Chortis, entre otros; ya que dichos problemas se derivan de los límites entre ellos, y están por lo tanto, directamente relacionados a los procesos tectónicos que han ocurrido en esta parte del planeta.

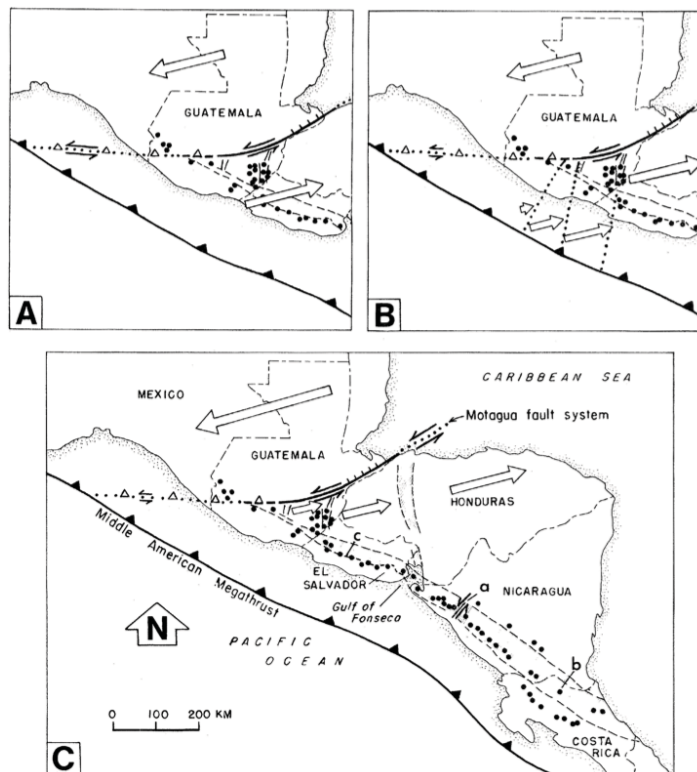


**Figura 1.-** Principales rasgos tectónicos del entorno oceánico actual del sur de México. M, terreno Maya. ZF, zona de fractura. F, Falla. Los signos de interrogación en rojo, hacen referencia a la pregunta de hacia dónde se propaga el límite CA-NA. Las edades de las placas están en Ma. Modificada de [Morán Zenteno *et al.*, 2005].



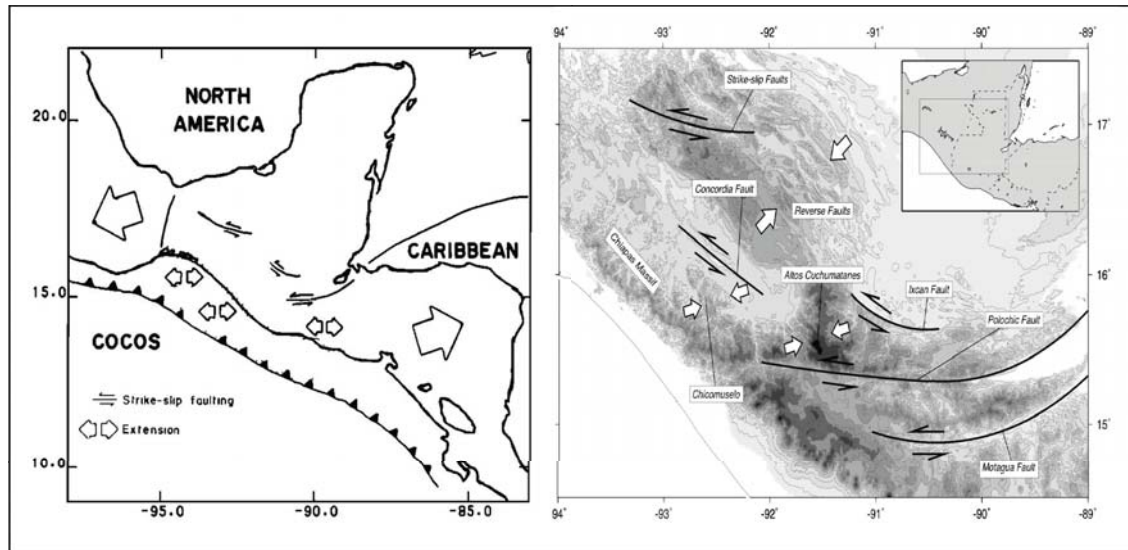
El proceso tectónico que domina en el sur de México es la subducción de la placa oceánica de Cocos bajo la placa continental de Norte-América y la del Caribe. Este punto triple difuso e inestable del tipo trinchera-trinchera-transforme es el responsable de patrones como fallamiento, sismicidad y actividad volcánica, cubriendo un área que se extiende desde el Istmo de Tehuantepec en México hasta la parte central de Honduras [Guzmán-Speziale, 1989; Ratschbacher *et al.*, 2009; Authemayou *et al.*, 2011].

Los primeros trabajos referentes al límite CA-NA que se realizaron, proponen la hipótesis de una extensión marina del sistema Polochic-Motagua hacia la trinchera Mesoamericana en el Golfo de Tehuantepec, en el punto en que la fractura de Tehuantepec intercepta a la trinchera (Figura 2), definiendo ahí el punto triple CA-CO-NA [e.g. De Cserna, 1958; Muehlberger and Ritchie, 1975; Plakfer, 1976; Anderson and Schmidt, 1983; Burkart and Self, 1985; Pindell *et al.*, 1988; White and Harlow, 1993; Schaaf *et al.*, 1995].



**Figura 2.-** Prolongación del sistema de fallas Polochic-Motagua hacia la trinchera Mesoamericana. [Plakfer, 1976].

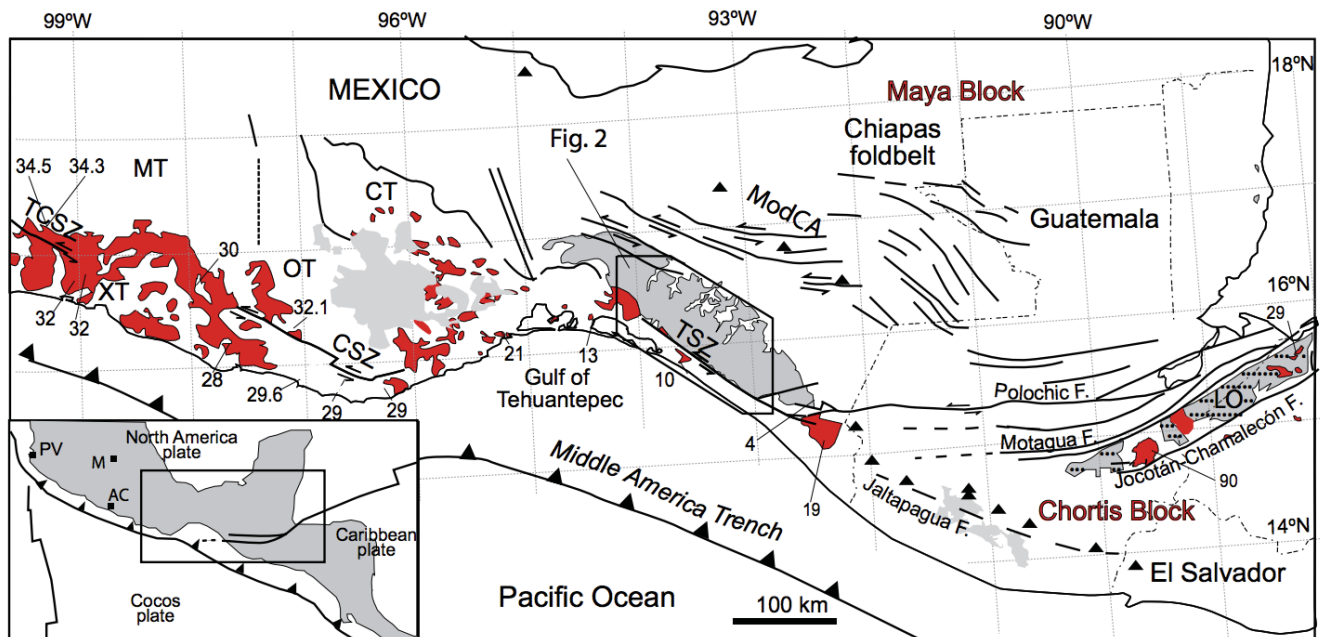
Guzmán-Speziale [1989, 1998] propone una zona de cizalla y extiende la parte activa del límite de placas tanto al norte como hacia el Cinturón Plegado de Fallas Inversas de Chiapas, proponiendo desplazamientos laterales izquierdos de cerca de 70 kilómetros acumulados en 9 grandes fallas (Figura 3). Lapierre *et al.* [2000], propone la extensión de la falla Polochic a lo largo del margen meridional del batolito de Chiapas, éste tiene una extensión de 250 km de largo y 70 km de ancho aproximadamente [Hernandez-Santana *et al.*, 1995], pero no indicando hacia donde pudiese continuar.



**Figura 3.-** Izquierda, El sistema de fallas extiende su deformación hacia el Occidente de Guatemala y SE de México [Guzman-Speziale And Meneses-Rocha, 2000; Guzman-Speziale *et al.*, 1989]. Derecha, [Guzman-Speziale, 2010].

La falla Polochic se ensancha en dos ramas principales: a) la falla Cuilco-Motozintla que cruza la frontera mexicana cerca de Amatenango de la Frontera, a partir de ahí a unos 20 km hasta la cabecera del Río Motozintla donde parece terminar y b) un lineamiento estructural complejo que se aparta justo al oeste de Huehuetenango en Guatemala, siguiendo el río Selegua y que continúa a través de la frontera con México a lo largo de una falla de arco, que a su vez se une a Mapastepec con una zona de cizalla importante definiendo el margen sur del batolito Chiapas [Carfantán, 1976; Pindell *et al.*, 2005; Wawrzyniec *et al.*, 2005; Ortega *et al.*, 2006; Ratschbacher *et al.*, 2009; Authemayou *et al.*, 2011; Franco *et al.*, 2012]. La Figura 4 muestra ese conjunto de fallas laterales nombrado como Falla Tonalá-Motozintla [Carfantán, 1976; Meneses-Rocha, 2001], y formalmente como zona de cizalla Tonalá [e.g. Molina-Garza *et al.*, 2015] marcada por milonitas verticales datadas con Ar-Ar y U-Pb en  $8.0 \pm 0.1$  Ma [Wawrzyniec *et al.*, 2005] y por plutones cortados profundamente [Ratschbacher *et al.*, 2009], con movimiento lateral izquierdo [Tovar-Cortés *et al.*, 2005; Molina-Garza *et al.*, 2015], aunque tensores

de momento sísmico para sismos a lo largo de la zona de cizalla presentan movimiento lateral izquierdo [Guzmán-Speziale, 2014]. La falla Tonalá se extiende a lo largo de la zona de subducción en la misma distancia a la zona de subducción de la placa de Cocos, tal como lo hace la falla Jalpatagua [Guzman-Speziale and Meneses-Rocha, 2000; Andreani *et al.*, 2008; C. Witt *et al.*, 2012] y aunque ligeramente oblicua al sistema Polochic. La falla Tonalá debió haber actuado como la frontera Norte-América-Caribe en el pasado [Wawrzyniec *et al.*, 2005], permitiendo el paso del bloque Chortís desde México hasta la placa del Caribe durante el Cenozoico [Pindell *et al.*, 2005; Ratschbacher *et al.*, 2009]. Este sistema de fallas ha tenido actividad probablemente desde el Mioceno y quizás durante el Oligoceno [Carfantan, 1976]. Los estudios paleomagnéticos están de acuerdo con este punto de vista [Blanchet, 1979]. Según Ortuño [1985], el desplazamiento lateral izquierdo interplacas CA-NA comenzó en el mesozoico y su actividad principal en el Oligoceno-Mioceno, mientras que la interacción CA-CO-NA a partir del cenozoico superior. La placa del Caribe se ha mantenido prácticamente estática desde el cron 18 (38.4 Ma) [Müller *et al.*, 1999]. Estudios geocronológicos y termocronológicos de milonitas de las zonas de cizalla Tonalá y Polochic, y de plutones que han intrusionado a estas fallas, sugieren una simultánea actividad entre 15 y ~5 Ma [Wawrzyniec *et al.*, 2005; Ratschbacher *et al.*, 2009].



**Figura 4.-** Principales características tectónicas asociadas a la zona de cizalla Tonalá. Los polígonos rojos muestran la distribución de rocas plutónicas y su edad de emplazamiento. TSZ, Tonalá Shear Zone; CSZ, Chacapala Shear Zone; TCSZ, Tierra Colorada Shear Zone; ModCA, Modern Chiapanecan Arc; LO, Las Ovejas Complex. [Resumido de Molina-Garza *et al.*, 2015].

## ***1.2 – MARCO GEOLÓGICO***

Como se mencionó anteriormente, el proceso tectónico que domina en el sureste de México es la subducción de la placa oceánica de Cocos bajo la placa continental de Norte-América y la del Caribe, y esta última es una unión de fragmentos oceánicos y continentales [Authemayou *et al.*, 2011]. Diversos trabajos [e.g., Muehlberger and Ritchie, 1975; Plakfer, 1976; Burkart, 1978; Sanchez-Barreda, 1981; Burkart, 1983; Guzmán-Speziale, 1989] agregan que el punto triple trinchera-trinchera-transforme (TR-TR-TF) no es un punto triple en la clásica perspectiva de McKenzie y Morgan [1969], por lo que se trata más bien de una zona de deformación; que incluye en la parte norte de Polochic-Motagua una provincia tectónica de fallas laterales, (Guzmán-Speziale *et al.*, 1989) y una provincia tectónica de fallas inversas en el sureste de México [Guzmán-Speziale and Meneses-Rocha, 2000], y al sur del sistema, una amplia zona de extensión E-W, caracterizada por series de grabens con orientación N-S [Guzmán-Speziale, 2001]. Otros autores sugieren que dicha extensión es parte de la deformación producida por el límite tectónico entre la placa del Caribe y la placa Norte Americana. [e.g., Plakfer, 1976; Burkart, 1983; Burkart and Self, 1985; Guzmán-Speziale *et al.*, 1989; Gordon and Muehlberger, 1994]

El límite tectónico entre las placas de Caribe y Norte América está definido por el sistema de fallas Polochic-Motagua, el cual tiene un movimiento lateral izquierdo [e.g., Molnar and Sykes, 1969; Malfait and Dinkelman, 1972]. Este sistema de fallas tiene aproximadamente 400 km de extensión, y su extensión en alta mar continua por las fallas del Cisne (*Swan*) y Oriente [Burkart, 1983; Guzmán-Speziale, 2001; DeMets, 2001; Authemayou *et al.*, 2011; Franco *et al.*, 2012] desde el océano Pacífico en la costa de Chiapas hasta el este del mar caribe, ligado a la Fosa del Caiman [Rogers and Mann, 2007; Pindell *et al.*, 2005]. De sur a norte, el sistema se compone de tres grandes fallas laterales subparalelas segmentadas, llamadas Jocotán-Chamelecón, San Agustín-Motagua-Cabañas, y Cuilco-Chixoy-Polochic, comúnmente como Jocotán, Motagua, y Polochic por simplicidad [Lyon-Caen *et al.*, 2006]. La separación entre Motagua y Polochic es de casi 50 km [Franco *et al.*, 2009; Suski *et al.*, 2010]. La falla Jocotán no muestra actividad desde el Neógeno y su traza está segmentada por fallas normales con rumbo casi N-S [Mann *et al.*, 1990; Plakfer, 1976; Burkart, 1978].

El límite norte de la placa del Caribe está conformado por el lineamiento de la Fosa del Cayman y por el sistema de fallas Polochic-Motagua. La forma de este límite norte, así como la edad de los

sedimentos y el patrón de las anomalías magnéticas de la Fosa del Caimán, han permitido estimar un desplazamiento de aproximadamente 1100 km de la placa de NA hacia el oeste con respecto a la placa del Caribe desde el Eoceno medio [Rosencrantz and Sclater, 1986]. Sin embargo, la correlación de las rocas desplazadas, pliegues y ríos, al norte y sur del sistema Polochic-Motagua sugiere un movimiento sinistral de  $132 \pm 5$  km a lo largo de la falla Polochic durante el Neógeno [e.g. Dengo, 1982; Burkart, 1983; Burkart *et al.*, 1987; Donnelly *et al.*, 1990; Giunta *et al.*, 2002].

Hoy, la principal deformación está dada a lo largo de la falla Motagua, la cual tiene una gran sismicidad a lo largo de todo el sistema Polochic-Motagua [Schwartz *et al.*, 1979; Guzmán-Speziale *et al.*, 1989; Franco *et al.*, 2009 y 2012]. Sin embargo, datos sismológicos y los esfuerzos extensivos en pozos, muestran que la componente horizontal de la deformación en la frontera de placas tienen lugar sobre la Provincia de Fallas Laterales de Chiapas, en la falla Polochic, la falla Ixcán y la Provincia de Fallas Inversas. [Guzmán-Speziale *et al.*, 1989; Guzmán-Speziale and Meneses-Rocha, 2000; Witt *et al.*, 2012].

El movimiento relativo respecto a Norte América a lo largo del sistema Polochic-Motagua es de alrededor de 18-22 mm/año al este de Guatemala, de 14-20 mm/año en la parte central de Guatemala y despreciable en la frontera México-Guatemala [Lyon-Caen *et al.*, 2006; Franco *et al.*, 2012]. En esta región, converge a su vez la placa oceánica de Cocos con las placas continentales de Norte América y Caribe, con una tasa de 7–8 cm/año y un azimut entre 20–22°, con respecto a la Trinchera Mesoamericana [e.g., Minster and Jordan, 1978; DeMets *et al.*, 1990; DeMets, 2001; Morgan and Phipps Morgan, 2007].

Mediciones recientes de vectores de velocidad mediante GPS paralelos a la Trinchera Mesoamericana localizados en áreas a lo largo del antearco de América Central, han sido del orden de  $\sim 15$  mm/año [Lyon-Caen *et al.*, 2006; Franco *et al.*, 2012], semejante a lo que se ha inferido en Nicaragua y El Salvador [Turner *et al.*, 2007; Correa-Mora *et al.*, 2009; Alvarado *et al.*, 2011], y en Costa Rica [Norabuena *et al.*, 2004]. Mecanismos focales de eventos sísmicos someros y datos geodésicos en el arco volcánico activo, indican un desplazamiento dextral del antearco [La Femina *et al.*, 2009]. La deformación inferida de vectores GPS y mecanismos focales junto con la cinemática de placas sugiere que el arco volcánico de América Central se ha mantenido por encima de una falla dextral subvertical intra-arco con orientación NW-SE, conocida como Falla del Arco Volcánico [V.H. Garduño-Monroy *et*

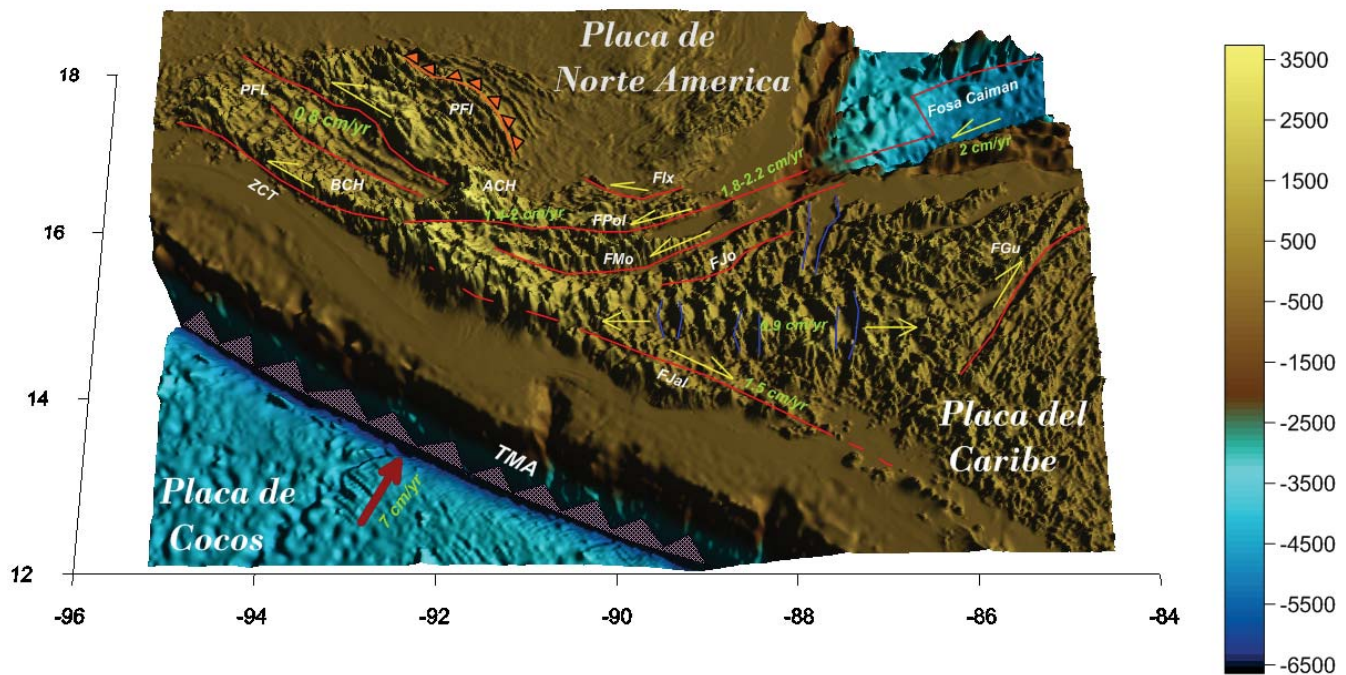
*al.*, 2015], la cual ha acomodado su desplazamiento a través de la falla Jalpatagua en Guatemala, la San Vicente en El Salvador, afectando depósitos volcánicos del Cuaternario [Burkart and Self 1985; Wunderman and Rose 1984; Duffield et al. 1992; Franco et al. 2012; Canora et al. 2012].

En el SW de Guatemala, el Arco Volcánico es afectado por la falla transformante Jalpatagua, la cual es paralela a la Trinchera con desplazamiento de tipo dextral [Wunderman and Rose, 1984]. Authemayou *et al.* [2011], propone que la falla Jalpatagua se extiende hasta donde la falla Motagua parece terminar, pero un levantamiento justo en esta zona de unión (poblado de Chichicastenango) no permite ligar estas fallas con la zona de cizalla Tonalá. Reynolds [1987] sugiere que el rumbo de la falla Jalpatagua ha sido deflectado durante un proceso de colapso, formando fracturas de extensión subsidentes, por lo que la falla del Arco Volcánico podría delinear la frontera de una independiente cuña de antearco (*forearc sliver*) parcialmente adjunta a la placa Norte Americana y con un movimiento hacia el noroeste respecto a la placa del Caribe [V.H. Garduño-Monroy *et al.*, 2015], como originalmente lo propuso DeMets [2001], quien llamó a esta cuña, la cuña de antearco de América Central.

Por otra parte, al sur del sistema de fallas Polochic-Motagua, una amplia zona de extensión E-W es expresada a lo largo de series de grabens con tendencias N-S. Distintos autores [e.g., Plakfer, 1976; Burkart, 1983; Burkart and Self, 1985; Guzmán-Speziale *et al.*, 1989; Gordon and Muehlberger, 1994], sugieren que esas estructuras, y su régimen de esfuerzos asociado, son parte de la deformación del límite Caribe-Norte América. Existen distintas interpretaciones de cómo fueron creados los grabens, pero se sabe que son activos y Guzmán-Speziale [2001] ha calculado una tasa de abertura de 8 mm/año.

Otra falla importante dentro de este gran sistema, es la falla transformante Guayapé, la cual se caracteriza por ser cóncava arqueada hacia el noroeste, y se extiende a través de América Central en Honduras [Guzmán-Speziale *et al.*, 2001], la cual no tiene un origen claro, sin embargo; está relacionada con la formación de la frontera CA-NA y al desplazamiento del bloque Chortis [R. C. Finch and A. W. Ritchie, 1991]. Gordon and Muehlberger [1994], sugieren un movimiento lateral derecho, basado en mapeo regional.



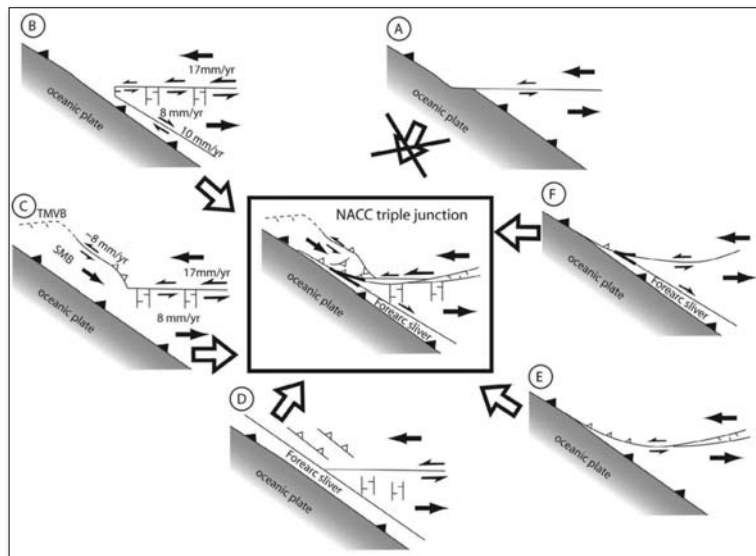


**Figura 5.-** Mapa topográfico a manera de resumen que muestra las principales estructuras geológicas de la zona de estudio. PFL=Provincia de Fallas Laterales; ZCT=Zona de Cizalla Tonalá; FPol=Falla Polochic; FMo=Falla Motagua, FJo=Falla Jocotán, FJal=Falla Jalpatagua, FGu=Falla Guayapé; FIx=Falla Ixcán; PFI=Provincia de Fallas Inversas; TMA=Trinchera Mesoamericana; ACH=Altos Cuchumatanes; BCH=Batolito de Chiapas. En rojo: fallas principales; azul: grabens principales; verde: velocidad de desplazamiento de fallas y velocidad de convergencia de la placa de Cocos (flecha rojo oscuro) respecto de la placa de NA; amarillo: dirección de desplazamiento. (Ver referencias en el texto).

Existen varios modelos geológicos que tratan de explicar la situación actual de la frontera Caribe-Norte América y el punto triple CA-CO-NA mediante observaciones geofísicas y geológicas. Sin embargo, aún permanece la controversia y no hay resultados que se apeguen a todos los datos. La ubicación del punto triple es difícil de posicionar dentro de una región de compleja sismicidad y geología que forma parte del noroeste de Guatemala, el sureste de México, y una gran parte del bloque Chortís [e.g., Plakfer, 1976; Burkart, 1983; Gordon and Muehlberger, 1994; Guzmán-Speziale and Meneses-Rocha, 2000; Guzmán-Speziale, 2001; Lyon-Caen *et al.*, 2006; Andreani *et al.*, 2008; Phipps Morgan *et al.*, 2008; Rodríguez *et al.*, 2009].

Uno de los modelos más recientes para explicar el estado actual del punto triple CA-CO-NA es el propuesto por Authemayou *et al.* [2011], (modelo F en la Figura 6), que por un lado (al noroeste) la frontera es de tipo transformante sinistral y por el otro lado (al sureste) es una falla transformante dextral, delimitando la cuña de antearco (*fore-arc sliver*) a lo largo del margen continental. Esta sutura

migra progresivamente hacia el sureste como si fuese un cierre (*zipper*), lo que causaría que el punto triple migre a su vez hacia el sureste; que conforma la placa del Caribe. Por otra parte, para la frontera CA-NA se han realizado diferentes modelos que tratan de explicar la continuación de esta frontera en el límite México-Guatemala, que es donde se pierde la continuidad. Para este trabajo se hace un resumen de lo que se ha propuesto para discutirlo posteriormente.



**Figura 6.-** Diferentes modelos cinemáticos que explican la migración del punto triple de placas CA-CO-NA. Modelo A corresponde a la geometría para una triple unión de placas estable si la placa oceánica se debe romper en el punto triple. Modelo B es de Plafker [1976]; Gordon and Muehlberger [1994], Guzmán-Speziale [2001], Rogers et al. [2002], y Lyon-Caen et al. [2006]. Modelo C es sugerido por Guzmán-Speziale and Meneses-Rocha [2000] and Andreani et al. [2008]. SMB, Southern Mexico block, TMVB, Trans-Mexican volcanic belt. Modelo D fue propuesto por Phipps Morgan et al. [2008]. Modelo E es discutido por Burkart and Self [1985], DeMets et al. [2000], Rogers and Mann [2007], and Rodriguez et al. [2009]. Modelo F ilustra el proceso de “cierre”. Las partes gruesas negras de las fallas dextrales y sinestrales muestran la fusión de esas fallas. Tomado de Authemayou et al., [2011].

Uno de estos modelos hace referencia a la extensión del límite hacia la trinchera Mesoamericana, llegando hasta el Golfo de Tehuantepec [De Cserna, 1958; Muehlberger and Ritchie, 1975; Anderson and Schmidt, 1983; Burkart and Self, 1985; Pindell *et al.*, 1988; White and Harlow, 1993; Schaaf *et al.*, 1995], pero el trabajo de Sanchez-Barreda [1981], no muestra evidencia de esta unión. Keppie and Morán-Zenteno [2005] infirieron que el límite podría más bien deflectarse hacia el sur e intersectar a la Trinchera Mesoamericana pero frente a la costa de Guatemala, por lo que Pindell and Kennan [2009] propusieron la existencia de un bloque de antearco delimitado por el batolito de Chiapas y la Trinchera Mesoamericana, al que llamaron “Terreno Tehuantepec”, el cual podría ser un remanente del arco

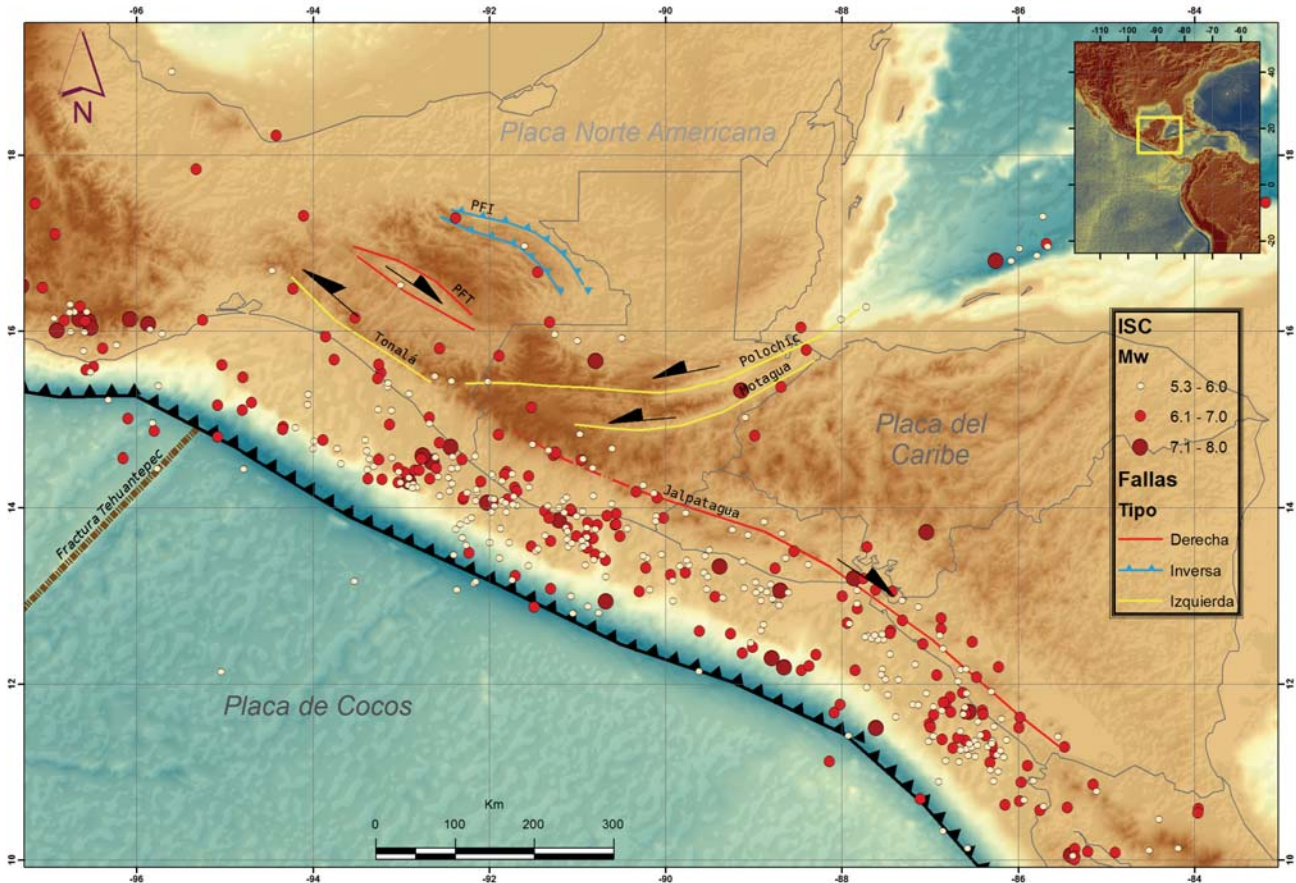


Caribeño que se suturó con Norte América al final del Cretácico. Otro posible modelo ha considerado que la extensión del límite CA-NA es hacia el sur del margen del batolito de Chiapas, uniendo la falla Polochic con la zona de cizalla Tonalá, que es considerada una zona de mayor transferencia de deformación [Carfantan 1976; Pindell *et al.*, 2005; Wawrzyniec *et al.*, 2005; Ortega *et al.*, 2006; Ratschbacher *et al.*, 2009; Authemayou *et al.*, 2011; Franco *et al.*, 2012]. Por otra parte, en sumario estos autores [Guzmán-Speziale and Meneses-Rocha, 2000; Lyon-Caen *et al.*, 2006; Andreani *et al.*, 2008; Franco *et al.*, 2009; Witt *et al.*, 2012] sugieren que el régimen transformante entre las placas del Caribe y Norte Americana está localizado actualmente dentro de la Sierra Madre de Chiapas. La deformación entre Caribe y Norte América presenta un salto desde la zona de cizalla Tonalá hasta el sistema de fallas transcurrentes, que ocurrió entre los 6 a 5 Ma (fechado con AHe) [Witt *et al.*, 2012]. Este salto de deformación coincide con la evolución depocentral documentada por [Meneses-Rocha, 2001], con observaciones de sismicidad y GPS [Guzmán-Speziale and Meneses-Rocha, 2000; Lyon-Caen *et al.*, 2006], y con modelos cinemáticos propuestos por [Andreani *et al.*, 2008a, 2008b; Authemayou *et al.*, 2011].

### ***1.3 - SISMICIDAD***

La region del sur de México presenta gran actividad sísmica con eventos mayores a los 200 km de profundidad y con magnitudes mayores a Mw 7 en la zona de subducción [e.g., McNally and Minister, 1981; Burbach *et al.*, 1984], mientras que el sistema Polochic-Motagua ha registrado al menos 25 sismos destructivos desde 1530 [White, 1984] como el del 4 de febrero de 1976, con magnitud Mw 7.5, en el cual fallecieron hasta 23,000 personas. Existe también un catálogo histórico de sismos significativos por su intensidad en el estado de Chiapas [SSN, 2008] recopilado por [Novelo-Casanova, D.A. *et al.*, 2013]. En esta región la sismicidad es dominada por sismos someros con fallamiento inverso relacionados a la convergencia de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe [e.g., Molnar and Sykes, 1969, Dean and Drake, 1978; Burbach *et al.*, 1984; Dewey and Suárez, 1991; Pacheco and Sykes, 1992; Ambraseys and Adams, 1996]. Otros sismos significativos, son los ocurridos en los grabens del norte de América Central, donde se han reportado sismos con magnitudes de hasta Ms=6 [White and Harlow, 1993]. Por otra parte, la zona de Wadati-Benioff en esta region tiene un ángulo próximo a los 45° y se define claramente hasta los 250 km [e.g., Burbach *et al.*, 1984; Dewey and Suárez, 1991].

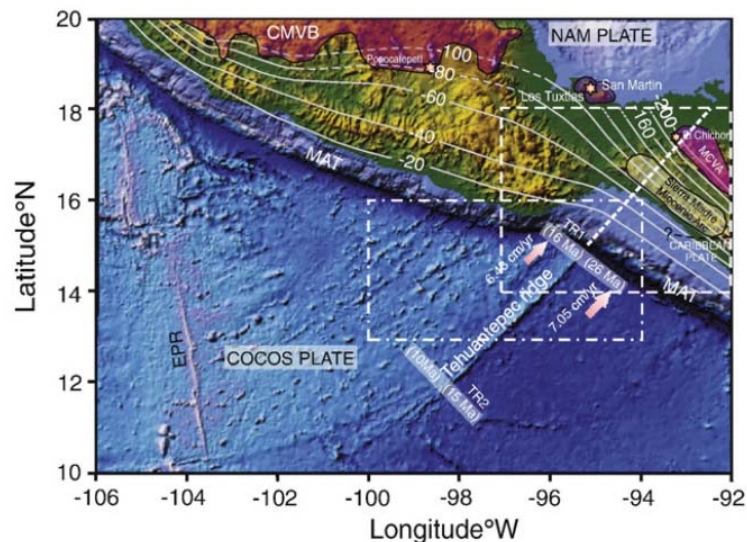
La Figura 7 muestra la distribución de la sismicidad en la región tomada del *International Seismological Centre* (ISC), el cual incluye eventos desde el inicio del siglo pasado y con magnitudes mayores a Mw 5. La profundidad máxima de los eventos sísmicos alcanzan los 270 km. Sin embargo, para este trabajo es de interés analizar sólo la sismicidad y en particular los mecanismos focales que pudieren ocurrir en la corteza continental, y que pudiesen correlacionarse con las principales fallas observadas o documentadas.



**Figura 7.-** Sismicidad en la región Caribe-Cocos-Norte América, con las principales fallas asociadas a esta actividad. Los datos provienen del catálogo del *International Seismological Centre*. PFI, Provincia de Fallas Inversas; PFT, Provincia de Fallas Transcurrentes. Las flechas negras indican la dirección de las fallas laterales. La trinchera mesoamericana se muestra con triángulos color negro.

## 1.4 – ARCO VOLCÁNICO CHIAPANECO

La Figura 8, muestra una de las más importantes estructuras del piso oceánico en la placa de Cocos, la llamada Zona de Fractura de Tehuantepec (ZFT) [Manea *et al.*, 2005], la cual tiene un relieve vertical de alrededor de 2,000 m, separando pisos oceánicos de diferentes profundidades, una parte de 3,900 m al NW y la otra de 4,800 m al SE, y con una separación de edades de 16 a 26 Ma [Nixon, 1982; Manea *et al.*, 2006]. Estas diferencias en su edad, han provocado que la placa subducida de Cocos tenga un ángulo de echado de 25° a 35° hacia el oeste de la Dorsal de Tehuantepec [Ponce *et al.*, 1992; Pardo and Suárez, 1995; Rebollar *et al.*, 1999], y un ángulo de 40-45° hacia el este [Rebollar *et al.*, 1999]. Por otro lado, la cercanía del punto triple CA-CO-NA fue propuesto por Nixon [1982], como causa del magmatismo del volcán El Chichon, mientras que Manea and Manea [2006] propusieron que la posición y el volcanismo K-alkalino del Chichon, estaba relacionado con el ascenso de una alta serpentinización en la ZFT bajo el Moderno Arco Volcánico Chiapaneco (MAVC). La migración del MAVC está relacionado con la subducción de la placa de Cocos, la ZFT y la deformación interna del punto triple CA-CO-NA [e.g., García-Palomo *et al.*, 2004; Manea *et al.*, 2005; Manea and Manea 2008; Mora *et al.*, 2007].



**Figura 8.-** Zona de Fractura de Tehuantepec. CMVB, Arco Volcánico Transmexicano; MCVA, Moderno Arco Volcánico Chiapaneco; MAT, Trincherina Mesoamericana; EPR, Cresta Este del Pacífico. Curvas de nivel de la placa subducida de [Pardo and Suarez, 1995; Bravo *et al.*, 2004]. Velocidades de convergencia entre NA y CO en flechas rosas de [DeMets *et al.*, 1994]. Edades de la placa de [Manea *et al.*, 2005]. Tomado de [Manea and Manea, 2008].

# ***CAPÍTULO II – METODOLOGÍA***

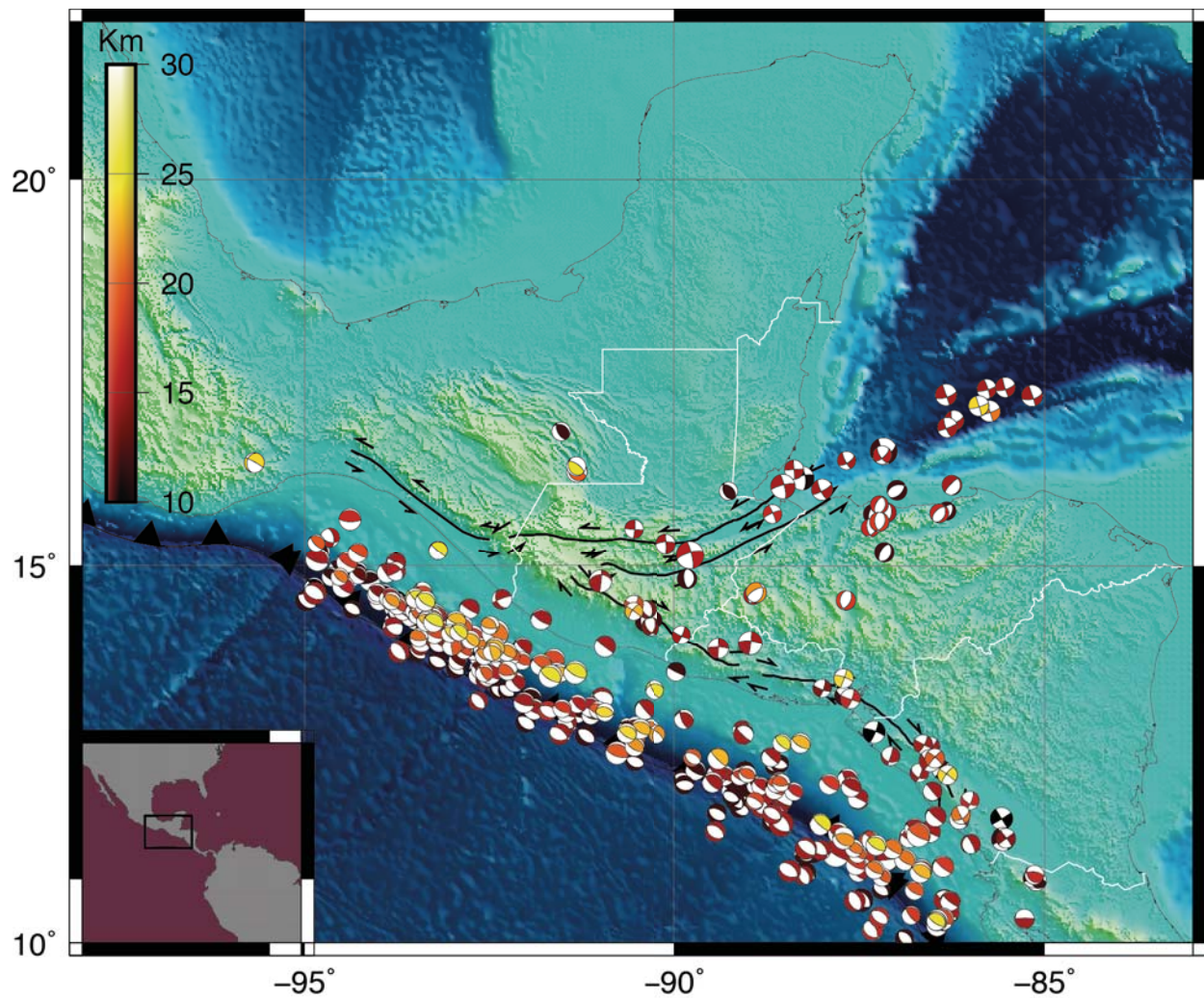
En el presente trabajo es realizado un análisis de datos sismológicos del Servicio Sismológico Nacional de México (SSN) con el fin de obtener un compendio de los mecanismos focales de algunos sismos con magnitud  $M_w$  mayor a 4; también se incluyen datos del catálogo del *Centroid Moment Tensor* (Global CMT) en el análisis, con magnitud  $M_w$  mayores a 5. Los ejes principales de los mecanismos focales de estos catálogos son relacionados con los rasgos estructurales superficiales en la región, lo que permite asociarlos a los modelos tectónicos de la zona vecina al triple punto de los límites de las placas CA-CO-NA.

## ***2.1 - MECANISMOS FOCALES***

La primer fase del análisis consistió en obtener datos del catálogo del Global CMT de mecanismos focales desde 1976 hasta septiembre del año 2015. Los datos recopilados cubren un área que abarca desde la longitud de  $85^\circ$  W a  $96^\circ$  W y en latitud de  $10^\circ$  N a  $18^\circ$  N. Sin embargo, este catálogo tiene grandes áreas sin sismicidad reportada por lo cual, se consideró incluir datos epicentrales del SSN y del ISC.

Los mecanismos focales del CMT tienden a coincidir con la dirección de las principales fallas, pero en las áreas donde no hay reporte de sismicidad, la continuación de las fallas se pierde; por ejemplo, la falla Polochic, no presenta sismicidad al entrar en la frontera entre Guatemala y México. La Figura 9 muestra los mecanismos focales obtenidos del Global CMT, con una clara tendencia de mecanismos de componente lateral, justo en la región continental donde están las fallas Polochic y Motagua; en cambio al sureste de estas fallas los mecanismos son de fallamiento normal donde se han documentado grabens activos. Mientras que la mayoría de los mecanismos de fallamiento inverso están a lo largo de la zona de subducción de la placa de Cocos con las placas de Norte América y Caribe.

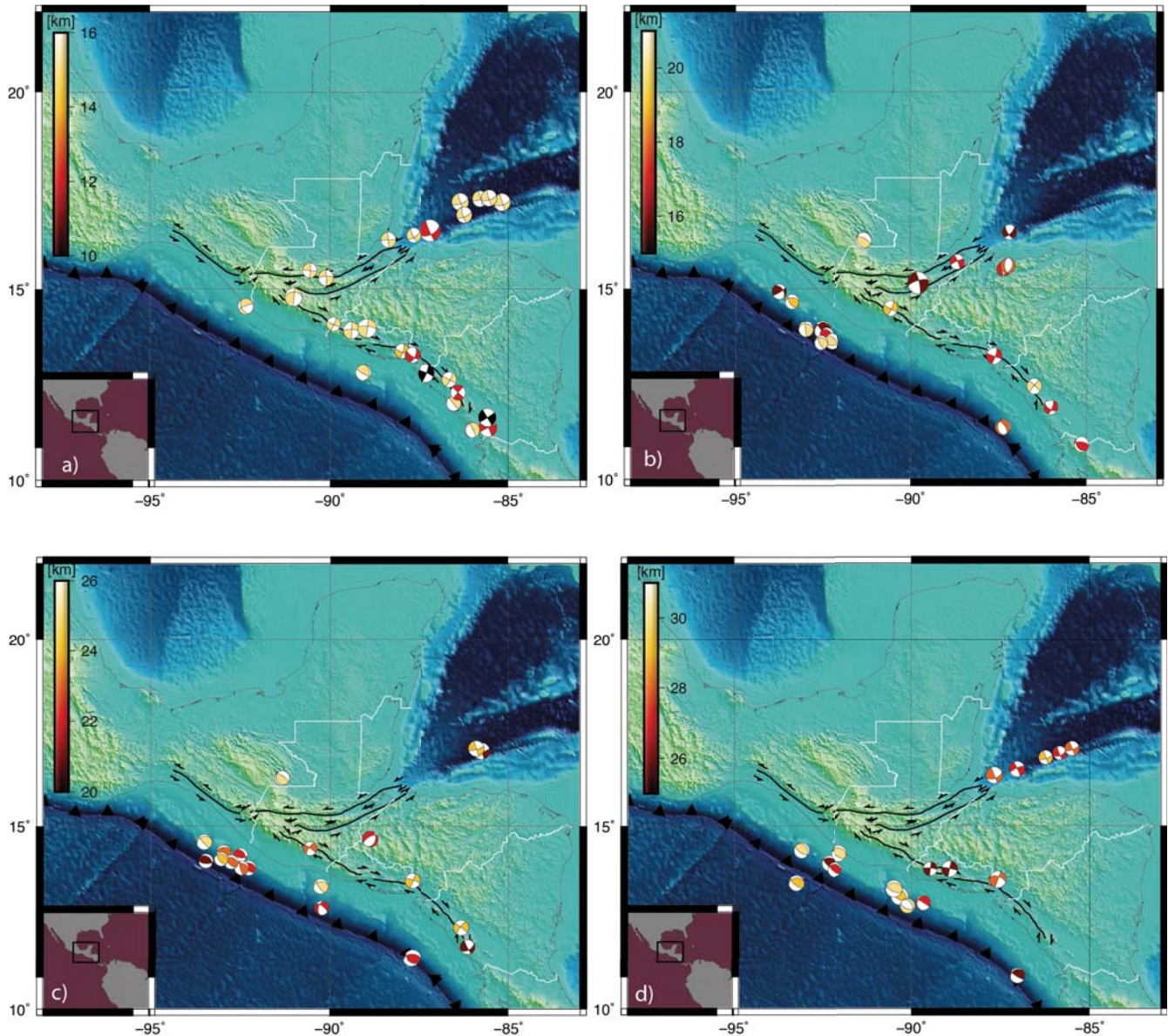




**Figura 9.-** Mapa que muestra los mecanismos focales obtenidos del Global CMT, hasta una profundidad de 25 km. Los mecanismos de tipo lateral siguen la traza de las fallas Polochic, Motagua y Jalpatagua (líneas color negro), sin embargo; la mayoría de los mecanismos se concentra en la costa (inversos), donde ocurre la subducción de la placa de Cocos bajo las placas de Norte América y el Caribe. Las flechas indican la dirección de movimiento de las fallas.

Anteriormente White and Harlow (1993) compilaron un catálogo de sismos someros en América Central desde 1900, y utilizaron los siguientes criterios para diferenciar entre eventos asociados a la subducción y no subducción: la presencia de rupturas superficiales, hipocentros someros y la localización epicentral con respecto al arco volcánico (más de 30 km tierra adentro del arco significaría un evento de corteza superior, mientras que más de 30 km hacia el mar desde el arco signfica que el evento está relacionado con subducción).

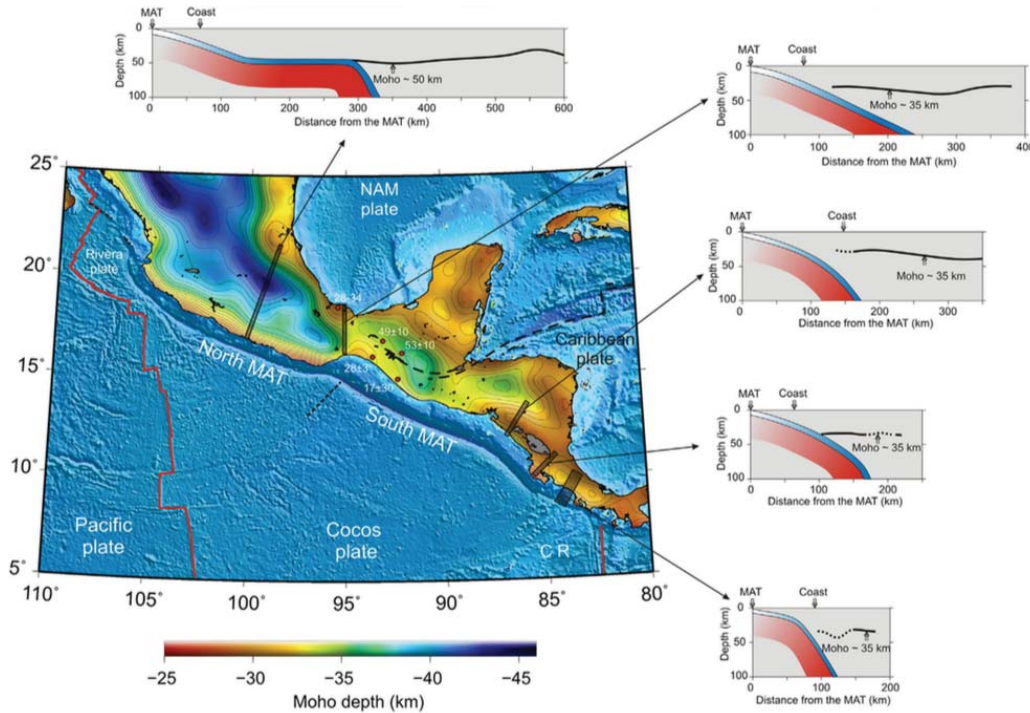
En el planeta existen otros límites entre placas de tipo transformante; por ejemplo, la falla de San Andrés, límite entre la placa del Pacífico (PA) y la placa Norte Americana, según el *United States Geological Survey* (USGS) tiene una zona de actividad sísmica solo en la parte somera de la corteza con profundidades máximas de aproximadamente 15 km. Con lo antes mencionado, un problema fue definir hasta qué profundidad delimitar los sismos superficiales o de interés para el fin de este trabajo, por lo que uno de los criterios fue con base en los mapas previos que se hicieron (Figura 10).



**Figura 10.-** Mapas de mecanismos focales tipo strike-slip. Las líneas negras son la traza de las fallas mayores y su dirección de desplazamiento. Los mecanismos focales provienen del catálogo del Global CMT. En a) Mecanismos focales desde 10 hasta 15 km de profundidad. En este rango de profundidad se encuentran la mayoría de eventos. En b) de 16 hasta 20 km. En c) de 21 a 25 km y en d) de 26 a 30 km de profundidad. En este rango de profundidad ya no hay eventos significativos asociados a fallas transformantes en la región de estudio.



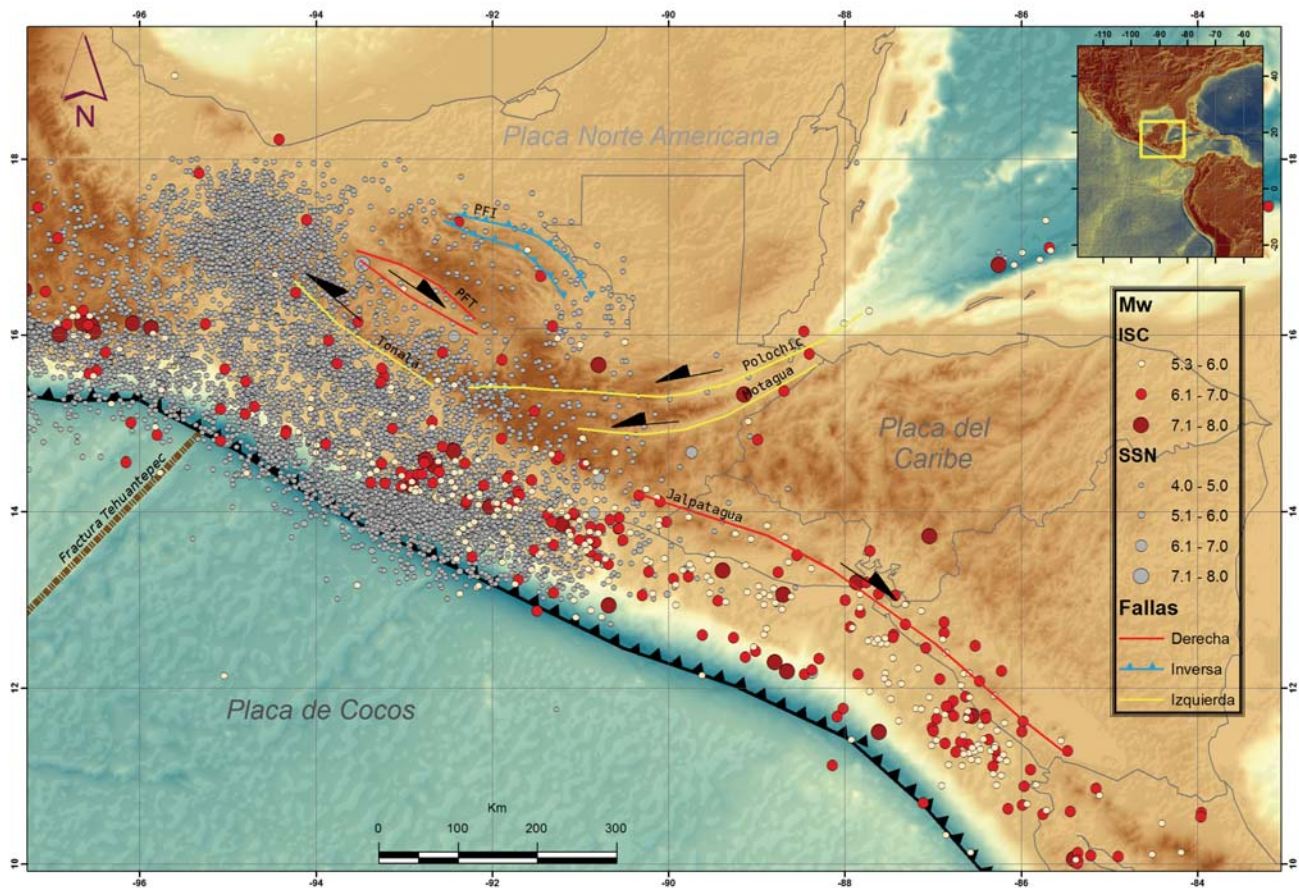
Las fallas transformantes se observan principalmente hasta una profundidad de 25 km, aunque haciendo una revisión general incluyendo toda la sismicidad recopilada, se observan también en partes más profundas de la placa como lo muestran los resultados de trabajos recientes (Figura 11); por otra parte, en el sur de México, bajo Chiapas, el espesor de la corteza continental decrece hacia la Trinchera Mesoamericana de 49-53 km tierra adentro a solo 17-28 km bajo la costa [Narcia-López *et al.*, 2004], aunque este último dato tiene un margen de error alto.



**Figura 11.-** Topografía del Moho para México y América Central: El mapa del Moho está basado en datos de gravedad del GOCE [Reguzzoni and Sampietro, 2012]. Los perfiles 2D representan al Moho y la geometría de la placa, y están basados en experimentos sísmicos [Dzierma *et al.*, 2010; Mackenzie *et al.*, 2010; Melgar and Pérez-Campos, 2011; Pérez-Campos *et al.*, 2008]. Los puntos rojos son estimaciones de la profundidad del Moho hechos con experimentos sísmicos [Narcia-Lopez *et al.*, 2004; Zamora-Camacho *et al.*, 2010]. Tomado de Manea *et al.*, [2012].

Una vez que se decidió la profundidad máxima, la cual sería de 25 km, se redujeron los datos hasta esa profundidad. La Figura 12 muestra la sismicidad registrada por el SSN cuyo catálogo tiene registros desde 1990 y sismicidad reportada por el ISC. Los sismos obtenidos del SSN tienen magnitudes mayores a Mw 4, y la sismicidad se concentra principalmente a lo largo de la zona de subducción, principalmente frente a la costa entre Chiapas en México y Guatemala. Muchos de los sismos siguen la tendencia de las fallas que se observan, por ejemplo la falla Jalpatagua, muestra una clara correlación de sismicidad con su traza en la superficie. La Provincia de Fallas Inversas en el sur de Chiapas

también presenta mucha sismicidad y hacia el Istmo de Tehuantepec, aunque la mayoría de sismos son de magnitudes  $M_w$  entre 4 y 5.



**Figura 12.-** Sismicidad en la región Caribe-Cocos-Norte América de los catálogos del ISC y el SSN, con las principales fallas asociadas. A pesar de la disminución de datos, la mayoría sigue localizándose en la costa debido a la subducción de la placa de Cocos, pero se sigue notando la traza de las fallas mayores con la sismicidad.

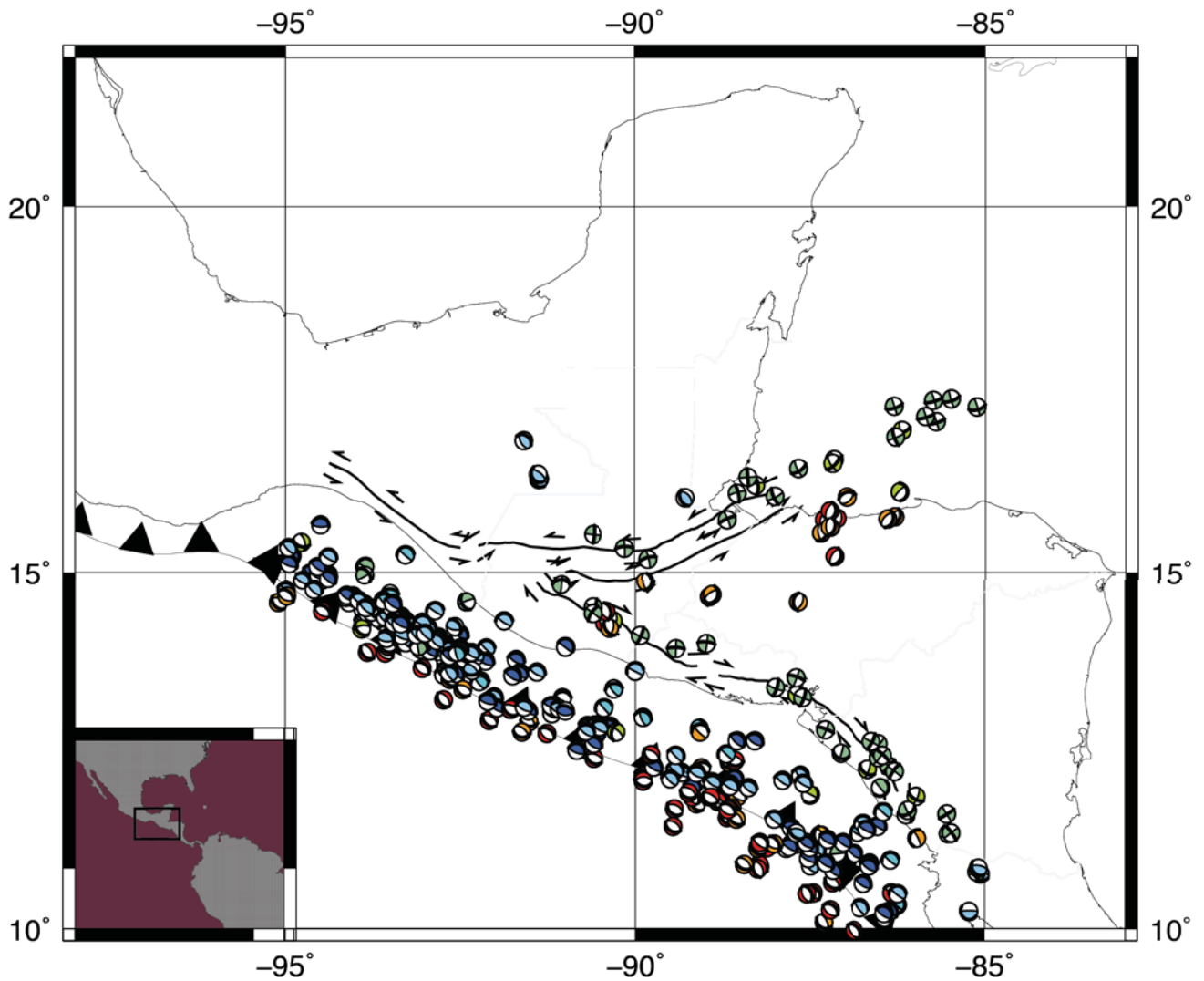
Con la reducción de los datos por profundidad, también se tomó la decisión de utilizar los sismos con  $M_w$  mayor a 4 ya que en caso de necesitar calcular algunos mecanismos focales, es más sencillo obtenerlos a partir de esta magnitud. Para sismos de menor magnitud se necesita de una metodología distinta.

El programa R© de *The R Foundation* fue de gran ayuda para realizar un análisis de los mecanismos con referencia a su posicionamiento en el margen continental. Este software incluye la librería RFOC desarrollada por Jonathan M. Lees [2014], que permite graficar datos de mecanismos focales y diagramas ternarios, obteniendo diferentes perspectivas de visualización. La librería RFOC utiliza un archivo de entrada con extensión (.RData) para su correcto funcionamiento. Otra librería de R©,

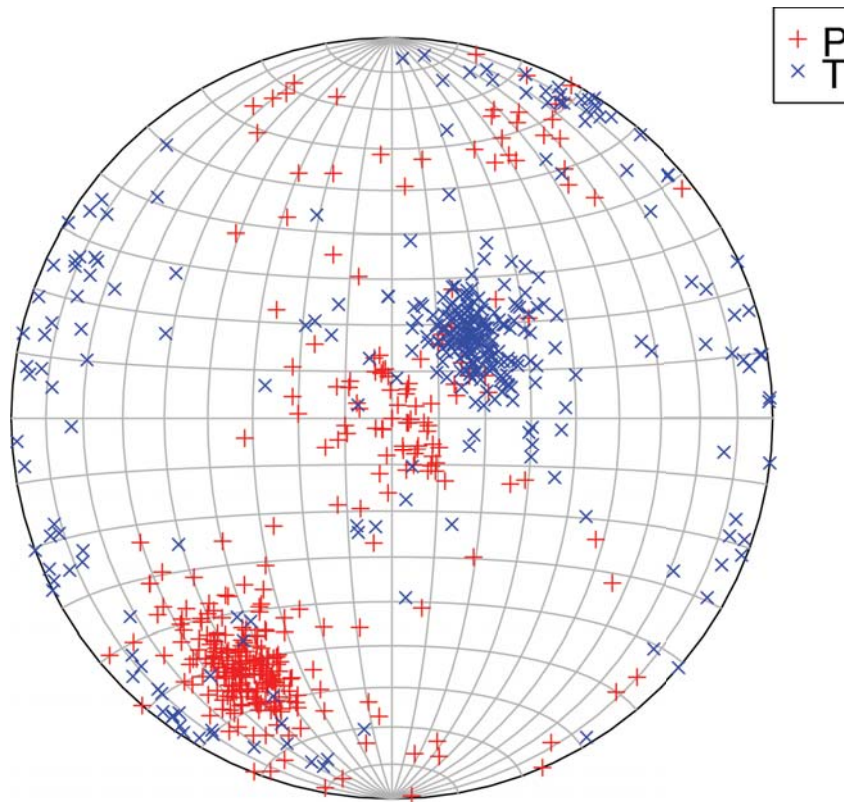


llamada *R commander* utiliza como entrada un archivo de texto que contiene los parámetros del sismo posicionados en columnas, así como los parámetros del mecanismo focal para poder generar el archivo (.RData). El *script* realizado en el software R© permite graficar el mecanismo focal georeferenciado (Figura 13) y posicionando los ejes principales de presión (P) y tensión (T) en una red estereográfica (Figura 14) siguiendo la convención de Frohlich and Apperson [1992]. Mediante la incorporación de otras librerías se puede obtener un diagrama ternario que es clasificado de acuerdo al tipo de falla que presenta cada evento (Figura 15), esta convención es referida a Frohlich [1992], quién establece que un mecanismo inverso tendrá su eje T vertical, un mecanismo de tipo normal tendrá su eje P vertical y un mecanismo de tipo transcurrente tendrá su eje B vertical.

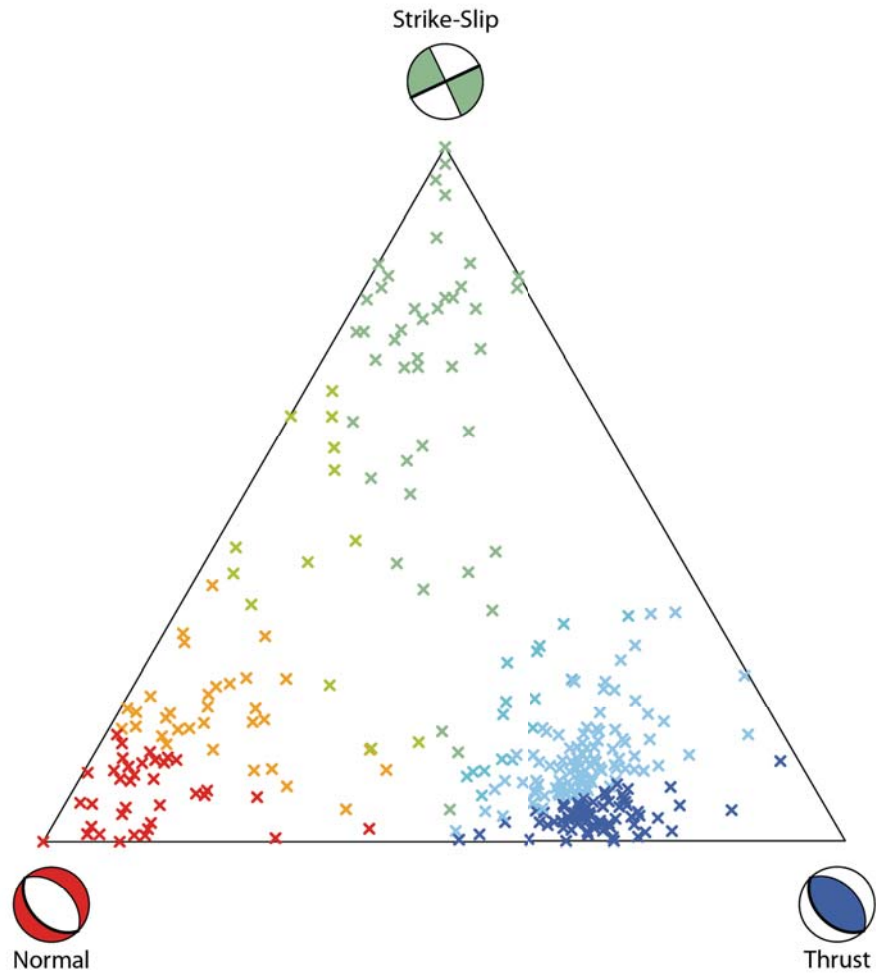
Son creados y georeferenciados además, diagramas ternarios por regiones (Figura 16). Estos diagramas son creados a partir de los valores de deslizamiento de los mecanismos focales (*Rake*). Los sismos (círculos en color negro) son agrupados en cuadrantes y el usuario decide la cantidad de cuadrantes que utilizará el programa para dividir la región, lo que permite hacer una correlación entre los mecanismos focales y los tipos de fallas documentadas en superficie; así como obtener una distribución general de los tipos de ruptura en la región. Los cuadrantes están en función de la cantidad de datos que hay en el área a graficar. Para el correcto funcionamiento del *script* se utilizaron otras librerías. En el Anexo 1 se muestra a detalle el código elaborado.



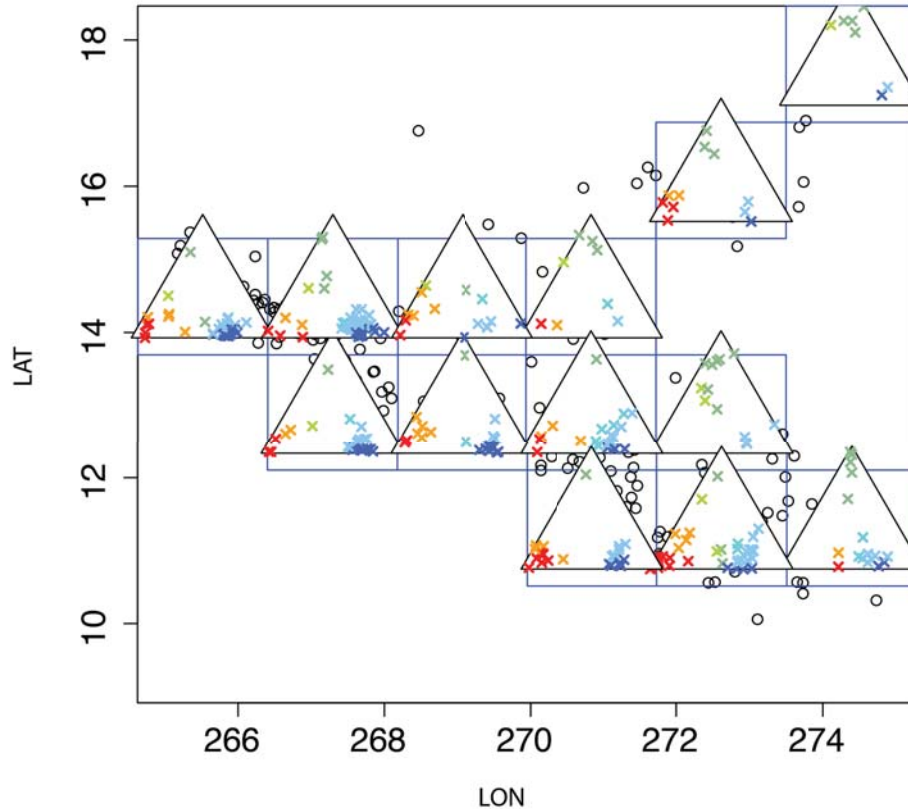
**Figura 13.-** Mecanismos focales graficados con el software R mediante la librería RFOC, y georeferenciados en GMT. Al realizarse el programa con esta librería se visualizan los sismos georeferenciados y va graficando el mecanismo para cada uno. Esta es la primer parte del programa, el cual se puede revisar a detalle en el anexo 1. Los colores corresponden al tipo de mecanismo focal (Figura 14). Las líneas negras representan las fallas en superficie y su dirección de desplazamiento.



**Figura 14.-** Distribución de los ejes principales de Presión (P) y Tensión (T), en una red estereográfica, calculados a partir del rumbo (Strike), echado (Dip) y deslizamiento (Rake) de los datos de entrada. Se observan dos principales distribuciones, una ligeramente desplazada del centro (T) y otra al SW (P).



**Figura 15.-** Diagrama ternario calculado a partir de los mecanismos focales, se observa la mayor distribución de mecanismos del tipo inverso, lo cual es claro en los mapas anteriores, una segunda tendencia de mecanismos normales, y en menor ocurrencia los de tipo lateral.



**Figura 16.-** Diagramas ternarios distribuidos por semi regiones. Los círculos en negro representan los sismos y cada diagrama ternario incluye en colores, la cantidad de sismos que utilizó. Algunos sismos no se observan porque están detrás del diagrama. Los diagramas se correlacionan muy bien con los mecanismos, lo cual corrobora el buen funcionamiento del programa, sin embargo, la ausencia de datos no permite hacer un mejor análisis.

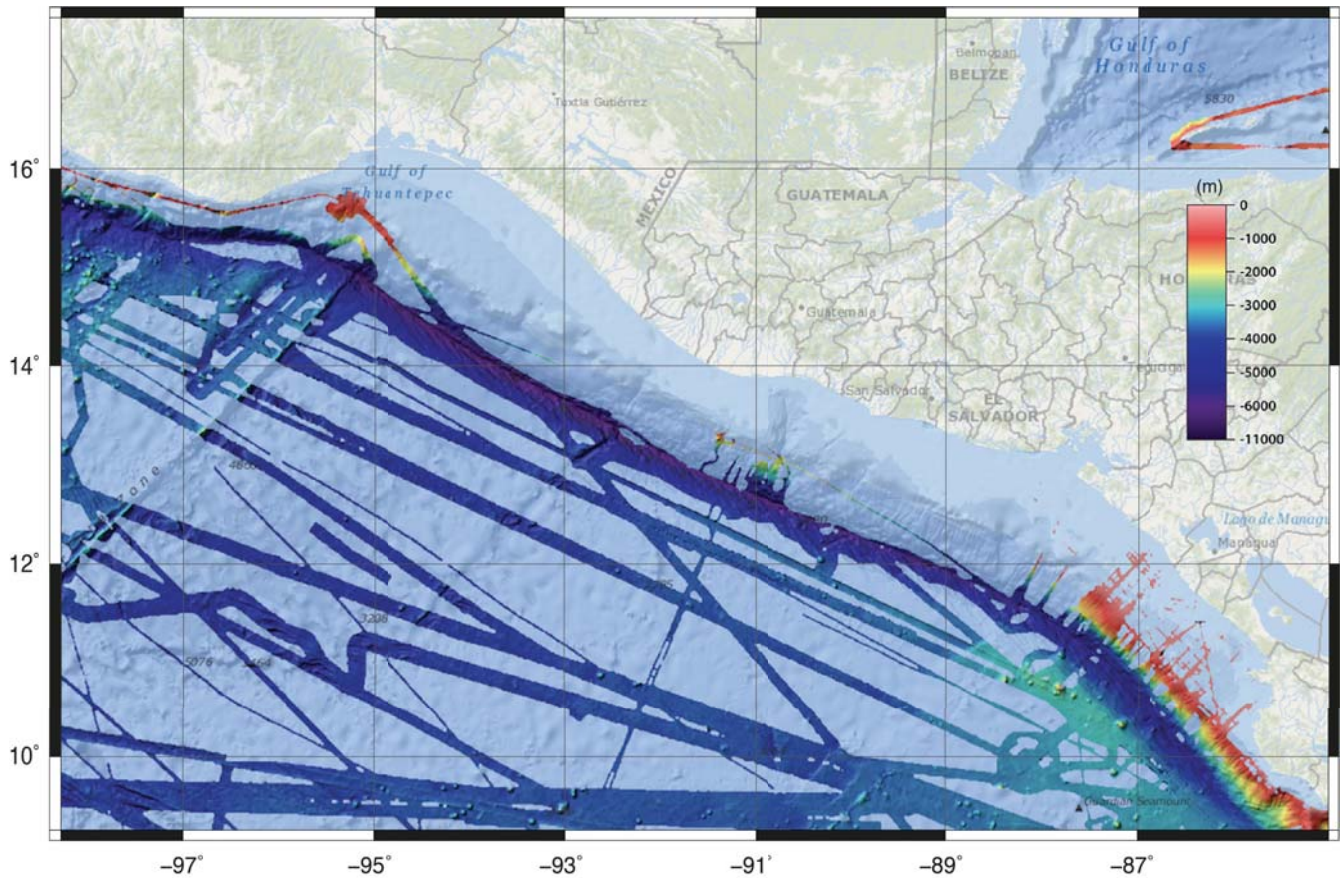
## 2.2 – DATOS GEOFÍSICOS MARINOS

### 2.2.1 – Batimetría

Se hizo además una búsqueda de datos de batimetría y reflexión sísmica en bases de datos disponibles como la del *National Geophysical Data Center* (NGDC) y la *British Oceanographic Data Center*, ya que fue imposible en este momento realizar alguna campaña oceanográfica a bordo del B/O El Puma como se tenía planeado en un principio, por lo que se incluyeron algunas imágenes de la batimetría obtenida hasta la actualidad (Figura 17). Los datos obtenidos de topografía provienen del *Global Multi-resolution Topography* [Ryan, et al., 2009] y la malla mundial de datos batimétricos del *General*



*Bathymetric Charts of the Ocean* (GEBCO) con una resolución espacial de 15 segundos de arco, aproximadamente 500 m entre cada pixel. Actualmente la información disponible no es adecuada para realizar un análisis detallado respecto a la continuación del límite entre las placas de Caribe y Norte América en la parte marina pero permitió obtener algunas observaciones importantes.



**Figura 17.-** Mapa integral de la batimetría disponible en la región. Los datos multihaz provienen de la recopilación del National Geophysical Data Center (NGDC), mientras que el mapa oceánico base proviene de ESRI. La escala de profundidad está en metros. Como se observa, no se tiene cobertura en la plataforma continental.

Lo que se hizo con estos datos fue básicamente obtener la malla con las coordenadas seleccionadas para el área de estudio (Anexo 2), cambiarlos de formato para obtener una mejor visualización de ellos utilizando diferente software como fue ArcGis, Global Mapper y Fledermaus e implementar algunos filtros y cambios de ángulo en el sombreado para resaltar estructuras.

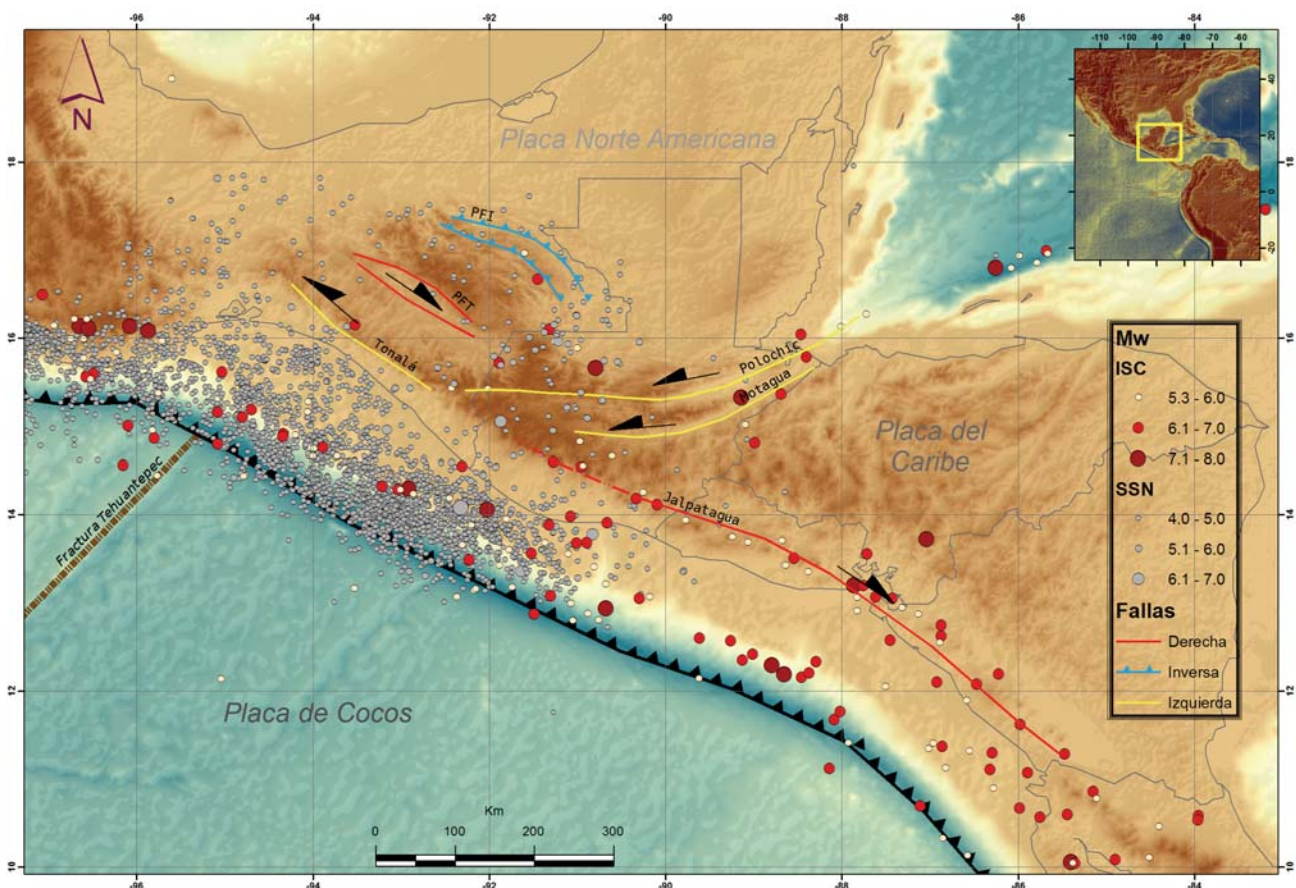
### ***2.2.2 – Reflexión sísmica***

Además, en el análisis se examinaron perfiles de reflexión sísmica de [Ladd *et al.*, 1978; Ladd, J. W. and Schroder, S., 1985] provenientes del *International Ocean Drilling Program* (IODP). Estos datos ya están procesados y lo único que se puede hacer es aplicar algunos atributos como resalte de amplitudes para mejorar las imágenes y buscar una interpretación. Esta información fue utilizada en correlación con la batimetría. La finalidad de esta revisión de los perfiles sísmicos es identificar alguna falla importante o estructuras relacionadas a éstas, así como identificar zonas de deformación y cambios en la continuidad de los estratos.

# CAPÍTULO III - ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 3.1 - MECANISMOS FOCALES

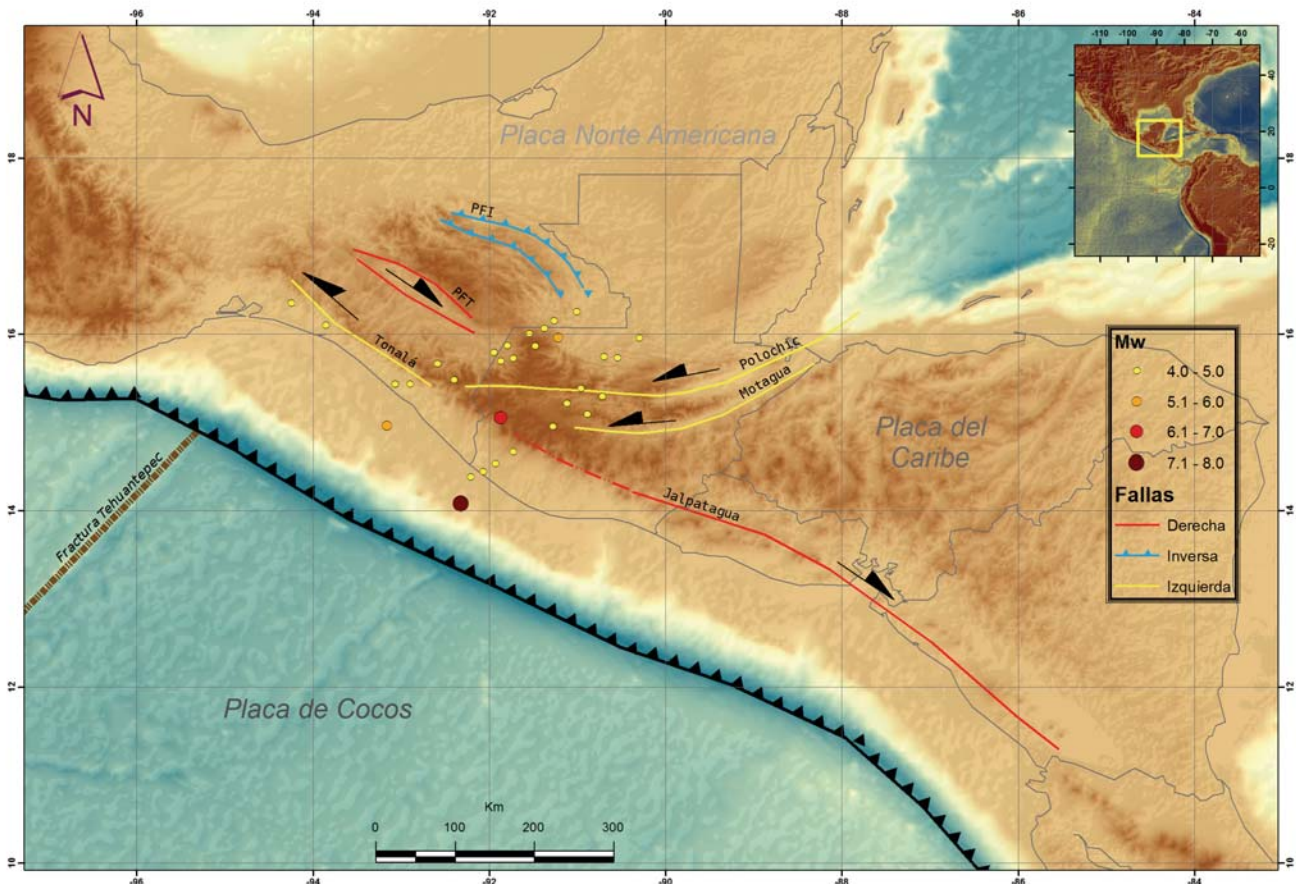
La Figura 18, muestra la distribución de la sismicidad regional reportada en los catálogos del SSN y el ISC. El mapa muestra que en la dirección de la falla Tonalá ocurrieron algunos sismos pero no a lo largo de toda la falla, tampoco se observa una relación clara con el sistema de fallas Polochic-Motagua.



**Figura 18.-** Mapa de la sismicidad obtenida del catálogo del SSN y del catálogo del ISC, con sismos de magnitud mayor o igual a 4 ( $M_w \geq 4$ ). Se observa una gran cantidad de sismos entre  $M_w=4$  y  $M_w=5$  justo en las costas de Chiapas y entre la Dorsal de Tehuantepec y una estructura que parece una fractura o zona de apertura. Algunos sismos con magnitudes mayores muestran su relación con las fallas reportadas.



También algunas alineaciones de estos sismos son observados pero no en la misma dirección de las fallas del sistema Polochic-Motagua, sino perpendiculares, parecen alinearse en una dirección NE-SW (Figura 19). Estos sismos tienen una profundidad variada y máxima hasta los 25 km. Esa alineación no tiene relación con la topografía y se desconoce el mecanismo focal de cada uno. Sin embargo, cabe recalcar que la calidad de los datos epicentrales en el sur de México es limitado, por lo que hay un error considerable en estas localizaciones por parte del SSN, y por lo tanto, las alineaciones mostradas no pueden tener precisamente esa ubicación.



**Figura 19.-** Sismos con una alineación en dirección NE-SW, la mayoría de magnitud entre  $M_w=4$  y  $M_w=5$ . Los que se encuentra hacia el suroeste tienen una alineación con la zona de fractura que se observa en la batimetría aunque la resolución de ésta no permite ver más detalle. La zona de cizalla Tonalá por otro lado muestra sismicidad, aunque no a lo largo de toda su extensión y de estas magnitudes. Mientras que la alineación al noroeste no parece estar relacionada con la Dorsal de Tehuantepec.

Se pueden utilizar diferentes métodos para correlacionar los mecanismos focales con las fallas observadas. La componente de deslizamiento (*Rake*) en los mecanismos focales es una de ellas, y contribuye significativamente en el comportamiento de las fallas que se han documentado en superficie.

Otra es siguiendo la convención de Frohlich and Apperson (1992), mencionada anteriormente, donde se utilizan los ejes principales del mecanismo. La Tabla 1 muestra una síntesis de los posibles tipos de falla dependiendo del ángulo de deslizamiento. Este ángulo es medido positivo en sentido antihorario a partir de un plano de referencia (Strike) y será negativo en sentido horario [Vincent S. Cronin, 2010].

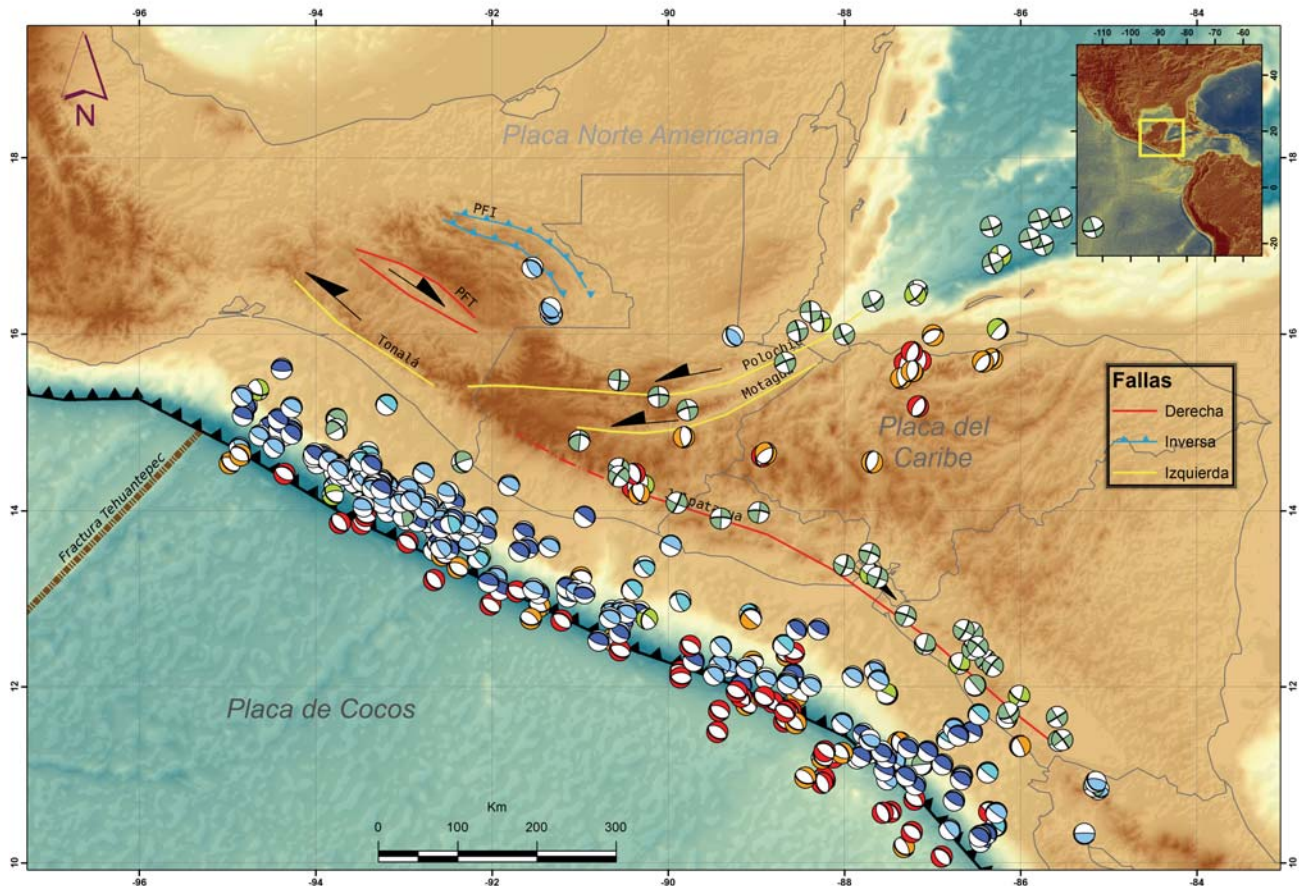
<b>Rake</b>	<b>Tipo de Falla</b>
<b>0° o 180°</b>	Transcurrente
<b>90°</b>	Inversa Pura
<b>-90°</b>	Normal Pura
<b>-20° a 20°</b>	Transcurrente Sinistral
<b>20° a 70°</b>	Oblicua Inversa Sinistral
<b>70° a 110°</b>	Inversa
<b>110° a 160°</b>	Oblicua Inversa Dextral
<b>-160° a 160°</b>	Transcurrente Dextral
<b>-110° a -160°</b>	Oblicua Normal Dextral
<b>-70° a -110°</b>	Normal
<b>-20° a 70°</b>	Oblicua Normal Sinistral

**Tabla 1.-** Tipo de falla asociada al ángulo de deslizamiento (rake). Nótese los valores de rake para un falla pura transcurrente y para sus composiciones con fallas normales o inversas. Modificada de Vincent S. Cronin, 2010.

Los datos de mecanismos focales utilizados provienen del catálogo del *Global CMT* hasta una profundidad de 25 km. El cual muestra la tendencia de los mecanismos de tipo transformantes sobre las fallas Polochic y Motagua en la parte continental. Sin embargo, las estructuras a lo largo del límite Caribe-Norte América no muestran sismicidad mayor alguna, aunque topográficamente la falla Polochic pareciera unirse a la zona de cizalla Tonalá. A cambio, la Figura 17 de la sismicidad registrada por el SSN muestra una nube de sismos con magnitudes Mw menores a 5 que satura la region desde la trinchera hasta el interior del continente. La mayor parte de los mecanismos CMT son del tipo inverso y se concentran en la zona de subducción, pero también incluyen del tipo normal.

También, otro paquete de software, Arc Map de ESRI, es utilizado para tener otra visualización de los mecanismos en la region. Este paquete incluyó el modelo digital de elevaciones, las trazas de las fallas

mayores y los mecanismos focales en una presentación gráfica (Figura 20). La figura muestra que La Provincia de Fallas Inversas de Chiapas concuerda con los mecanismos del tipo inverso, mientras que los mecanismos del tipo normal concuerdan con los grabens de la región. La traza de la falla Jalpatagua está bien correlacionada con los sismos y sus mecanismos paralelos a la Trinchera Mesoamericana. Aunque otras fallas carecen de registros de mecanismos de sismos asociados a éstas en la región de estudio.

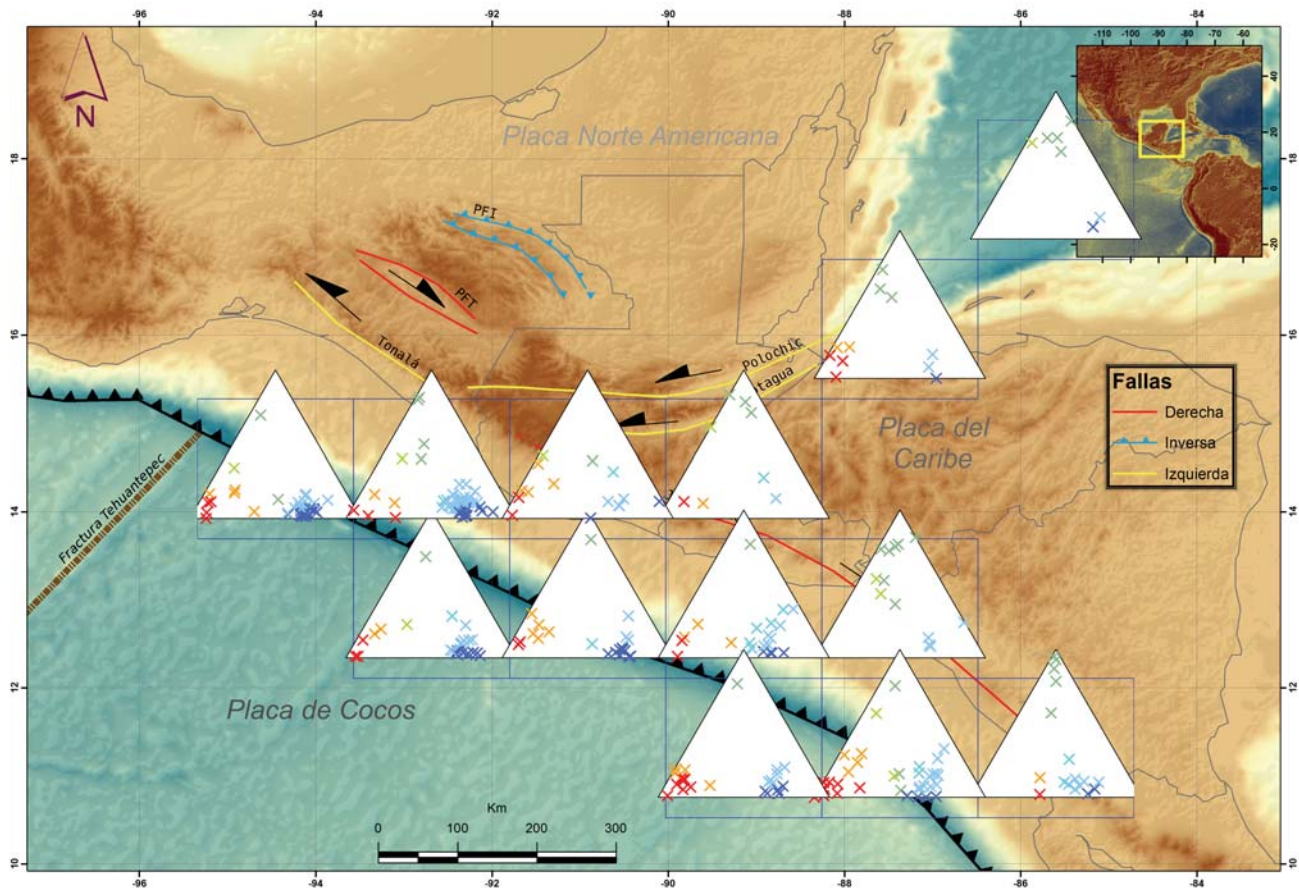


**Figura 20.-** Mecanismos focales obtenidos con el software R y georreferenciados en el modelo digital de elevaciones. Los mecanismos en azul están asociados a fallas inversas, en rojo al del tipo normal y en verde a las transcurrentes. Algunos tienen componentes adicionales y se muestran en combinaciones de los colores antes mencionados. Las fallas mayores se muestran también, en color rojo están las de corrimiento dextral y en amarillo de corrimiento sinistral, mientras que en azul están las fallas inversas, la zona de subducción está en color negro.

Mientras que la Figura 21 muestra un mapa con los diagramas ternarios derivados de los datos del catálogo del CMT por regiones sobrepuestas al modelo topográfico. Estos diagramas ternarios muestran los mecanismos (verde olivo) que tienen la tendencia de las fallas laterales mayores, como son las fallas Polochic, Motagua y Jalpatagua. Sin embargo, no se observa alguna alineación por parte



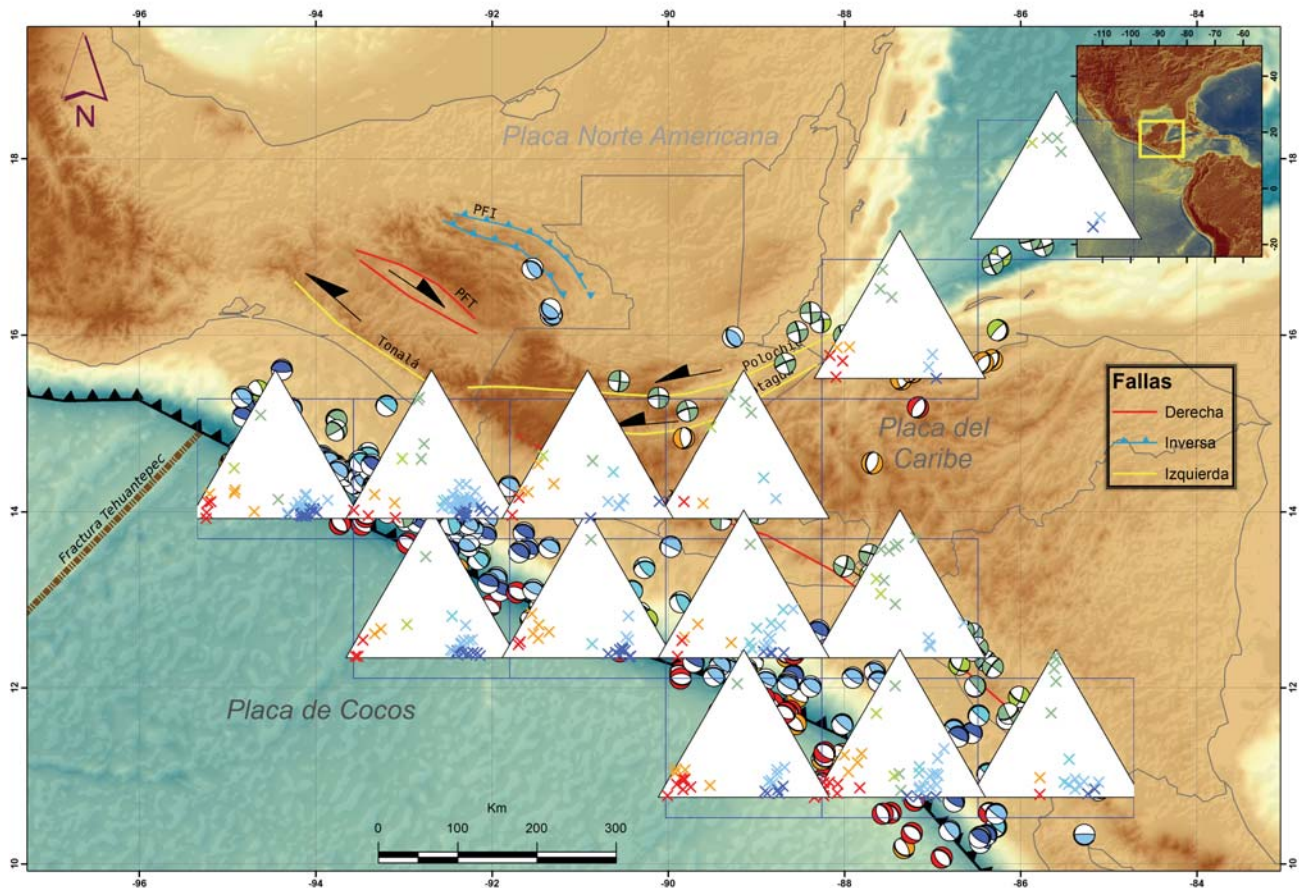
de estos mecanismos que se extienda hacia el océano; aunque algunos diagramas ternarios que están sobre la trinchera muestran mecanismos de tipo lateral.



**Figura 21.-** Diagramas ternarios por secciones, mostrando el tipo de falla asociado y los sismos tomados para su cálculo. Cada triángulo contiene una cierta cantidad de mecanismos focales de acuerdo a un color. Las cruces azules son mecanismos de tipo inverso, las rojas mecanismos normales y las verde olivo de tipo lateral.

La Figura 22 integra tanto los mecanismos focales como los diagramas ternarios sobrepuestos en el modelo digital de elevaciones para tener una mejor correlación de los datos. Los diagramas centrales de arriba hacia abajo, y tercera columna de izquierda a derecha, muestran los mecanismos dominantes de tipo transformante asociados al sistema Polochic-Motagua con alguna componente inversa, y con una alineación hacia la Provincia de Fallas Inversas de Chiapas, como lo sugieren distintos autores [Guzmán-Speziale and Meneses-Rocha, 2000; Lyon-Caen *et al.*, 2006; Andreani *et al.*, 2008; Franco *et al.*, 2009; Witt *et al.*, 2012]. Mientras que a lo largo de la trinchera se observan algunos mecanismos con componentes laterales, lo cual revela que no es una condición necesaria para pensar en la extensión del límite CA-NA por este tipo de características, sobre todo en la prolongación del sistema Polochic-Motagua. La figura presenta mecanismos del tipo inverso normalmente acompañados de una clara

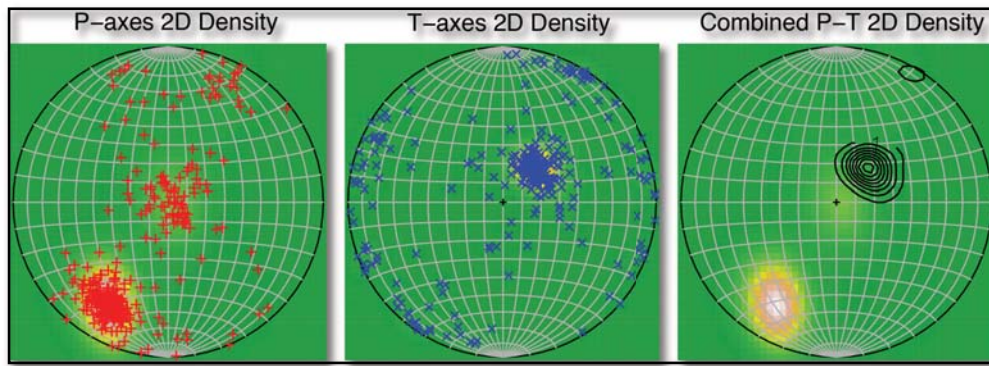
densidad de mecanismos del tipo normal, asociados probablemente a la flexión de la litósfera oceánica de la placa de Cocos al subducirse debajo de las placas de Norte América y Caribe.



**Figura 22.-** Mecanismos focales con diagramas ternarios sobrepuestos en el modelo digital de elevaciones. Los mecanismos de tipo lateral se concentran mayormente en el continente. Por otro lado, los diagramas ternarios centrales de norte a sur presentan algunos mecanismos del tipo transformante asociados al sistema Polochic-Motagua con alguna componente inversa.

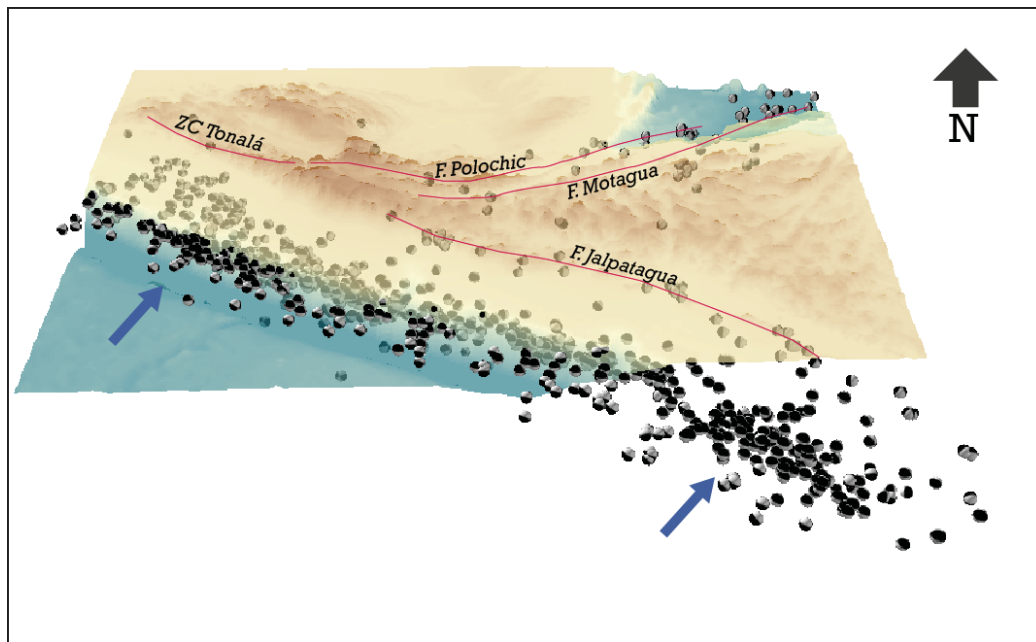
La Figura 23 (utilizando el software R) muestra los ejes principales de presión (P) y tensión (T) en una red estereográfica. Estos diagramas muestran: a la izquierda, la densidad de los ejes P en rojo, al centro, la densidad de ejes T en azul; y a la derecha, la combinación de ambos, en donde la sombra en marrón claro, es la densidad de los ejes de presión, mientras que la sombra de los de tensión es la densidad en curvas de nivel. De acuerdo a Frohlich and Apperson [1992], se tiene una gran cantidad de ejes T casi verticales por lo que una gran cantidad de sismos tienen su origen en falla inversa, mientras que otra gran cantidad de sismos presenta ejes P casi verticales y con algunas componentes laterales, lo que se refleja en fallas de tipo normal asociadas al doblamiento de la placa oceánica por la subducción.





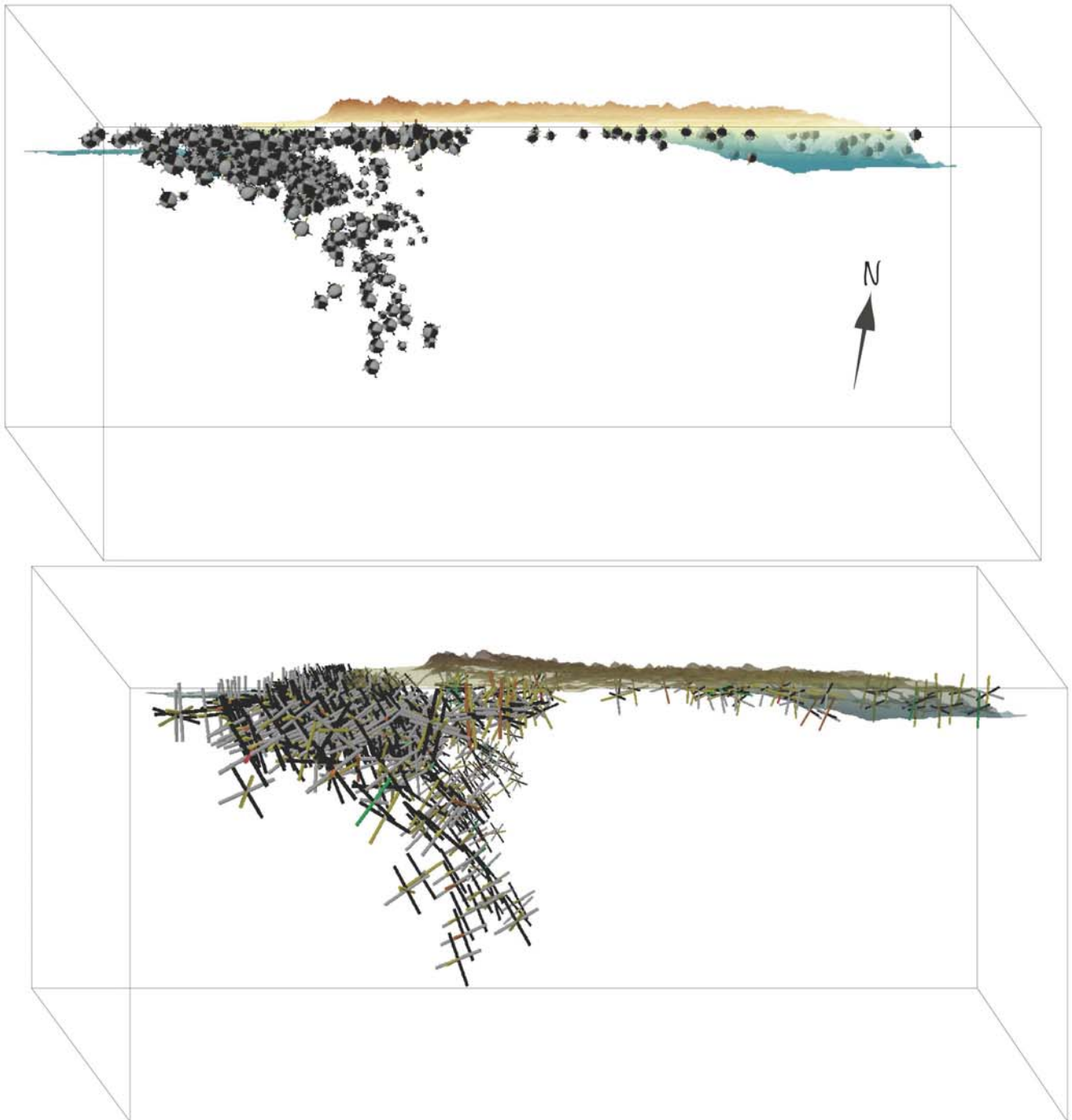
**Figura 23.-** Ejes principales de presión (P) y tensión (T). Se muestran en 2D, la densidad de los ejes P en color rojo, red izquierda; al centro, la densidad de ejes T, color azul, y en la red de la derecha, la combinación de ambos.

También, este análisis utiliza ArcScene de ESRI para la visualización de datos y su interpretación, que incluye un módulo llamado 3DFocalMech, desarrollado por Keith A. Labay y Peter J. Haeussler, ambos del U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. Este software es de acceso libre y corre en las versiones 9.x de ESRI. Las Figuras 24 y 25 son integradas usando este módulo, desplegando los mecanismos en forma de *beachballs* con sus respectivos ejes principales, y proyectados sobre la topografía del relieve en la región. De esta manera la información analizada es visualizada con diferentes perspectivas.



**Figura 24.-** Mecanismos focales visualizados con el software ArcScene de ESRI®, se puede apreciar una proyección a profundidad de ellos y su relación con la topografía. Las líneas rojas representan las principales fallas registradas. Se observan dos especies de familias (flechas azules), una al suroeste con la mayoría de mecanismos de tipo inverso; en la

parte central una combinación de normales e inversos, algunos con componentes laterales, y hacia el noroeste otra familia de mecanismos de tipo inverso. Además se observan a lo largo de la trinchera algunas alineaciones de los mecanismos en dirección NE-SW.

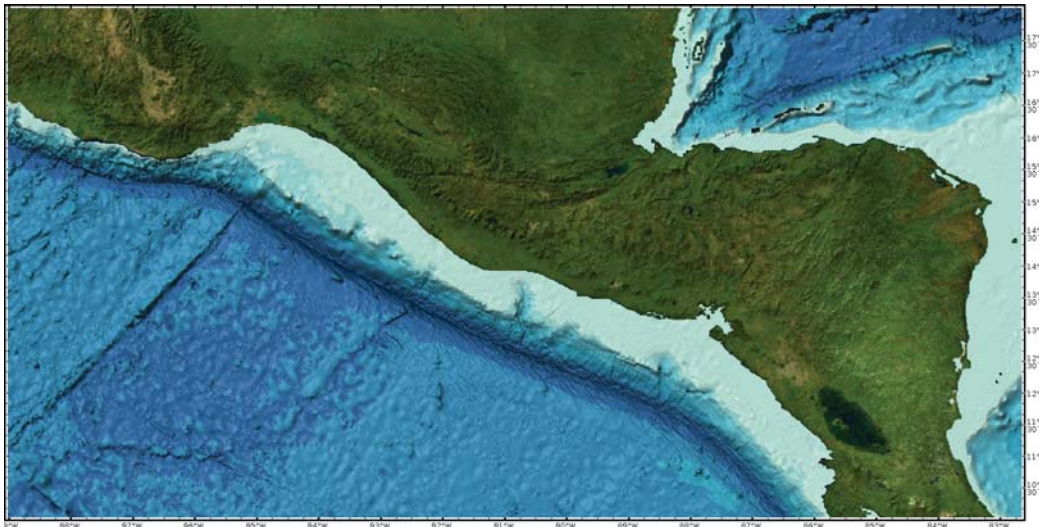


**Figura 25.-** Mecanismos focales totales (arriba) y sus respectivos ejes P (negro), T (blanco) y N (colores), (abajo), de la zona de estudio hasta una profundidad mayor a 200 km, visualizados con el software ArcScene de ESRI®. Se utilizó una exageración vertical de 5x. Se observa la subducción de la placa de Cocos la cual tiene un ángulo de inclinación mayor que en la Faja Volcánica Transmexicana. Mientras que los ejes muestran cambios de dirección interesantes a diferentes profundidades.

## 3.2 - Batimetría

Los datos de batimetría contribuyen a conocer las formas del relieve del piso oceánico, las cuales pueden ser obtenidas a través de mediciones satelitales con resoluciones espaciales de estructuras no menores de 500 m en ciertas regiones, o también por medio de ecosondas montadas en los cascos de los buques oceanográficos, con resoluciones espaciales de varios metros en estructuras profundas. Desafortunadamente la región de estudio tiene muy pocos datos marinos adquiridos con ecosondas. A falta de estudios detallados en la región, la revisión de información batimétrica es derivada de la base de datos del *National Geophysical Data Center* (NGDC) y del *General Bathymetric Charts of the Ocean* (GEBCO), las cuales son de acceso libre e incluyen datos de campañas oceanográficas realizadas por diferentes buques de investigación. Además, estas bases digitales proveen información de la topografía en la región de estudio.

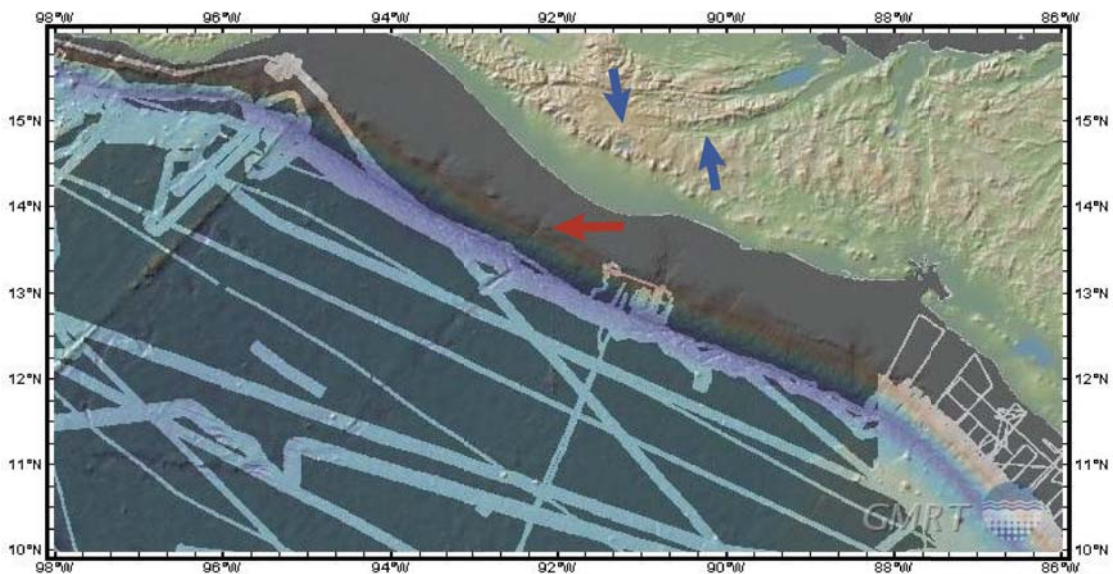
La Figura 26 muestra el relieve batimétrico de la base de datos mencionada, con una resolución de 15'' de arco (500 m entre cada valor aproximadamente), y aunque su resolución no es la más óptima, es de notarse que es marcada por las estructuras principales, como la Dorsal de Tehuantepec y las fallas Polochic y Motagua. Y se puede proyectar en 3D para inspeccionar visualmente en una perspectiva tridimensional.



**Figura 26.-** Batimetría recopilada de la base de GEBCO, con una resolución de ~500 m entre cada pixel. Se logra observar la Dorsal de Tehuantepec, el sistema de fallas Polochic-Motagua, se distingue la Trinchería Mesoamericana, entre otras estructuras.

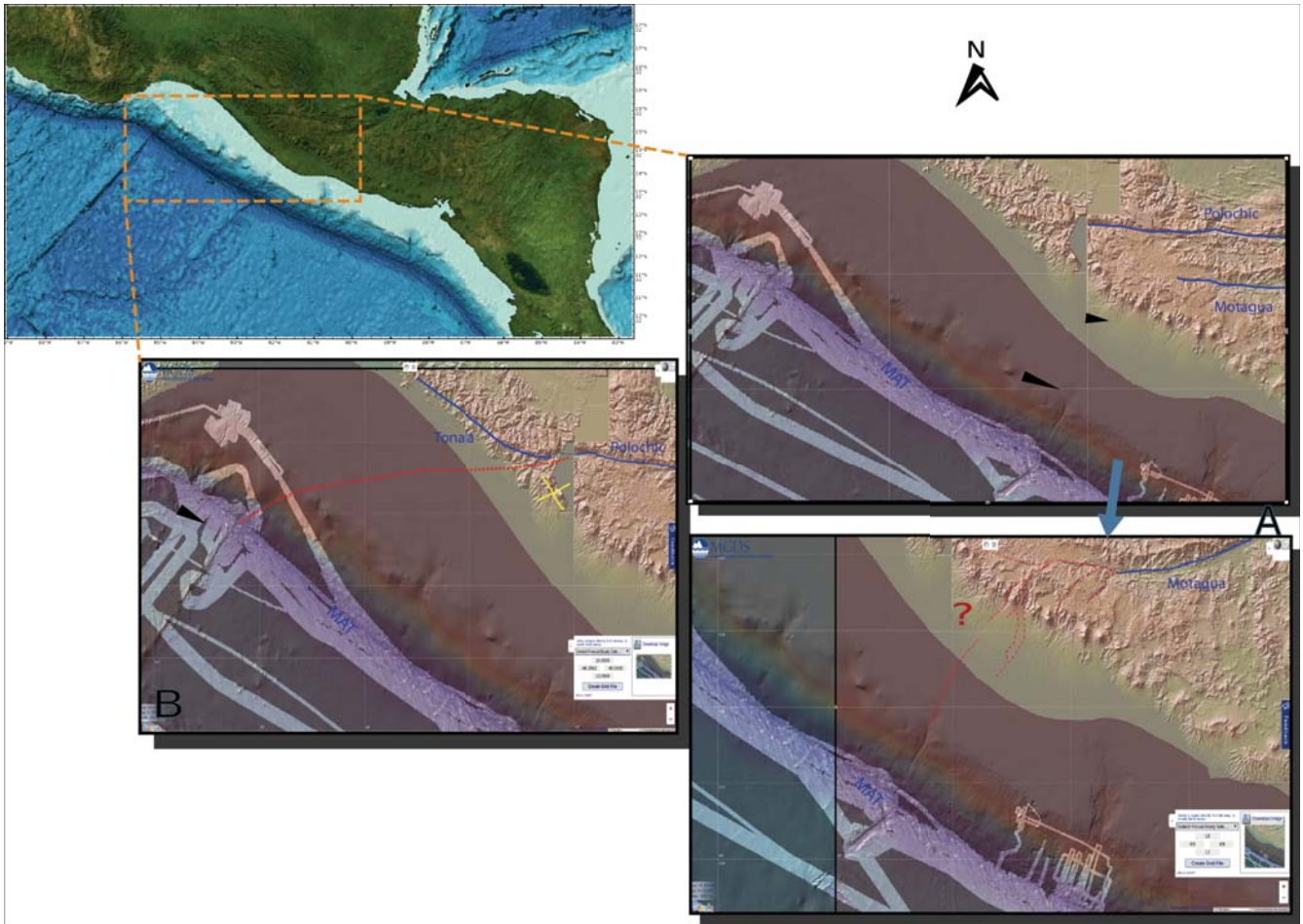


El *Global Multi-Resolution Topography* (GMRT) [Ryan *et al.*, 2009], es un proyecto que involucra varias bases de datos tanto marinas como satelitales para crear un modelo digital de elevaciones mundial de manera libre, ya sea todo el contenido o alguna parte en específico, y sobre éste, se pueden cargar datos de geofísica marina. La Figura 27 muestra tanto la topografía como los barridos laterales de batimetría multihaz que se han realizado en la zona de estudio, obtenidos del GMRT. Esta recopilación topográfica y batimétrica del relieve terrestre es inspeccionada a detalle para poder identificar estructuras que pudiesen coincidir con los lineamientos de sismos mostrados en la Figura 18, que se localizan si se observa con cuidado, perpendiculares a la falla Motagua (flecha roja), en dirección NE-SW sobre la plataforma continental y mar a dentro. El detalle batimétrico en la plataforma continental de esta figura muestra algunas trazas de estructuras que podrían ser cañones submarinos o drenajes de ríos; sin embargo, la resolución especial no permite afirmarlo, por lo que si alguna falla preexiste a estas estructuras, tampoco es posible definirla.



**Figura 27.-** En la parte Este de la cuenca de Guatemala se aprecia en una zona de fracturamiento en dirección NE-SW y que se extiende sobre la plataforma continental hasta la Trinchera Mesoamericana (flecha roja), pareciera unirse a la falla Motagua (flechas azules) en su parte occidental, sin embargo, no se tiene la información que sustente ese hecho.

Actualmente los modelos digitales de elevación (DTM) como el GMRT tienen una buena resolución y estos modelos presentan rasgos estructurales a analizar. Utilizando el paquete *Virtual Ocean*®, la Figura 28 enfoca la region de estudio en cuadrantes para examinar estructuras que no se habían revisado, con otra perspectiva de lo que se había pensado anteriormente.



**Figura 28.-** Imágenes del relieve topográfico y batimétrico en la región de estudio dividida por regiones. En A (arriba) se muestran las fallas Motagua y Polochic en azul. Las flechas negras señalan una estructura (cañon submarino) que parece extenderse desde el continente. En A (abajo) se puede observar la posible ramificación (drenajes) de la falla Motagua (líneas discontinuas rojas). La Trinchera es mostrada con la batimetría disponible de las bases de datos. En B, la falla Polochic continúa sobre la zona de cizalla Tonalá (líneas azules) mientras que no se observa evidencia en el relieve marino (cruz amarilla) que se extiende sobre la fractura de Tehuantepec (línea roja discontinua).

El cuadrante A en la Figura 28 muestra el primer escenario en la parte central de la región, el cual muestra claramente el límite de la falla Motagua, su trayectoria desde una dirección NE hacia el SW hasta tener una traza paralela al margen del continente, y justo hacia el mar en este segmento es identificado el lineamiento con dirección NE-SW. En el segundo escenario la Figura 28 parte B, muestra la traza de la falla Polochic en color azul, y el lineamiento de la cizalla Tonalá en dirección NW-SE parecen unirse hacia un área más cercana al Golfo de Tehuantepec, como lo han sugerido algunos autores (e.g., De Cserna, 1958; Muehlberger and Ritchie, 1975; Plakfer, 1976); sin embargo, la topografía de esta base de datos en esta zona no es muy clara para ser conclusiva de esta propuesta.

Mientras en el sector marino, al sur de este posible escenario existen muy pocos datos para sustentar la posible extensión de la falla Polochic hasta la zona donde intersecta la Dorsal de Tehuantepec con la trinchera de la zona de subducción Mesoamericana.

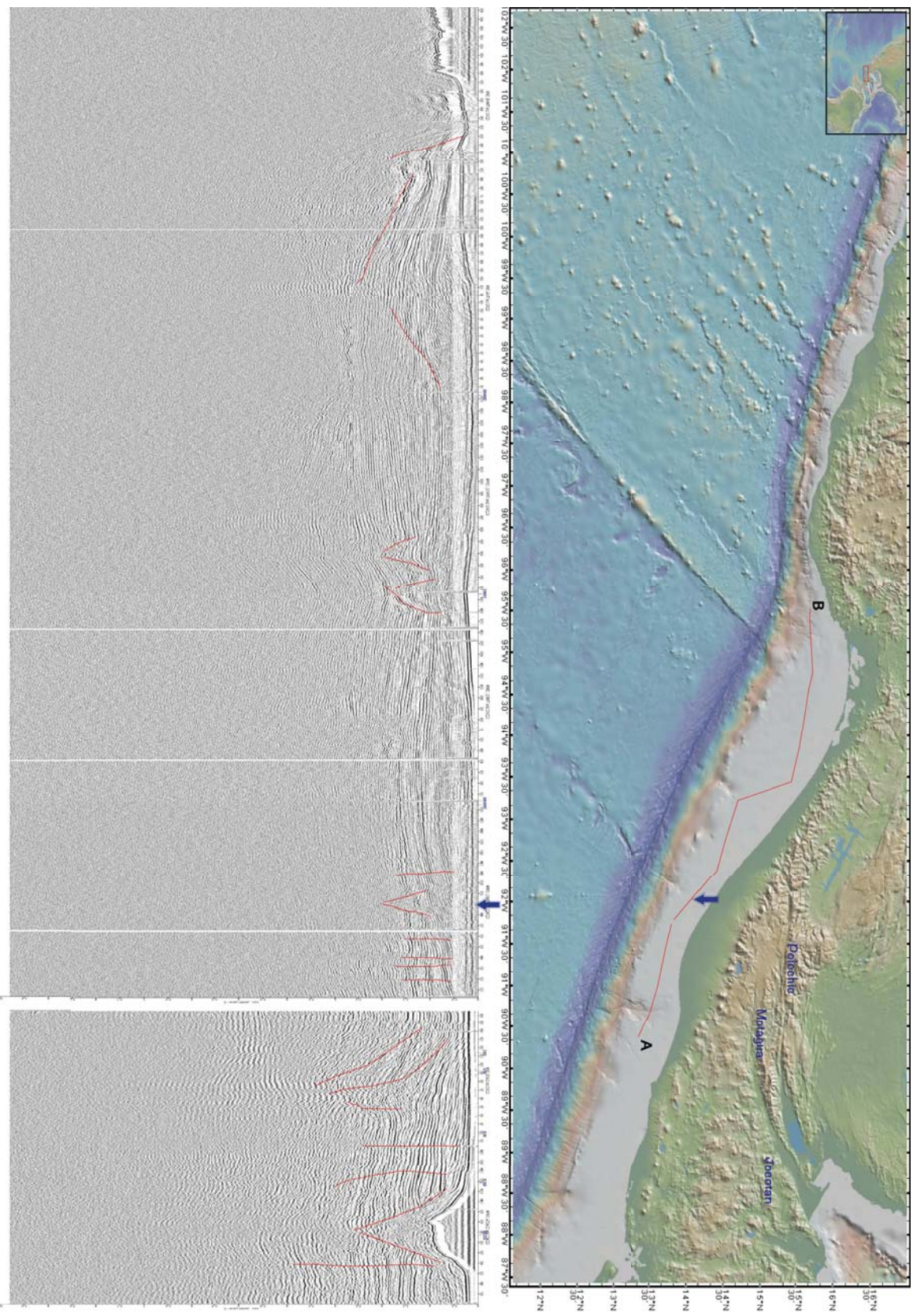
### ***3.3 - Reflexión Sísmica***

Otros datos marinos examinados son las secciones de reflexión sísmica multicanal, que al igual que la batimetría aportan un poco de información de la zona de estudio. Los pocos perfiles sísmicos de la región marina proveen no muy clara evidencia de alguna falla mayor que disturbe la columna de sedimentos en el margen continental, pero es notable un cambio estructural de la estratificación sonora de un extremo al otro extremo del margen.

Algunas secciones sísmicas revisadas provienen de [David A. Ross and George G. Shor Jr., 1965], las cuales muestran estratificación horizontal, algunos pliegues y zonas de deformación pero no alguna falla que corte los sedimentos. En la zona de plataforma del Pacífico en el Golfo de Tehuantepec, los perfiles de reflexión sísmica no revelan alguna continuación de la falla Polochic hacia alta mar [Keppie and Morán-Zenteno, 2005], y solo existe una secuencia ligeramente deformada de sedimentos marinos, cuya edad varía desde el Cretácico Tardío hasta el Holoceno [Sánchez Barreda, 1981]. Y en la tesis de maestría de Sergio Romahn [2004], es evidenciada en la parte oeste del Golfo de Tehuantepec, la presencia de fallas activas principalmente de tipo transcurrente, así como zonas importantes de derrumbes y cañones submarinos.

La Figura 29 muestra uno de los perfiles obtenidos que cruza la zona de interés. El perfil llamado IG2902 recopilado por J.L. Worzel & J. Ladd en 1976, proviene de la base de datos *LDEO & UTIG MCS* y está compuesto de varias secciones (GUA35A, GUA35B, TRM01, TRM02, TRM03, TRM04A y TRM04B) que se han acomodado de acuerdo a su posición de adquisición. Este perfil es paralelo a la costa y está aproximadamente a 40 km de ella sobre la plataforma continental. El perfil IG2902 inicia en A, con la sección GUA35A y termina en B con la sección TRM04B. La campaña oceanográfica llamada *Tectonic framework of the caribbean sea phase I* de la cual proviene este perfil generó más secciones sísmicas, pero sólo se utilizaron los de relevancia para la realización de esta investigación. El anexo campañas oceanográficas detalla la información de la campaña mencionada.





**Figura 29.-** El perfil IG2902 (en rojo) se puede encontrar en la base de datos internacional. El perfil tiene una discontinuidad, y es por eso que se presentan dos secciones separadas entre A y B. Las líneas rojas en las secciones sísmicas marcan la traza de algunas fallas. Las flechas azules señalan una deformación en los sedimentos y su ubicación en el perfil respectivamente.

Las líneas rojas señalan la traza de algunas fallas que son observadas en las secciones sísmicas, sin embargo, no hay evidencia de alguna falla mayor que corte a los sedimentos hasta la superficie o a profundidad y que indique relación con el sistema Polochic-Motagua. Las secciones muestran deformación en los sedimentos en algunas zonas aunque están en su mayoría a profundidad y no son observables en la superficie del lecho marino, debido a la escasa información que se tiene.

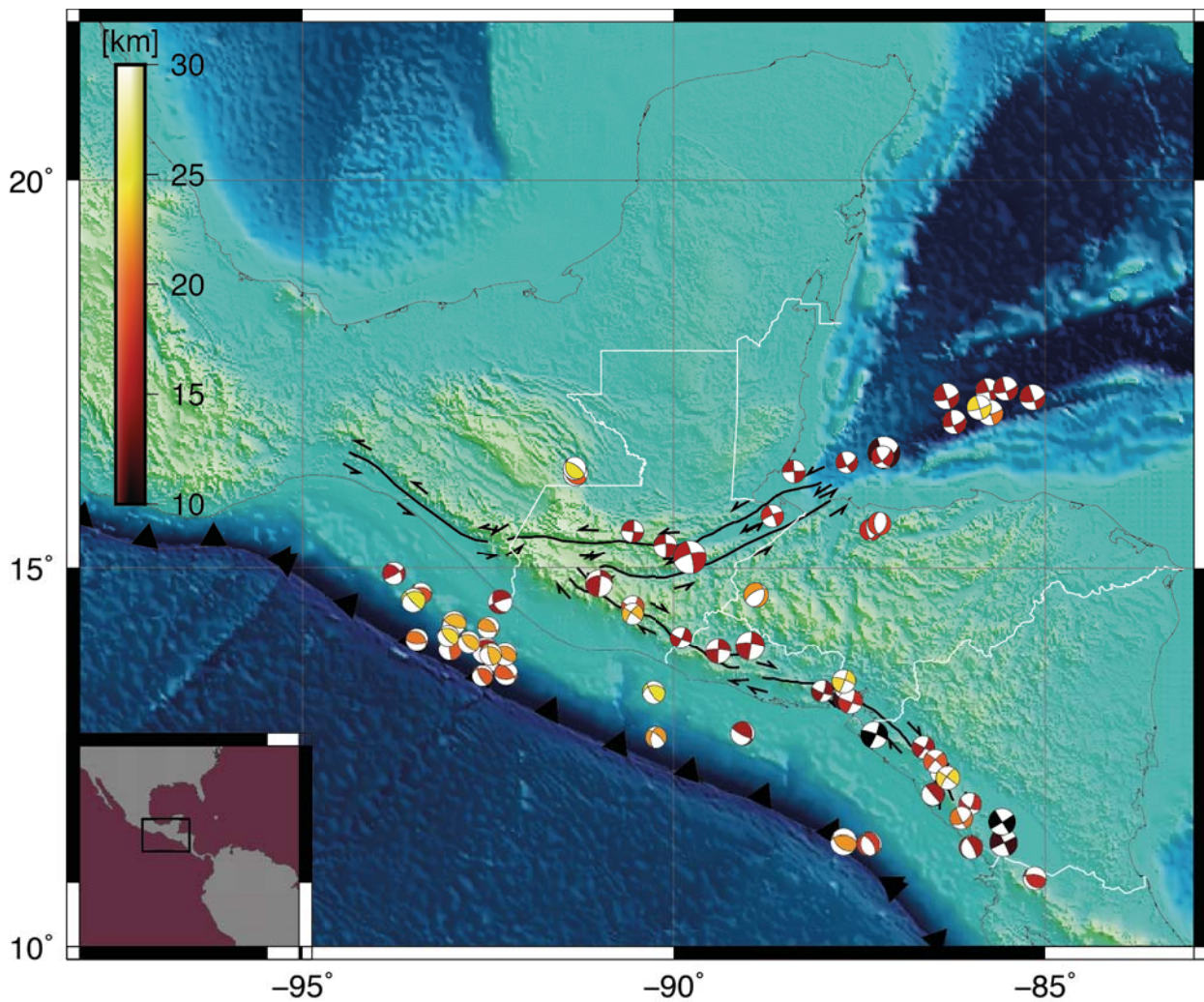
El perfil muestra una deformación (flecha color azul), que acuña a los sedimentos a profundidad, mientras que en superficie no se logra observar evidencia de esa deformación. Este rasgo es señalado en el perfil (flecha azul) y coincide con el cañon submarino mencionado en la Figura 29; sin embargo, no se tienen los datos suficientes para afirmar o descartar que sea la traza de una posible falla asociada a la continuidad de la falla Motagua hacia la parte marina.

# *CAPÍTULO IV - DISCUSIÓN*

El límite entre las placas de Caribe y Norte América ha generado un importante debate desde hace algunos años. Se han propuesto diferentes modelos [e.g., Guzmán-Speziale and Meneses-Rocha, 2000; Andreani *et al.*, 2008; Authemayou *et al.*, 2011] que tratan de explicar hacia dónde se extiende este límite, su deformación asociada, su relación con el punto triple CA-CO-NA, entre otras cuestiones; sin embargo, no se ha encontrado un modelo general que se apegue a todas las observaciones, por lo que la discusión sigue en debate [e.g., Burkart 1983; Authemayou *et al.*, 2011]. La extensión de este límite, en particular de la falla Polochic llegando hasta la Trinchera Mesoamericana en el Golfo de Tehuantepec es lo que se había tomado como lo más aceptable y actualmente, que su continuación siga la dirección NW-SE paralela a la estructura del batolito de Chiapas que toma la zona de cizalla Tonalá.

En otro planteamiento, Ortega *et al.* [2006], propone que la falla Polochic tiene la forma difusa como una “cola de caballo”, es decir, que no tiene una dirección preferencial. En los resultados mostrados, la falla Motagua parece tener una situación similar, de acuerdo al modelo del terreno de [Ryan *et al.*, 2009] analizado en el presente trabajo; ya que podría seguir la tendencia de varios sismos en dirección NE-SW, misma que coincide con algunas estructuras observadas en la batimetría del margen continental como algunos cañones submarinos. Pero por otro lado, podría ser solo el drenaje de algunos ríos y no alguna falla activa. Como se mencionó anteriormente, la sismicidad en esta zona tiene grandes errores de localización, por lo que hablar de alineaciones de sismos podría ser incorrecto. Por el momento, esta sismicidad es carente de estimaciones de los posibles mecanismos focales asociados a estas estructuras, pero se tienen varios mecanismos focales someros que presentan pequeñas componentes laterales en dirección NE-SW y otros casi E-W en esa zona de interés; sin embargo, no es clara la continuación de alguna estructura hacia la parte marina con la información geológica y tectónica que se tiene. Por otro lado, en otras regiones cercanas a la trinchera también se observan mecanismos focales con componentes laterales de sismos someros (Figura 30), pero no es una condición única de la zona de interés, por lo que no es posible sustentar la extensión marina del límite CA-NA por la presencia de algunos mecanismos focales que tienen estas pequeñas componentes laterales.





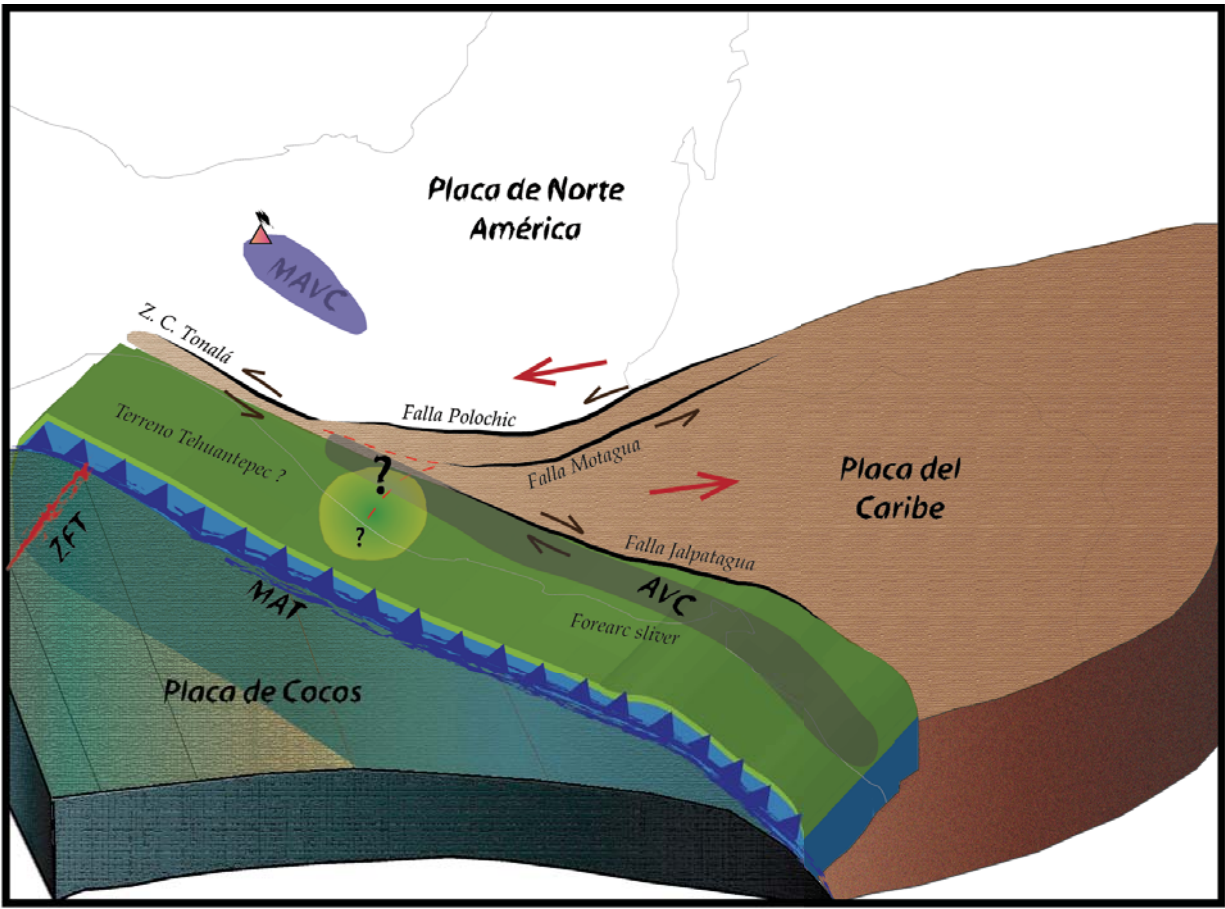
**Figura 30.-** Mecanismos focales someros (hasta 25 km) con componentes laterales de deslizamiento. El color de las “Beach balls” corresponde a la profundidad y su tamaño a la magnitud. Las líneas negras representan las fallas mayores registradas y las flechas su dirección de desplazamiento. La cantidad de mecanismos utilizados no permite un mejor análisis.

La revisión de batimetría proviene de bases de datos internacionales y carece de la resolución espacial para identificar estructuras con dimensiones menores a los 500 m. También esta base de datos tiene muy poca cobertura, por lo cual no es posible definir si existen rasgos estructurales asociados a la interacción de las placas involucradas en el margen continental frente a las costas de los estados de Oaxaca y Chiapas, como también en el lado de Guatemala.

Por otra parte, en algunas secciones sísmicas monocanal de [David A. Ross and George G. Shor Jr., 1965] son observadas zonas de deformación y pliegues, mientras que los perfiles de reflexión sísmica multicanal de [Ladd *et al.*, 1978; Ladd, J. W. and Schroder, S., 1985], muestran principalmente un

fallamiento de tipo normal y semi-vertical, aunque estas fallas parecen estar relacionadas a la subducción de la placa de Cocos. Los sedimentos del margen continental cercano a la costa presentan una estratificación horizontal de origen reciente, y a su vez, no muestran alguna falla que los corte o que pudiese sustentar la extensión del límite Caribe-Norte América. En estas secciones sísmicas, es también resaltada una cuña deformada a profundidad (Figura 29), que podría estar relacionada a un cañon submarino y/o posiblemente a alguna falla mayor. Esta deformación es mostrada en una zona sombreada (Figura 31); sin embargo, la falta de datos no permite afirmar tal hipótesis.

Por otro lado, con el análisis de los mecanismos focales y los epicentros, es observada una separación de la placa del Caribe en la posible unión de la falla Jalpatagua y la zona de cizalla Tonalá, con direcciones de deslizamiento contrarias (Figura 31), lo que podría suponer la existencia de un bloque aislado de la placa, como el llamado Terreno Tehuantepec [Pindell *and* Kennan 2009], unido al forearc sliver propuesto por DeMets [2001], lo que estaría generando una deformación en lo que pudiese dar continuación a la falla Motagua en la parte marina del continente. Así mismo, la evolución de la ZFT está relacionada con el origen del MAVC [Manea *and* Manea, 2008], por lo que la deformación interna del punto triple estaría migrando hacia el NW, en la misma dirección del arco, y posiblemente en rotación como lo propuesto por [Authemayou *et al.*, 2011].



**Figura 31.-** Esquema del escenario tectónico de la región de estudio. MAT, Trinchera Mesoamericana (color púrpura); MAVC, Moderno Arco Volcánico Chiapaneco; AVC, Arco Volcánico Centroamericano; ZFT, Zona de Fractura de Tehuantepec. Las flechas color marrón representan la dirección de deslizamiento de las fallas. Se muestra la falla Jalpatagua en una dirección y la zona de cizalla Tonalá en dirección contraria. Las flechas rojas indican el movimiento relativo entre las placas de Caribe y Norte América. El bloque verde-azul es el fore-arc sliver de Demets [2001]. Las líneas rojas discontinuas representan la posible trayectoria de la falla Motagua. La circunferencia sombreada indica una zona de deformación poco estudiada.

# *CAPÍTULO V - CONCLUSIONES*

De acuerdo a la recopilación de modelos geológicos en el trabajo de Authemayou *et al.*, [2011], y la revisión que se hizo en la presente tesis, se concluye que aún no se tienen los datos suficientes para proponer un modelo tectónico general que sea aceptado por la comunidad científica.

El análisis realizado con los datos disponibles permite proponer que el límite entre las placas de Caribe y Norte América no parece seguir una tendencia clara hacia la parte marina para validar que se une a la dorsal de Tehuantepec, como lo mencionan [e.g. Plakfer, 1976; Anderson and Schmidt, 1983; Burkart and Self, 1985; Pindell *et al.*, 1988; White and Harlow, 1993; Schaaf *et al.*, 1995]; sin embargo, en la parte oeste de la falla Motagua es mostrada una posible ramificación de su continuación aunque no logra observarse alguna evidencia de su presencia en el piso oceánico. Sólo de los perfiles sísmicos de Ladd *et al.*, [1978], es posible notar una zona de deformación en los sedimentos que pudiese estar relacionada a esta falla. Mientras que de los datos de GPS, la deformación se vuelve mínima en la frontera México-Guatemala [Lyon- Caen *et al.*, 2006; Franco *et al.*, 2012].

La fractura de Tehuantepec juega un papel importante en la convergencia entre Caribe, Cocos y Norte América [Pardo y Suárez, 1995], y sus efectos no se han implementado en los modelos geológicos propuestos. Algunas áreas de la interfase entre CO-NA, y CO-CA no presentan sismicidad en profundidad mientras que otras si, lo que sugiere que no hay continuidad en la acumulación de esfuerzos, por lo que factores como el cambio de velocidad, de ángulo de subducción, edad de la placa del lado sureste de la fractura de Tehuantepec, y la evolución del MAVC del lado noroeste, están asociados a esta tectónica, y en consecuencia, hay que tener estos datos en cuenta en el modelaje.

La falta de datos en esta región, sugiere la obtención de mediciones de GPS en continente, así como la realización de campañas oceanográficas que aporten información de cómo es la morfología del relieve del lecho marino. También, estas expediciones aportarían perfiles de reflexión sísmica de alta resolución para obtener mayor detalle de las estructuras someras presentes en la región de estudio. La cobertura de información sismológica de la red del Servicio Sismológico Nacional es limitada al momento. Esto nos restringe el cálculo de los mecanismos focales de sismos menores. En ese sentido, el aplicar una metodología para obtener mecanismos focales de sismos con magnitudes  $M_w$  menores a 4.5, podría dar una mayor cobertura sísmica que aportaría otras interpretaciones geológicas.



# ***BIBLIOGRAFÍA***

- Alvarado D, DeMets C, Tikoff B, Hernández D, Wawrzyniec TF, Pullinger C, Mattioli G, Turner HL, Rodríguez M, Correa-Mora F., (2011). Forearc motion and deformation between El Salvador and Nicaragua: GPS, seismic, structural, and paleomagnetic observations. *Lithosphere* 3:3–21. doi:10.1130/L108.1
- Ambraseys, N.N., Adams, R.D., (1996). Large-magnitude Central American earthquakes, 1898–1994. *Geophysical Journal International* 127, 665–692.
- Anderson, T. H., and Schmidt, V.A., (1983). The evolution of Middle America and the Gulf of Mexico-Caribbean Sea region during Mesozoic time: *Geological Society of America Bulletin*, v. 94, p. 941-966.
- Andreani, L., Le Pichon, X., Rangin, C., Martínez-Reyes, J., (2008). The southern Mexico block: main boundaries and new estimation for its Quaternary motion. *Bulletin de la Société Géologique de France* 179, 209–223.
- Authemayou, C., Brocard, G., Teyssier, C., Simon-Labric, T., Guttierrez, A., Chiquin, E.N., Moran, S., (2011). The Caribbean–North America–Cocos triple junction and the dynamics of the Polochic–Motagua fault systems: pull-up and zipper models. *Tectonics* 30, TC3010. <http://dx.doi.org/10.1029/2010TC002814>.
- Bandy, W.L., Hilde, T W.C., and Yan, C.-Y., (2000). The Rivera-Cocos boundary: Implications for Rivera-Cocos relative motion and plate fragmentation, in Delgado-Granados, H., Aguirre-Díaz, G., and Stock, J. M., eds., *Cenozoic Tectonics and Volcanism of Mexico: Boulder , Colorado, Geological Society of America Special Paper* 334.
- Beccaluva, L., Bellia. S., Coltorti, M., Dengo, G., Giunta, G., Mendez, J., Romero, J., and Siena, F., (1995). The northwestern border of the Caribbean Plate in Guatemala: new geological and petrological data on the Motagua ophiolitic belt: *Ophioliti*, v. 20, p. 1-15.

- Bellon, H., Maury, R. C., Stephan, J. F., (1982). Dioritic basement, site 493: petrology, geochemistry, and geodynamics: Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, LXVI, 723-731.
- Bonis, S.B., Bohnenberg, O.H., Dengo, G., (1970). Mapa Geológico de la República de Guatemala, Escala 1:500,000.
- Burbach, G.V., Frohlich, C., Pennington, W.D., Matumoto, T., (1984). Seismicity and tectonics of the subducted Cocos Plate. *J. Geophys. Res.* 89, 7719±7735.
- Burkart, B., (1978). Offset across the Polochic fault of Guatemala and Chiapas, Mexico, *Geology*, 6, 328–332, doi:10.1130/0091-7613(1978)6<328:OATPFO>2.0.CO;2.
- Burkart, B., (1983). Neogene North America–Caribbean plate boundary across northern Central America: offset along the Polochic fault. *Tectonophysics* 99, 251–270. [http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951\(83\)90107-5](http://dx.doi.org/10.1016/0040-1951(83)90107-5).
- Burkart, B., and Self., (1985). Extension and rotation of crustal blocks in northern Central America and effect on the volcanic arc: *Geology*, v. 3, p. 22-26.
- Burkart, B., B. C. Deaton, and G. Moreno., (1987). Tectonic wedges and off-set Lamaride structures along the Polochic fault of Guatemala and Chiapas, Mexico: Reaffirmation of large Neogene displacement, *Tectonics*, 6, 411–422, doi:10.1029/TC006i004p00411.
- Blanchet, Rene., (1979). Posición tectónica de México dentro del marco de la teoría de placas: México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Evolucion Tectónica de México, Simposio, Programa y Resúmenes, p. 9 (resumen).
- Bravo, H., Rebollar, C.J., Uribe, A., Jimenez, O., (2004). Geometry and state of stress of the Wadati–Benioff zone in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Journal of Geophysical Research* 109 (B04307). <http://dx.doi.org/10.1029/2003JB002854> (14 pp.).
- Campa, M. F., Coney, P. J., (1983). Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20, 1040-1051.



- Canora C, Villamor P, Martínez-Díaz JJ, Berryman KR, Álvarez-Gómez JA, Capote R, Hernández W., (2012). Paleoseismic analysis of the San Vicente segment of the El Salvador Fault Zone, El Salvador, Central America. *Geol Acta* 10:103–123
- Carfantan, J. C., (1976). El prolongamiento del sistema de fallas Polochic-Motagua en el sureste de México; una frontera entre dos provincias geológicas, Paper presented at III Congreso Latino Americano de Geología, Acapulco, Mexico.
- Correa-Mora F, DeMets C, Alvarado D, Turner HL, Mattioli GS, Hernandez D, Pullinger C, Rodriguez M, Tenorio C., (2009). Evidence for weak coupling of the Cocos plate subduction interface and strong coupling of the volcanic arc faults from modeling of GPS data: El Salvador and Nicaragua. *Geophys J Int* 179:1279–1291
- Cronin, V.S., (2010). A primer on focal mechanism solutions for geologists. Science Education Research Center, Carleton College.  
[http://serc.carleton.edu/files/NAGTWorkshops/structure04/Focal\\_mechanism\\_primer.pdf](http://serc.carleton.edu/files/NAGTWorkshops/structure04/Focal_mechanism_primer.pdf)
- David, A. Ross and George, G. Shor, Jr., (1965). Reflection profiles across the Middle America Trench. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 70, No. 22, 5551-5572.
- Dean, B. W. and Drake, C. L., (1978). Fochal mechanisms solutions and tectonics of the Middle America Arc. *J. Geol.* 86: 111-128.
- De Cserna, Z., (1958). Notes on the tectonics of southern Mexico, in *Habitat of Oil*; Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, p. 523-532.
- DeMets, C., (1990). Current plate motions. *Geophysycal Journal International*. 101(2):425-478. doi 10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x
- DeMets C., Gordon R. G., Argus D.F., Stein S., (1994). Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal timescale, *Geophys. Res. Lett.*, 21, 2191-2194.

- DeMets C., (2001). A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4043-4046, doi:10.1029/2001GL013518.
- Dengo, C. A., (1982). Structural analysis of the Polochic fault zone in western Guatemala, Central America, Ph.D. thesis, 270 pp., Tex. A&M Univ., College Station.
- Dewey, J. W. and G. Suarez., (1991). Seismotectonics of Middle America. In: *Neotectonics of North America*; Slemmons, D. B., Engdahl, E. R. Zoback, M. D. and Blackwell, D. D. eds. Boulder Colorado, Geological Society of America, Decade Map Volume 1, 309-321.
- Donnelly, T. W., G. S. Horne, R. C. Finch, and E. Lopez-Ramos., (1990). Northern Central America; the Maya and Chortís blocks, in *The Geology of North America*, vol. H, The Caribbean Region, edited by G. Dengo and J. E. Case, pp. 37–76, Geol. Soc. of Am., Boulder, Colo.
- Duffield WA, Heiken GH, Wohletz KH, Maasen LW, Dengo G, Mckee EH, Castaneda O., (1992). Geology and geothermal potential of the Tecuamburro volcano area, Guatemala. *Geothermics* 21:425–446. doi:10.1016/0375-6505(92) 90001-P
- Dziewonski, A. M., T.-A. Chou and J. H. Woodhouse., (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity, *J. Geophys. Res.*, 86, 2825-2852. Doi:10.1029/JB086iB04p02825.
- Finch, R. C., and A. W. Ritchie., (1991). The Guayape fault system. Honduras, Central America. *Journal of South American Earth Sciences*. 4:43-60.
- Fernando Ortega-Gutiérrez , Luigi A. Solari , Carlos Ortega-Obregón , Mariano Elías-Herrera , Uwe Martens , Sergio Morán-Icál , Mauricio Chiquín , John Duncan Keppie , Rafael Torres De León & Peter Schaaf., (2007). The Maya-Chortís Boundary: A Tectonostratigraphic Approach, *International Geology Review*, 49:11, 996-1024, DOI: 10.2747/0020-6814.49.11.996

- Franco, A., E. Molina, H. Lyon-Caen, J. Vergne, T. Monfret, A. Nercessian, S. Cortez, O. Flores, D. Monterosso, and J. Requena., (2009). Seismicity and crustal structure of the Polochic-Motagua fault system area (Guatemala), *Seismol. Res. Lett.*, 80, 977–984, doi:10.1785/gssrl.80.6.977.
- Franco A, Lasserre C, Lyon-Caen H, Kostoglodov V, Molina E, Guzman-Speziale M, Monterosso D, Robles V, Figueroa C, Amaya W, Barrier E, Chiquin L, Moran S., (2012). Fault kinematics in northern Central America and coupling along the subduction interface of the Cocos Plate, from GPS data in Chiapas (Mexico), Guatemala and El Salvador. *Geophys J Int* 189:1223–1236. doi:10.1111/j.1365-246X.2012.05390.x
- Frohlich, C., (1992). Triangle diagrams ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms. *Phys. Earth Planet Inter*, 75, 193-198.
- Frohlich, C. and Apperson, K. D., (1992). Earthquake focal mechanisms, moment tensors, and the consistency of seismic activity near plate boundaries, *Tectonics*, 11, 279-296.
- García-Palomo A., Macías J. L., Espindola J. M., (2004). Strike-slip faults and K-Alkaline volcanism at El Chichón volcano, southeastern Mexico. *J Volcanol Geotherm Res* 136:247– 268.
- Garduño-Monroy, V. H., Macias, J. L., Molina Garza, R. S., (2015). Geodynamic setting and pre-volcanic geology of active volcanism in Chiapas. Book, *Active volcanoes of Chiapas (México): El Chichón and Tacaná*, Springer, Teresa Scolamacchia, José Luis Macías, Editors.
- Giunta, G., Beccaluva, L., Coltorti, M., Cutrupia, D., Dengo, C., Harlow, G. F., Mota, B., Padoa, E., Rosenfeld, J., and Siena, F., (2002). The Motagua suture zone in Guatemala. Field trip guide-book of the IGCP 433 Workshop and 2nd Italian-Latin American Geological Meeting “In memory of Gabriel Dengo”: *Ofioliti*, v. 27, p. 47-72.
- Gordon, M. B., and W. R. Muehlberger., (1994). Rotation of the Chortís block causes dextral slip on the Guayape fault, *Tectonics*, 13, 858–872, doi:10.1029/94TC00923.

- Guzmán-Speziale M., Pennington W.D., Matumoto T., (1989). The triple junction of the North America, Cocos and Caribbean plates: Sismicity and Tectonics, *Tectonics*, 8, 981-997.
- Guzmán-Speziale, M., and J. J. Meneses-Rocha., (2000). The North America- Caribbean plate boundary west of the Motagua-Polochic fault system: A fault jog in southeastern Mexico, *J. South Am. Sci.*, 13, 459–468, doi:10.1016/S0895-9811(00)00036-5.
- Guzmán-Speziale, M., (2001). Active seismic deformation in the Grabens of northern Central America and its relationships to the relative motion of the northern Central America–Caribbean plate boundary, *Tectonophysics*, 337, 39–51, doi:10.1016/S0040-1951(01)00110-X.
- Guzmán-Speziale, M., (2009). A seismotectonic model for the Chortis block, in *The Origin and Evolution of the Caribbean Plate*, edited by K. H. James et al., *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 328, 197–204, doi:10.1144/ SP328.9.
- Guzmán-Speziale, M., (2010). Beyond the Motagua and Polochic faults: Active strike-slip faulting along the western North America-Caribbean plate boundary zone, *Tectonophysics*, 496, 17–27, doi:10.1016/j.tecto. 2010.10.002.
- Guzmán-Speziale, M., (2014). Sismicidad y fallamiento activo en Chiapas, México. Implicaciones para el límite de placas Norte América- Caribe. Reunión Anual UGM. GEOS: v. 34, resumen 0381.
- Hernandez Santana, José R.; Ortiz Perez, Mario A. y Zamorano Orozco, José J., (1995). Regionalización morfoestructural de la Sierra Madre del Sur, México. *Invest. Geog [online]*., n.31, pp.45-67. ISSN 2448-7279.
- Heubeck, C., and Mann, P., (1991). Geologic evolution of plate cinematic models for the North American plate boundary zone: *Tectonophysics*, v. 191, p. 1-26.
- Iturralde-Vinent, M.A. y E.G. Lidiak (2006). Foreword. *Caribbean Tectonic, magmatic, metamorphic*



and stratigraphic events. Implications for Plate Tectonics. In Iturralde-Vinent, M.A. y E.G. Lidiak, Eds. Caribbean Plate Tectonics. Stratigraphy, Magmatic, Metamorphic and Tectonic Events. UNESCO/IUGS -IGCP Project 433. *Geologica Acta* 4(1-2):1-5.

J. M. Lees., (2000). Geotouch: Software for three and four dimensional GIS in the earth sciences. *Comput- ers and Geosciences* , 26(7):751–761.

Keith A. Labay, Peter J. Haeussler., (2007). 3D Visualization of earthquake focal mechanisms using ArcScene. U. S. Geological Survey, Data Series 241, Version 1.1.

Keppie, J. D., and J. D. Morán-Zenteno., (2005). Tectonic implications of alternative Cenozoic reconstructions for southern Mexico and the Chortís block, *Int. Geol. Rev.*, 47, 473–491, doi:10.2747/0020-6814.47.5.473.

Ladd, J. W., Ibrahim, A. K., McMillen, K. J., Latham, G. V., von Huene, R. E., Watkins, J. S., Moore, J. C, and Worzel, J. L., (1978). Tectonics of the Middle America Trench, offshore Guatemala. *Intern. Symp Guatemala 4 Feb. Earthquake and Reconstruction Process*, Guatemala City.

Ladd, J.W., Schroder, S., (1984). Seismic stratigraphy of the continental shelf offshore Guatemala: implications for vertical tectonics related to subduction. In: von Huene, R., Aubouin, J., et al. (Eds.), *Init Repts. : DSDP, 84*. U.S. Govt. Printing Office, Washington, pp. 879–893.

La Femina, P. C., T. H. Dixon, and W. Strauch., (2002). Bookshelf faulting in Nicaragua, *Geology*, 30, 751–754, doi:10.1130/0091-7613(2002) 030<0751:BFIN>2.0.CO;2.

Lapierre, H., *et al.*, (con catorce coautores), (2000). Multiple plume events in the genesis of the peri-Caribbean Cretaceous oceanic plateau province: *Journal of Geophysical Research*, No. B4, v. 105, p. 8403-8421.

Lyon-Caen H, Barrier E, Lasserre C, Franco A, Arzu I, Chiquin L, Chiquin M, Duquesnoy T, Flores O,

Galicia O, Luna J, Molina E, Porrás O, Requena J, Robles V, Romero J, Wolf R., (2006). Kinematics of the North American Caribbean-Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic-Motagua fault system. *Geophys Res Lett* 33:1–5

Malfait, B. T., and M. G. Dinkelman., (1972). Circum-Caribbean tectonic and igneous activity and the evolution of the Caribbean plate, *Geol.Soc. Am, Bull.*, 83, 251-272.

Manea, M., Manea V.C., L. Ferrari, V. Kostoglodov, and W. L. Bandy., (2005). Tectonic Evolution of the Tehuantepec Ridge, *Earth and Planetary Science Letters*, 238, 64-77.

Manea, V.C., Manea, M., (2006). The origin of modern Chiapanecan volcanic arc in southern Mexico inferred from thermal models. In: Rose, W.I., Bluth, G.J.S., Carr, M.J., Ewert, J.W., Patino, L.C., Vallance, J.W. (Eds.), *Volcanic hazards in Central America*, GSA Special Paper: GSA Special Paper, 412, no. ch2, pp. 27–38.

Manea, M., Manea, V.C., (2008). On the origin of El Chichón volcano and subduction of Tehuantepec Ridge: a geodynamical perspective. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 175, 459–471. <http://dx.doi.org/10.1016/j.volgeores.2008.02.028>.

Manea, V.C., Manea, M., Ferrari, L., (2013). A geodynamical perspective on the subduction of Cocos and Rivera plates beneath Mexico and Central America, *Tectonophysics*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.039>

Mann, P., Schubert, C., Burke, K., (1990). Review of Caribbean neotectonics. In: Dengo, G., Case, J.E. Eds.), *The Caribbean Region*. Geological Society of America, Boulder, CO, pp. 307 - 338.

Meneses-Rocha, J. J., (2001). Tectonic evolution of the Ixtapa Graben, an example of a strike-slip basin of southeastern Mexico: Implications for regional petroleum systems, in *The Western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, Sedimentary Basins and Petroleum Systems*, edited by C. Bartolini, R. T. Buffler, and A. Cantú-Chapa, *AAPG Mem.*, 75, 183–216.

Meshede, M., and Frisch, W., (1988), A plate-tectonic model for the Mesozoic and early Cenozoic

history of the Caribbean plate: Tectonophysics, v. 296, p. 269-291.

Minister, B. J., Jordan, H. Thomas., (1978). Present-Day plate motions. *Journal of Geophysical Research*. Vol 83, No. B11, pp. 5331-5354.

Molina-Garza, R. S., Geissman, J. W., Wawrzyniec, T. F., Peña Alonso, T. A., Iriondo, A., Weber, B., & Aranda-Gómez, J. (2015), Geology of the coastal Chiapas (Mexico) Miocene plutons and the Tonalá shear zone: Syntectonic emplacement and rapid exhumation during sinistral transpression. *Lithosphere*, 7(3), 257-274. DOI: 10.1130/L409.1

Molnar, P., and L. R. Sykes., (1969). Tectonics of the Caribbean and Middle America regions from focal mechanisms and seismicity, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 80, 1639-1684.

Mora J.C., Jaimes-Viera M. C., Garduño-Monroy V. H., Layer P. W., Pompa-Mera V., Godinez M. L., (2007). Geology and geo-chemistry characteristics of the Chiapanecan volcanic Arc (Central Area), Chiapas Mexico. *J Volcanol Geotherm Res* 162:43–72.

Morán Zenteno, D.J., Cerca, M., Keppie, J.D., (2007). The Cenozoic tectonic and magmatic evolution of southwestern Mexico: advances and problems of interpretation in A.F.Nieto-Samaniego and S.A Alaniz-Álvarez (eds), *Geology of México: Celebrating the Centenary of the Geological Society of México*, Special Paper 393, Geological Society of America, mayo de 2007; 422, 71-92.

Morgan, W.J., and Phipps Morgan, J., (2007). Plate velocities in the hotspot reference frame, in Foulger, G.R., and Jurdy, D.M., eds., *Plates, plumes, and planetary processes: Geological Society of America Special Paper 430*, p. 65–78, doi: 10.1130/2007.2430(04).

Muehlberger, W. R., and Ritchie, A. W., (1975). Caribbean-Americas plate boundary in Guatemala and southern Mexico as seen on Skylab IV orbital photography: *Geology*, v. 3, p. 629-632.

Müller, R. D., J.-Y. Royer, S. C. Cande, W. R. Roest, and S. Maschenkov., (1999). New constraints on the Late Cretaceous/Tertiary plate tectonic evolution of the Caribbean, in *Caribbean Basins*, edited by P. Mann, pp. 33-59, Elsevier Science B.V. 4, Amsterdam, The Netherlands.

McKenzie, D. P., Morgan, W. J., (1969). Evolution of triple junctions, *Nature*, Vol. 224, pp. 125-133

- McNally, K.C., Minster, J.B., (1981). Nonuniform seismic slip rate along the Middle America Trench. *J. Geophys. Res.* 86, 4949± 4959.
- Narcia-Lopez, C., Castro, R.R., Rebollar, C.J., (2004). Determination of crustal thickness beneath Chiapas, Mexico using S and Sp waves. *Geophysical Journal International* 157, 215–228.
- Nixon, G.T., (1982). The relationship between Quaternary volcanism in central México and the seismicity and structure of the subducted ocean lithosphere. *Geological Society of America Bulletin* 93, 514–523.
- Norabuena E, Dixon TH, Schwartz S, DeShon H, Newman A, Protti M, Gonzalez V, Dorman L, Flueh ER, Lundgren P, Pollitz F, Sampson D., (2004). Geodetic and seismic constraints on some seismogenic zone processes in Costa Rica. *J Geophys Res* 109:B11403
- Novelo-Casanova, D. A., Oralia Oropeza O., Figueroa MahEng, J. M., (2013). Atlas de factores de riesgos de la cuenca de Motozintla, Instituto de Geofísica, UNAM, México, D. F., pp. 221 607023975X, 9786070239755.
- Ortuño, A.F., (1985). *Évolution sédimentaire Mesozoïque du bassin rift de Chihuahua le long d'une transversale Aldama–Ojinaga (Mexique). Implications géodynamiques: Pau, Francia, L'Université de Pau et des Pays de l'Adour, tesis doctoral, 244 p.*
- Pacheco, J. and L.R. Sykes., (1992). Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989, *Bulletin of the Seismological Society of America* 82, 1306-1349.
- Pardo, M., Suárez, G., (1995). Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications: *Journal of Geophysical Research*, 100(B7), 2357-12373.
- Pindell, J. C., S. C. Cande, W. C. Pitman, D. B. Rowley, J. F. Dewey, J. Labrecque, and W. Haxby., (1988). A plate kinematic framework for models of the Caribbean evolution, *Tectonophysics*, 155, 121–138, doi:10.1016/0040-1951(88)90262-4.



- Pindell, J. L., and Barret, S. F., (1990). Geologic evolution of the Caribbean region: A plate tectonic perspective. In, Dengo, G., and Case, J.E., (eds.), *The Geology of North America*, v. H, *The Caribbean Region*, Geological Society of America, p. 405-432.
- Pindell, J., L. Kennan, W. V. Maresch, K.-P. Stanek, G. Draper, and R. Higgs., (2005). Plate-kinematics and crustal dynamics of circum-Caribbean arc- continent interactions, in *Tectonic Controls on Basin Development in Proto-Caribbean Margins*, edited by H. G. Avé-Lallemant and V. B. Sisson, *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, 394, 7–52.
- Pindell, J., Kennan, L., (2009). Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update. In: James, K., Lorente, M.A., Pindell, J. (Eds.), *The geology and evolution of the region between North and South America*. Geological Society, London, Special Publication
- Ponce L., Gaulon R., Suárez G., Lomas E., (1992). Geometry and state of stress of the downgoing Cocos plate in the Isthmus of Tehuantepec, Mexico. *Geophys Res Let* 19:773–776.
- Phipps-Morgan, J., Ranero, C.R., Vannucchi, P., (2008). Intra-arc extension in Central America: links between plate motions, tectonics, volcanism, and geochemistry. *Earth and Planetary Science Letters* 272 (1–2), 365–371.
- Plafker, G., (1976). Tectonic aspects of the Guatemala earthquake of 4 February 1976, *Science*, 193, 1201–1208, doi:10.1126/science. 193.4259.1201.
- Ratschbacher, L., Martens, U., Franz, L., Min, M., Bachmann, R., Stanek, K., Stubner, K., Nelson, B.K., Herrmann, U., Weber, B., López-Martínez, M., Jonckheere, R., Sperner, B., Tichomirowa, M., McWilliams, M.O., Gordon, M., Meschede, M., (2009). The North American–Caribbean plate boundary in Mexico–Guatemala–Honduras. In: James, K., Lorente, M.A., Pindell, J. (Eds.), *The geology and evolution of the region between North and South America*. Geological Society of London, Special Publications.

- Rebollar C. J., Espíndola V. H., Uribe A., Mendoza A., Pérez-Vertti A., (1999). Distribution of stress and geometry of the Wadati- Benioff zone under Chiapas, Mexico. *Geofís Int* 38:95–106
- Romahn R. Sergio. J., (2004). Procesamiento y análisis estratigráfico de perfiles de reflexión sísmica en el talud continental del Golfo de Tehuantepec. Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, C.U., D.F.
- Rodriguez, M., C. DeMets, R. Rogers, C. Tenorio, and D. Hernandez., (2009). A GPS and modelling study of deformation in northern Central America, *Geophys. J. Int.*, 178, 1733–1754, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04251.x.
- Rogers, R. D., (2003), Jurassic-Recent tectonic and stratigraphic history of the Chortís block of Honduras and Nicaragua (northern Central America): Ph.D. thesis (unpublished), The University of Texas at Austin, 286 p.
- Rogers, R. D., and P. Mann., (2007). Transtensional deformation of the western Caribbean–North America plate boundary zone, *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, 428, 37–64, doi:10.1130/2007.2428(03).
- Rosencrantz, E., Sclater, J.G., (1986). Depth and age in the Cayman Trough: *Earth and Planetary Science Letters*, 79, 133-144.
- Rosencrantz, E., M. I. Ross, and J. G. Sclater (1988). The age and spreading history of the Cayman trough as determined from depth, heat flow, and magnetic anomalies, *J. Geophys. Res.*, 93, 2141–2157, doi:10.1029/JB093iB03p02141.
- Ryan, W.B.F., S.M. Carbotte, J.O. Coplan, S. O'Hara, A. Melkonian, R. Arko, R.A. Weissel, V. Ferrini, A. Goodwillie, F. Nitsche, J. Bonczkowski, and R. Zemsky., (2009). Global Multi-Resolution Topography synthesis, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q03014, doi: 10.1029/2008GC002332
- Sanchez-Barreda, L.A., (1981). Geologic evolution of the continental margin of the Gulf of Tehuantepec in southern Mexico. PhD thesis, University of Texas, Austin, Texas, 191 pp.

- Silva-Romo, G. (2008). Guayape-Papalutla fault system: A continuous Cretaceous structure from southern Mexico to the Chortís block? Tectonic implications, *Geology*, 36, 75–78, doi:10.1130/G24032A.1.
- Suski, B., G. Brocard, C. Authemayou, B. C. Muralles, C. Teyssier, and K. Hollinger., (2010). Localization and characterization of an active fault in a urbanized area in Central Guatemala by means of geoelectrical imaging, *Tectonophysics*, 480, 88–98, doi:10.1016/j.tecto.2009.09.028.
- Schaaf, P., D. Morán-Zenteno, M. Hernández-Bernal, G. Solís-Pichardo, G. Tolson, and H. Köhler., (1995). Paleogene continental margin truncation in southwestern Mexico: Geochronological evidence, *Tectonics*, 14, 1339–1350, doi:10.1029/95TC01928.
- Schuchert, C., (1935). *Historical geology of the Antillean-Caribbean region*: J. Wiley & Sons, New York, 811 p.
- Schwartz, D.P., Cluff, L.S., Donnelly, T.W., (1979). Quaternary faulting along the Caribbean– North American plate boundary in Central America. *Tectonophysics* 52, 431–445.
- Tovar-Cortés, J., Weber, B., and López-Martínez, M., (2005). Edad y cinemática de milonitas en el área de Pijijiapan, Chiapas: evidencia para el movimiento lateral entre el bloque Maya y Chortis: *Unión Geofísica Mexicana, Boletín Informativo, Epoca II, GEOS*, v. 25, p. 94.
- Turner HL, LaFemina P, Saballos A, Mattioli G, Jansma PE, Dixon T., (2007). Kinematics of the Nicaraguan forearc from GPS geodesy. *Geophys Res Lett* 34:L02302. doi:10.1029/2006GL027586
- Tolson, G. (2007). The Chacalapa fault, southern Oaxaca, Mexico, *Spec. Pap. Geol. Soc. Am.*, 422, 343–357, doi:10.1130/2007.2422(12).

- Ratschbacher, L., Martens, U., Franz, L., Min, M., Bachmann, R., Stanek, K., Stubner, K., Nelson, B.K., Herrmann, U., Weber, B., López-Martínez, M., Jonckheere, R., Sperner, B., Tichomirowa, M., McWilliams, M.O., Gordon, M., Meschede, M., (2009). The North American–Caribbean plate boundary in Mexico–Guatemala–Honduras. In: James, K., Lorente, M.A., Pindell, J. (Eds.), *The geology and evolution of the region between North and South America*. Geological Society of London, Special Publications
- Rosencratz, M. I. Ross., Sclater, G. J., (1988). Age of spreading history of the Caiman Trough as determined from depth, heat flow and magnetic anomalies. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 93, No. B3, pp. 2141-2157.
- Ryan, W.B.F., S.M. Carbotte, J.O. Coplan, S. O'Hara, A. Melkonian, R. Arko, R.A. Weissel, V. Ferrini, A. Goodwillie, F. Nitsche, J. Bonczkowski, and R. Zensky (2009). Global Multi-Resolution Topography synthesis, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 10, Q03014, doi: 10.1029/2008GC002332.
- Wawrzyniec, T., Molina-Garza, R.S., Geissman, J., and Iriondo, A., (2005). A newly discovered, relic, transcurrent plate boundary –the Tonalá shear zone and paleomagnetic evaluation of the western Maya block, SW Mexico: Geological Society of America Annual Meeting, Abstracts with Programs, v. p.
- Witt, C., Rangin, C., Andreani, L., Olavez, N., Martinez, J., (2012). The transpressive left-lateral Sierra Madre de Chiapas and its buried front in the Tabasco plain (southern Mexico). *Journal of the Geological Society of London* 169, 145–155. <http://dx.doi.org/10.1144/0016-76492011-024>.
- Wunderman RL, Rose WI., (1984). Amatitlan, an active resurging cauldron 10 km south of Guatemala city. *J Geophys Res* 89:8525–8539. doi:10.1029/JB089iB10p08525
- White, R.A., (1984). Catalog of historic seismicity in the vicinity of the Chixoy±Polo chic and Motagua faults, Guatemala. US Geological Survey Open-File Report, 84±88, 34pp.
- White, R. A., and D. H. Harlow., (1993). Destructive upper-crustal earthquakes of Central America since 1900, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 83, 1115–1142.



# ANEXOS

## × 1 - Programa en R

```
#-----  
#PROGRAMA PARA OBTENER DIAGRAMA TERNARIO DE MECANISMOS FOCALES, EJES  
P Y T, Y  
#SUBDIVIDIR EN REGIONES CADA RESULTADO DE TODA UNA ZONA  
#-----  
#CREADO POR:DIEGO ARMANDO AGUILAR  
#BASADO EN EL TRABAJO DE JONATHAN M. LEES, 2014  
#-----  
#CARGA LIBRERÍA Y DIRECCIÓN DE ARCHIVOS  
library(RFOC)  
  
load('/home/diego/Desktop/Test_R/AB_S1.RData')  
plot(AB_S1$LON,AB_S1$LAT,xlab="LON",ylab="LAT", main="Polochic-Motagua  
System Fault",asp=1)  
  
#####  
  
Paz=vector()  
  
Pdip=vector()  
  
Taz=vector()  
  
Tdip=vector()  
  
h=vector()v=vector()  
  
IFcol=vector()  
  
Fcol=vector()  
  
for(i in 1:193){
```

```

Msdr = CONVERTSDR(AB_S1$STR[i], AB_S1$DIP[i], AB_S1$RAKE[i])

MEC = MRake(Msdr$M)

MEC$UP = FALSE

IFcol[i] = foc.icolor(MEC$rake1)

Fcol[i] = foc.color(IFcol[i], 1)

az1=Msdr$M$az1

dip1=Msdr$M$d1

az2=Msdr$M$az2

dip2=Msdr$M$d2

BBB=Bfocvec(az1,dip1,az2,dip2)
V=ternfoc.point(BBB$Bdip,Msdr$M$pd,Msdr$M$td)

Paz[i]=Msdr$M$paz

Pdip[i]=Msdr$M$pd

Taz[i]=Msdr$M$taz

Tdip[i]=Msdr$M$td h[i]=V$h

v[i]=V$v

justfocXY(MEC, fcol = Fcol[i], AB_S1$LON[i],
AB_S1$LAT[i] , focsiz = 0.3)
}

#REALIZACION DE DIAGRAMA TERNARIO

PlotTernfoc(h,v,x=0, y=0, siz=1, fcols=Fcol, add=FALSE, LABS=FALSE)

MFOC1 = SDRfoc(65,90,1, u=FALSE, ALIM=c(-1,-1, +1, +1), PLOT=FALSE)
Fcol1 = foc.color(foc.icolor(MFOC1$rake1), pal=1)

```

```

MFOC2 = SDRfoc(135,45,-90, u=FALSE, ALIM=c(-1,-1, +1, +1), PLOT=FALSE)
Fcol2 = foc.color(foc.icolor(MFOC2$rake1), pal=1)

MFOC3 = SDRfoc(135,45,90, u=FALSE, ALIM=c(-1,-1, +1, +1), PLOT=FALSE)
Fcol3 = foc.color(foc.icolor(MFOC3$rake1), pal=1)

justfocXY( MFOC3, fcol = Fcol3, 1.2, -0.9, focsiz = 0.5)

justfocXY( MFOC2, fcol = Fcol2, -1.2, -0.9, focsiz = 0.5)
justfocXY( MFOC1, fcol = Fcol1, 0, 1.414443+.2, focsiz = 0.5)

net()

PZZ = focpoint(Paz, Pdip, col = "red", pch = 3, lab = "", UP = FALSE)

TZZ = focpoint(Taz, Tdip, col = "blue", pch = 4, lab = "", UP = FALSE)
text(0, 1.04, labels = "P & T – axes Projected", font = 2, cex = 1.2)
legend("topright", c("P", "T"), col = c("red", "blue"), pch = c(3, 4))

#SE CARGA LIBRERIA PARA SUBDIVIDIR
library(MASS)
KP = kde2d(PZZ$x, PZZ$y, n = 50, lims = c(-1, 1, -1, 1))
KT = kde2d(TZZ$x, TZZ$y, n = 50, lims = c(-1, 1, -1, 1))

opar <- par(no.readonly = TRUE)

par(mfrow = c(1, 3))

par(mai = c(0.2, 0, 0.2, 0))

CC = PLTcirc(PLOT = FALSE, add = FALSE, ndiv = 36, angs = c(-pi, pi))
image(KP$x, KP$y, KP$z, add = TRUE, col = terrain.colors(100))

#SE CARGA LIBRERIA PARA PODER GRAFICAR LAS SUBDIVISIONES
library(GEOmap)
antipolygon(CC$x, CC$y, col = "white")

net(add = 1)focpoint(Paz, Pdip, col = "red", pch = 3, lab = "", UP =
FALSE)

```

```

text(0, 1.04, labels = "P-axes 2D Density", font = 2, cex = 1.2)

CC = PLTcirc(PLOT = FALSE, add = FALSE, ndiv = 36, angs = c(-pi, pi))
image(KT$x, KT$y, KT$z, add = TRUE, col = terrain.colors(100))
antipolygon(CC$x, CC$y, col = "white")net(add = 1)

focpoint(Taz, Tdip, col = "blue", pch = 4, lab = "", UP = FALSE)

text(0, 1.04, labels = "T-axes 2D Density", font = 2, cex = 1.2)

CC = PLTcirc(PLOT = FALSE, add = FALSE, ndiv = 36, angs = c(-pi, pi))
image(KP$x, KP$y, KP$z, add = TRUE, col = terrain.colors(100))

net(add = 1)

contour(KT$x, KT$y, KT$z, add = TRUE, lwd = 1.2)

antipolygon(CC$x, CC$y, col = "white")

text(0, 1.04, labels = "Combined P-T 2D Density", font = 2, cex = 1.2)
par(opar)

#SE CARGA LIBRERIA PARA GRAFICAR DIAGRAMAS TERNARIOS MINI Y EJES P Y T
library(RPMG)
x=fmod(AB_S1$LON, 360)

y=AB_S1$LAT

plot(x, y, asp=1, type = "p", xlab = "LON", ylab = "LAT")

u = par("usr")

RI = RectDense(x, y, icut = 5, u = u, ndivs = 7)

rect(RI$icorns[, 1], RI$icorns[, 2], RI$icorns[, 3], RI$icorns[, 4], col =
NA, border = "blue")

Fcol = foc.color(IFcol, pal = 1)

i=1

sizy = RI$icorns[i, 4] - RI$icorns[i, 2]

```



```

sizx = RI$icorns[i, 3] - RI$icorns[i, 1]

siz = 0.5 * min(c(sizy, sizx))

plot(x, y, asp = 1, type = "p", xlab = "LON", ylab = "LAT")

u = par("usr")

RI = RectDense(x, y, icut = 5, u = u, ndivs = 7)

rect(RI$icorns[, 1], RI$icorns[, 2], RI$icorns[, 3], RI$icorns[,4], col =
NA, border = "blue")

for (i in 1:length(RI$ipass)) {

flag = x > RI$icorns[i, 1] & y > RI$icorns[i, 2] & x < RI$icorns[i,3] &
y < RI$icorns[i, 4]

jh = h[flag]

jv = v[flag]

PlotTernfoc(jh, jv, x = mean(RI$icorns[i, c(1, 3)]), y = mean(RI$icorns[i,
c(2, 4)]), siz = siz, fcols = Fcol[flag], add = TRUE)}

x = fmod(AB_S1$LON, 360)

y = AB_S1$LAT

plot(x, y, asp = 1, type = "p", xlab = "LON", ylab = "LAT")

u = par("usr")

KPspat = matrix(NA, nrow = length(RI$ipass), ncol = 10)

KTspat = matrix(NA, nrow = length(RI$ipass), ncol = 10)

colnames(KTspat) = c("x", "y", "n", "Ir", "Dr", "R", "K", "S", "Alph95",
"Kappa")

colnames(KPspat) = c("x", "y", "n", "Ir", "Dr", "R", "K", "S", "Alph95",
"Kappa")

for (i in 1:length(RI$ipass)) {

```

```

flag = x > RI$icorns[i, 1] & y > RI$icorns[i, 2] & x < RI$icorns[i, 3] &
y < RI$icorns[i, 4]

paz = Paz[flag]

pdip = Pdip[flag]

taz = Taz[flag]

tdip = Tdip[flag]

ax = mean(RI$icorns[i, c(1, 3)])
ay = mean(RI$icorns[i, c(2, 4)])

siz = (RI$icorns[1, 3] - RI$icorns[1, 1])/2.5

PlotPTsmooth(paz, pdip, x = ax, y = ay, siz = siz, border = NA,
bcol = "white", LABS = FALSE, add = FALSE, IMAGE = TRUE, CONT = FALSE)

PlotPTsmooth(taz, tdip, x = ax, y = ay, siz = siz, border = NA,
bcol = "white", LABS = FALSE, add = TRUE, IMAGE = FALSE, CONT = TRUE)

ALPH = alpha95(paz, pdip)

n = length(paz)

KPspat[i, ] = c(ax, ay, n, ALPH$Ir, ALPH$Dr, ALPH$R, ALPH$K,
ALPH$S, ALPH$Alph95, ALPH$Kappa)

ALPH = alpha95(taz, tdip)

KTspat[i, ] = c(ax, ay, n, ALPH$Ir, ALPH$Dr, ALPH$R, ALPH$K, ALPH$S,
ALPH$Alph95, ALPH$Kappa)

}

#FIN DEL PROGRAMA

```

## × 2 - *Campañas Oceanográficas*

Las campañas oceanográficas de las que se obtuvieron los datos de reflexión sísmica se pueden obtener de la base de datos internacional, y a continuación se presenta el área seleccionada y el resumen de cada una de las campañas consultadas, así como el proyecto en que fueron adquiridos, entre otros detalles. Sin embargo, sólo se utilizaron al final los datos de [Laad et al., 1978; Ladd, J. W. and Schroder, S., 1985]

Results found in extent:

Upper-left: (-96.379, 16.270)

Lower-right: (-88.744, 10.965)

Multi-Channel Seismics: IG2902 (1978)

Survey ID: IG2902

Survey Type: Multi-Channel Seismics

Platform Name: Ida Green

Survey Start Year: 1978

Survey End Year: 1978

Source Institution: Univ. of Texas Institute for Geophysics

Project: TECTONIC FRAMEWORK OF THE CARIBBEAN SEA PHASE I

Country: USA

Chief Scientist: J.L. WORZEL/J. LADD

Date Added: 9/13/1990

Multi-Channel Seismics: IG2903 (1978)

Survey ID: IG2903

Survey Type: Multi-Channel Seismics

Platform Name: Ida Green

Survey Start Year: 1978

Survey End Year: 1978

Source Institution: Univ. of Texas Institute for Geophysics

Project: MULTICHANNEL INVESTIGATION SW OF COSTA RICA, TRANS FROM MAT

Country: USA

Chief Scientist: J.L. WORZEL/J. LADD

Date Added: 9/13/1990

Multi-Channel Seismics: IG2403 (1977)

Survey ID: IG2403

Survey Type: Multi-Channel Seismics

Platform Name: Ida Green

Survey Start Year: 1977

Survey End Year: 1977

Source Institution: Univ. of Texas Institute for Geophysics

Project: SURVEYS OF THE MIDDLE AMERICA TRENCH-COSTA RICA AREA-DSDP

Country: USA

Chief Scientist: J.L. WATKINS

Date Added: 9/13/1990

Multi-Channel Seismics: IG2404 (1977)

Survey ID: IG2404

Survey Type: Multi-Channel Seismics

Platform Name: Ida Green

Survey Start Year: 1977

Survey End Year: 1977

Source Institution: Univ. of Texas Institute for Geophysics

Project: SURVEYS OF THE MIDDLE AMERICA TRENCH-GUATEMALA SURVEY-DSDP

Country: USA

Chief Scientist: J. LADD

Date Added: 9/13/1990

Multi-Channel Seismics: IG2405 (1977)

Survey ID: IG2405

Survey Type: Multi-Channel Seismics

Platform Name: Ida Green

Survey Start Year: 1977



Survey End Year: 1977

Source Institution: Univ. of Texas Institute for Geophysics

Project: SURVEYS OF THE MIDDLE AMERICA TRENCH-MEXICO AREA-DSDP

Country: USA

Chief Scientist: J.L. WORZEL

Date Added: 9/13/1990

Multi-Channel Seismics: IG2406 (1977)

Survey ID: IG2406

Survey Type: Multi-Channel Seismics

Platform Name: Ida Green

Survey Start Year: 1977

Survey End Year: 1977

Source Institution: Univ. of Texas Institute for Geophysics

Project: SURVEYS OF THE MIDDLE AMERICA TRENCH-MEXICO AREA-DSDP

Country: USA

Chief Scientist: T. SHIPLEY

Date Added: 9/13/1990