

Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Física

ESTUDIO DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN EN EL PACÍFICO DE GUATEMALA EN BASE A LAS CARACTERÍSTICAS DE SU SISMICIDAD

Rodolfo Alvarado Sosa

Asesorado por Lic. Robin Onelio Yani Quiyuch

Guatemala, Agosto de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

ESTUDIO DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN EN EL PACÍFICO DE GUATEMALA EN BASE A LAS CARACTERÍSTICAS DE SU SISMICIDAD

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JEFATURA DEL
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POR

RODOLFO ALVARADO SOSA
ASESORADO POR LIC. ROBIN ONELIO YANI QUIYUCH

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
ESCUELA DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



CONSEJO DIRECTIVO

DIRECTOR	M.Sc. Edgar Anibal Cifuentes Anléu
SECRETARIO ACADÉMICO	Ing. José Rodolfo Samayoa Dardón

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

EXAMINADOR	Ing. Omar Gilberto Flores Beltetón
EXAMINADOR	Lic. Freddy Rodríguez
EXAMINADOR	Lic. Robin Onelio Yani Quiyuch

Universidad de San Carlos de Guatemala
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas

Ref. D.DTG. 004-2016
Guatemala 05 de agosto de 2016

El Director de la Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Coordinador de la Licenciatura de Física Aplicada, al trabajo de graduación Titulado: **ESTUDIO DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN EN EL PACÍFICO DE GUATEMALA EN BASE A LAS CARACTERÍSTICAS DE SU SISMICIDAD** presentado por el estudiante universitario **Rodolfo Alvarado Sosa,** autoriza la impresión del mismo.

IMPRIMASE.

MsC. Edgar Aníbal Cifuentes Anleu
Director
Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS ESCUELA DE CIENCIAS FISICAS DIRECCIÓN Y MATEMÁTICAS DE GUATEMALA

/pec

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

Estudio de la Zona de Subducción en el Pacífico de Guatemala en Base a las Características de su Sismicidad

Rodolfo Alvarado Sosa

AGRADECIMIENTOS

A INSIVUMEH Este trabajo de investigación no hubiera podido ser realizado sin la total colaboración del Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos de dicho instituto.

A Robin Yani Quien me asesoró atentamente en cada etapa de la ejecución de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS IV

ÍNDICE DE TABLAS V

LISTA DE SÍMBOLOS VII

GLOSARIO IX

RESUMEN XI

OBJETIVOS XIII

INTRODUCCIÓN XV

1. MARCO GEOTECTÓNICO 1

1.1. Marco Geotectónico del Norte de Centroamérica 1

1.2. Sismicidad en el Norte de Centroamérica 1

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN EN EL PACÍFICO DE GUATEMALA 3

2.1. Proceso de Subducción 3

2.1.1. Zonas de Wadati-Benioff 4

2.1.2. Arcos Volcánicos 5

2.1.3. Mecanismos Focales en las Zonas de Subducción 6

2.2. La Zona de Subducción en el Pacífico Centroamericano 7

2.2.1. Movimiento de la Placa de Cocos 8

2.2.2. Grosor de la Litósfera 9

2.3. Definición de la Región Geográfica de Estudio 9

2.3.1. Sismicidad Importante Asociada a la Zona de Subducción en la Región Geográfica de Estudio 10

3. DATOS DE SISMICIDAD ANALIZADOS **11**
3.1. El Catálogo Sísmico de INSIVUMEH 11
3.1.1. Filtrado del Catálogo de INSIVUMEH en Base a las Estimaciones de Error 12
3.2. Complemento con el Catálogo Sísmico del USGS 13
3.2.1. Sismicidad Registrada en el Catálogo del USGS 16
3.3. Fusión de los Catálogos Sísmicos: el Catálogo Principal 17
3.4. Catálogo de Mecanismos Focales 19

4. MAPEO SÍSMICO DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN **21**
4.1. Elaboración de Perfiles de Profundidad 22
4.1.1. Especificaciones de los Perfiles de Profundidad 23
4.2. Resultados Obtenidos a Partir del Análisis de los Perfiles de Profundidad 24
4.3. Modelo del Cambio de Buzamiento Promedio de la Litósfera Oceánica en la Zona de Subducción 29
4.3.1. Identificación de Posibles Zonas de la Litósfera Oceánica en Base a los Cambios en su Buzamiento 31
4.3.2. Discusión del Modelo en Relación al Grosor de la Litósfera Oceánica 32

5. SISMICIDAD IMPORTANTE ASOCIADA LA ZONA DE SUBDUCCIÓN **37**
5.1. Características Generales de la Sismicidad de Grandes Magnitudes Localizada en la Región Geográfica de Interés 37
5.1.1. Distribución de la Sismicidad de Grandes Magnitudes en las Diferentes Zonas Propuestas Para la Litósfera Oceánica 39
5.2. Mecanismos Focales en las Diferentes Zonas Propuestas de la Litósfera Oceánica 41

CONCLUSIONES **45**

RECOMENDACIONES **47**

BIBLIOGRAFÍA **49**

APENDICE A **53**

APENDICE B **55**

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Marco geotectónico del norte de Centroamérica 2

2.1. Representación gráfica de una zona de subducción 4
2.2. Representación gráfica de una zona de Wadati-Benioff 5
2.3. Representación de los mecanismos focales 6
2.4. Placas tectónicas en la región mesoamericana 7
2.5. La fosa mesoamericana 8
2.6. Región geográfica de estudio 9
2.7. Eventos sísmicos de mayor magnitud asociados a la zona de subducción en la región geográfica de estudio 10

3.1. Filtrado de datos 13
3.2. Profundidades sísmicas en el catálogo de INSIVUMEH 14
3.3. Profundidades sísmicas en el catálogo de USGS 15
3.4. Gráfica magnitud-profundidad del catálogo sísmico del USGS 16
3.5. Distribución de profundidades del catálogo principal 18

4.1. Mapa de la sismicidad registrada en el catálogo principal 21
4.2. Recta base para los perfiles de profundidad 22
4.3. Características de los perfiles de profundidad 23
4.4. Zona de Wadati-Benioff observada en los perfiles 1, 2 y 3 25
4.5. Comparación entre los perfiles 1 y 3 26
4.6. Comparación entre el ángulo de buzamiento de la litosfera oceánica exhibido en los perfiles 2 y 3 27
4.7. Comparación entre el ángulo de buzamiento de la litosfera oceánica exhibido en los perfiles 1 y 2 28
4.8. Modelo del buzamiento de la litósfera oceánica atravesando el proceso de subducción 30
4.9. Zonas de la litósfera oceánica 32
4.10. Modelo tridimensional de la litósfera oceánica 34

5.1. Sismicidad de grandes magnitudes localizada en la zona de subducción 38
5.2. Agrupaciones de la sismicidad de grandes magnitudes a lo largo de la zona de subducción. 39
5.3. Propuesta alternativa de la separación en zonas de la litósfera oceánica. 40
5.4. Diagramas triangulares de la sismicidad asociada a la litósfera oceánica. 42
5.5. Sismicidad tipo *Thrust*. 43

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Filtros por error en la localización realizados sobre el catálogo de INSIVUMEH 12

4.1. Mediciones realizadas sobre los perfiles de profundidad 29
4.2. Ángulos de buzamiento 32
4.3. Sismicidad en relación al modelo tridimensional 35

5.1. Proporción relativa de la sismicidad *Thrust* de la litósfera oceánica. . 43

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
°N	Coordenada de latitud al Norte del Ecuador expresada en grados.
°W	Coordenada de longitud al oeste del meridiano de Greenwich
km	Kilómetros
%	Porcentaje
mm/año	Velocidad expresada en milímetros por año.
a	Azimut de los perfiles de profundidad
L	Longitud de los perfiles de profundidad
Q	Ancho medio de los perfiles de profundidad
δ_T	Ángulo de dip (*o dip angle*) del eje T de los mecanismos focales.
f_{Thrust}	Proporción relativa de la componente *Thrust* de los mecanismos focales.

GLOSARIO

Astenosfera	Región del manto superior que yace justo debajo de la litósfera, entre unos 80 y 200 km por debajo de la superficie. Está caracterizada por presentar una alta viscosidad, ser mecánicamente débil y ser deformable dúctilmente.
Catálogo Sísmico	Base de datos de sismicidad proporcionada por algún centro de investigación sismológica.
Corteza Continental	Capa superficial de la litósfera continental, compuesta primordialmente de rocas y minerales ricos en feldespato y cuarzo.
Corteza Oceánica	Capa superficial de la litósfera oceánica, compuesta primordialmente de rocas basálticas.
Fosa Oceánica	Larga y estrecha depresión topográfica en el suelo oceánico característica de las zonas de subducción.
Litósfera	La capa sólida más externa del planeta Tierra, la cual está compuesta por la corteza terrestre y la parte del manto que se comporta de forma elástica en escalas de tiempo de miles de años o mas.
Litósfera Continental	Tipo de litósfera asociada a la corteza continental.
Litósfera Oceánica	Tipo de litósfera asociada a la corteza oceánica, la cual existe en las cuencas oceánicas.

Perfiles de Profundidad Proyecciones realizadas en éste trabajo de los hipocentros de la sismicidad asociada a la zona de subducción sobre planos paralelos a la dirección del proceso de subducción.

Sismicidad Distribución geográfica e histórica de la actividad sísmica de una región determinada.

Subducción Proceso mediante el cual una placa de litósfera se desplaza por debajo de otra de menor densidad en dirección a la astenosfera.

Zona de Subducción Región de la Tierra en la que está ocurriendo un proceso de subducción. También puede definirse como el espacio ocupado por la parte de la litósfera atravesando tal proceso, junto con el de la región afectada por dicho proceso.

Zona de Wadati-Benioff Zona de sismicidad visible en los perfiles de profundidad, la cual es característica de las zonas de subducción y refleja la geometría y orientación de la parte sísmicamente activa de estas.

RESUMEN

Utilizando el catálogo sísmico del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología –INSIVUMEH–, junto con el del US Geological Survey –USGS–, se ha realizado un barrido de perfiles de profundidad de la sismicidad localizada entre las latitudes 12° N y 19° N, y las longitudes 94° W y 87° W, en una dirección noreste perpendicular a la Fosa Mesoamericana. Esto se ha hecho con el propósito de observar y estudiar la zona de Wadati-Benioff asociada a la zona de subducción localizada en la región geográfica previamente mencionada.

Se ha realizado un modelo del buzamiento promedio de la litósfera oceánica a lo largo de la zona de subducción, con el que se describe una posible estructura tridimensional de la litósfera oceánica al añadírsele información relacionada al grosor (de la placa de Cocos). Utilizando las estimaciones de Conrad et. al. (2006) para grosores litosféricos de las distintas placas tectónicas, la estructura tridimensional de la litósfera oceánica de la placa de Cocos estudiada en este trabajo ha coincidido con mas de un 92 % de las localizaciones registradas en los catálogos sísmicos utilizados.

En el modelo se han logrado identificar tres posibles zonas de la litósfera oceánica definidas por buzamientos diferentes las cuales, se observó posteriormente, están caracterizadas también por la proporción relativa de la componente *Thrust* de los mecanismos focales localizados dentro de sus límites así como por presentar agrupaciones de la sismicidad de altas magnitudes.

OBJETIVOS

General

Estudiar la zona de subducción en el Pacífico de Guatemala mediante un análisis de la sismicidad localizada en dicha región geográfica.

Específicos

1. Escoger una fuente completa y confiable de información sísmica que permita poder realizar el estudio deseado.
2. Definir la sismicidad asociada a la zona de subducción en la región geográfica de interés.
3. Observar y estudiar la zona de Wadati-Benioff asociada al proceso de subducción que está ocurriendo en la región geográfica de interés.
4. Modelar la forma de la litósfera oceánica en la región geográfica estudiada.
5. Estudiar las características de la sismicidad de altas magnitudes asociada a la zona de subducción y de sus mecanismos focales.

INTRODUCCIÓN

La tectónica de placas es la teoría que describe y modela las dinámicas litosféricas que, a lo largo de la historia geológica de la Tierra, han llevado una y otra vez a la formación y destrucción de continentes, océanos, cadenas montañosas, arcos volcánicos, etc. Dos procesos son fundamentales para esta teoría: la expansión del suelo oceánico y la subducción de la litósfera oceánica.

La expansión del suelo oceánico es la formación y migración de nueva litósfera oceánica por medios de volcanismo que se da en las dorsales oceánicas alrededor del mundo. La subducción de la litósfera oceánica, por otro lado, comienza a ocurrir en las fosas oceánicas, y es el proceso mediante el cual la litósfera oceánica es reciclada de nuevo en el manto. Las regiones en las que se dan tales procesos de subducción son denominadas zonas de subducción.

En el Pacífico centroamericano, la fosa mesoamericana evidencia el proceso de subducción que la placa litosférica de Cocos actualmente se encuentra realizando por debajo de la placa del Caribe (y lo ha venido haciendo a lo largo de los últimos 22 millones de años). En este trabajo se estudiarán rasgos de la geometría de la parte de la zona de subducción que se encuentra localizada frente a y sobre las costas de Guatemala mediante un análisis de la alta sismicidad ocasionada por tal proceso. Se discutirá también la sismicidad de altas magnitudes ocurrida en tiempos recientes (desde la década de 1950) asociada a la zona de subducción, así como sus mecanismos focales.

1. MARCO GEOTECTÓNICO

1.1. Marco Geotectónico del Norte de Centroamérica

Geográficamente, Centroamérica está definida como el área que se extiende en una dirección sureste desde el istmo de Tehuantepec, en México, hasta las tierras bajas de Atrato, Colombia. Geológicamente, ésta puede dividirse en dos partes, una septentrional, que se extiende desde su extremo noroeste hasta, aproximadamente, la frontera Nicaragua – Costa Rica, y otra meridional, que va desde este punto hasta su extremo sureste [*Álvarez*, 2009].

El norte de Centroamérica está conformado por el extremo noroeste de la corteza continental perteneciente a la placa del Caribe, el cual está constituido en gran parte por el bloque de Chortís. Este bloque se encuentra delimitado, al sur, por el arco volcánico centroamericano y la fosa mesoamericana, al este-sureste por el escarpe de Hess, y al norte-noroeste por el límite entre la placa Norteamericana y la placa del Caribe [*Álvarez*, 2009]. El bloque de Chortís es el único vestigio de corteza continental de la actual placa del Caribe [*Case et al.,* 1984].

La placa del Caribe, por su parte, se encuentra rodeada, al suroeste, por la placa de cocos (límite señalado por la fosa mesoamericana) y la placa de Nazca, al norte por la placa norteamericana y al este y sureste por la placa sudamericana [*Álvarez*, 2009].

1.2. Sismicidad en el Norte de Centroamérica

El norte de Centroamérica es una región geográfica de alta sismicidad, esto se debe principalmente a la interacción que ahí se da entre la placa del Caribe y la placa Norteamericana, así como también a la interacción entre la placa del Caribe y la placa de Cocos.

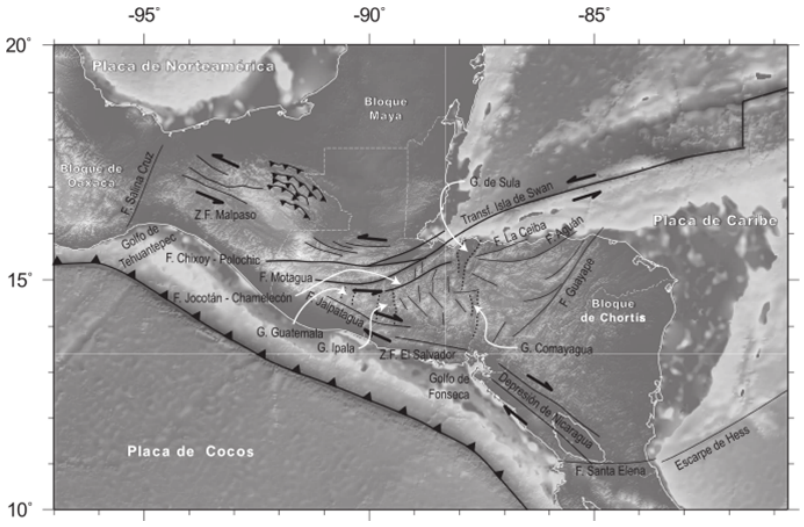


Figura 1.1. Marco geotectónico del norte de Centroamérica) Fuente: Tectónica activa y geodinámica en el norte de Centroamérica. José A. Álvarez Gómez, 2009.

La interacción entre la placa del Caribe y la placa Norteamericana se encuentra remarcada por el sistema de fallas transformantes Polochic-Motagua, el cual divide al bloque de Chortis del bloque Maya (perteneciente a la placa norteamericana). Por otro lado, la interacción entre la placa del Caribe y la placa del Cocos está delimitada por la Fosa Mesoamericana; estas dos placas convergen entre si en lo que se conoce como proceso de subducción [*Álvarez*, 2009].

Otras fuentes de sismicidad localizadas en esta región geográfica serían las siguientes [*Álvarez*, 2009] (ver Figura 1.1):

- Región de grábenes del bloque de Chortís occidental: se extiende desde el arco volcánico en Guatemala hasta la depresión de Honduras, está conformada principalmente por el Graben de Ipala, el Graben de Guatemala y el Graben de Ulúa.
- Arco volcánico centroamericano: está localizado en la parte continental de la placa del Caribe de forma paralela a la fosa mesoamericana, extendiéndose desde la falla de Polochic, en Guatemala, hasta Costa Rica.
- Falla de Jalpatagua
- Falla de Guayape: atraviesa Honduras de norte a sur, desde la costa del Caribe hasta la del Pacífico en el Golfo de Fonseca.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN EN EL PACÍFICO DE GUATEMALA

Históricamente, la región delimitada por la Fosa Mesoamericana y la costa del Pacífico centroamericano ha sido fuente de una elevada actividad sísmica; es ahí donde se da el proceso de subducción entre la placa de cocos y la placa del Caribe.

2.1. Proceso de Subducción

Subducción es el proceso mediante el cual una placa litosférica se desplaza (o subduce) por debajo de otra de mayor densidad en dirección a la astenosfera, lugar donde ésta se recicla continuamente a medida que las placas convergen. Las regiones en las que procesos de este tipo toman lugar son llamadas Zonas de Subducción [*Lowrie*, 2007].

El proceso de subducción puede ocurrir entre dos placas de litósfera continental, dos placas de litósfera oceánica o entre una placa de litósfera oceánica y otra de litósfera continental. Las fosas oceánicas alrededor del mundo (la mayoría de las cuales se encuentran localizadas en el Océano Pacífico) remarcan el lugar en el cual el proceso de subducción comienza a tomar lugar (siempre y cuando sea una placa oceánica la que está siendo subducida).

Las zonas de subducción están caracterizadas por presentar intensa sismicidad y volcanismo; la formación de magmas basálticos y de arcos volcánicos (o bien, arcos de islas volcánicas) son consecuencia de los procesos de subducción [*Sigurdsson et al.,* 2015]. La Figura 2.1 esquematiza una típica zona de subducción entre una placa de litósfera oceánica y otra de litósfera continental.

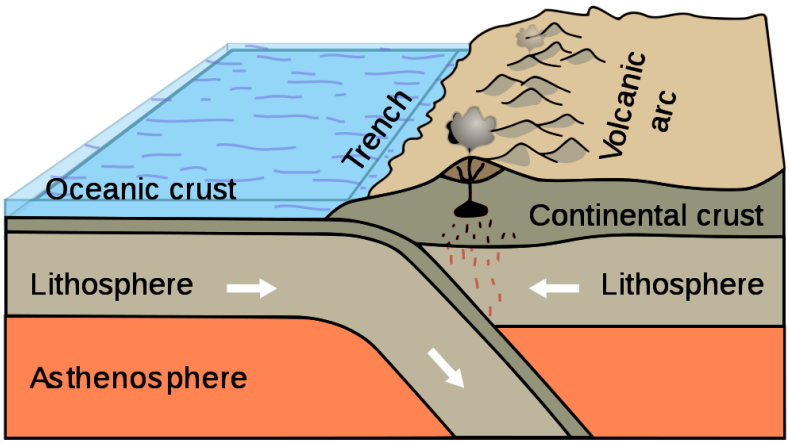


Figura 2.1. Representación gráfica de una zona de subducción. Fuente: Chris Martin http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Active_Margin.svg

La placa del Caribe, por su parte, se encuentra rodeada, al suroeste, por la placa de cocos (límite señalado por la fosa mesoamericana) y la placa de Nazca, al norte por la placa norteamericana y al este y sureste por la placa sudamericana [*Álvarez*, 2009].

2.1.1. Zonas de Wadati-Benioff

Como se mencionó anteriormente, las zonas de subducción alrededor del mundo están caracterizadas por presentar sismicidad en cantidades elevadas. Esta sismicidad puede ocurrir ya sea debido a la interacción entre ambas placas (sismicidad interplaca), o a deformaciones dentro de la litósfera que está siendo subducida (sismicidad intraplaca) [*Kirby et al.*, 1996].

En los casos en los que placas de litósfera oceánica están realizando el proceso de subducción, esta sismicidad tiende a manifestarse en lo que se conoce como Zonas de Wadati-Benioff. Estas son zonas de sismicidad que salen a la luz al proyectar sobre planos perpendiculares a fosas oceánicas los hipocentros de eventos sísmicos a lo largo de zonas de subducción. Estas son, de hecho, la mayor evidencia de la existencia de las zonas y los procesos de subducción [*Lowrie*, 2007].

La zona de Wadati-Benioff describe la estructura de la parte de la litósfera oceánica atravesando el proceso de subducción, marcando la localización y orientación de ésta en su descenso a la astenosfera [*Hager et al.*, 1997; *Lowrie*, 2007]. Se

cree que las profundidades en las que finalizan tales zonas denotan la región, ya sea en la que la litósfera oceánica deja de existir como tal o en la que deja de presentar una estructura lo suficientemente sólida como para ser fuente de sismicidad [*Skinner et al.*, 2011].

La actividad sísmica mas profunda del planeta es exclusiva de tales zonas, siendo esta capaz de alcanzar profundidades de hasta 700 km. Una característica común que estas zonas presentan es la disminución de sismicidad entre los 200 y los 300 km de profundidad, y el aumento de esta entre los 350 y los 600 km [*Kirby et al.*, 1996]. La Figura 2.2 ejemplifica una zona de Wadati-Benioff en el contexto de una zona de subducción.

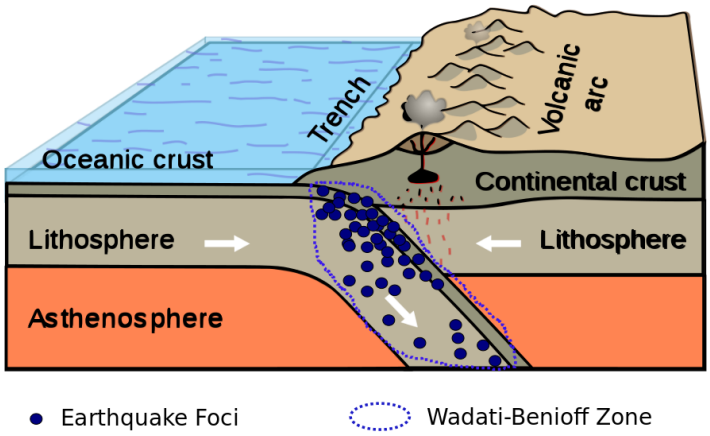


Figura 2.2. Representación gráfica de una zona de Wadati-Benioff en el contexto de una zona de subducción. Fuente: Modificado de Chris Martin http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Active_Margin.svg

2.1.2. Arcos Volcánicos

De forma casi paralela a las fosas oceánicas alrededor del mundo, es común encontrar formaciones de arcos volcánicos o de arcos de islas volcánicas. Esto lleva a pensar que la formación de tales sistemas podría estar relacionada de alguna manera a los procesos de subducción asociados a las fosas oceánicas [*Sigurdsson et al.*, 2015].

Tal idea encuentra bastante apoyo en el hecho que tales arcos se forman sobre esas regiones en las que la litósfera oceánica ha alcanzado profundidades de subducción de entre 80 y 120 km [*Sigurdsson et al.*, 2015]. De ahí nace la teoría que la

formación de tales sistemas volcánicos estaría relacionada a la deshidratación que la litósfera oceánica debería de experimentar debido al aumento de la presión y temperatura a medida que ésta desciende dentro de la astenosfera [*Sigurdsson et al.*, 2015].

2.1.3. Mecanismos Focales en las Zonas de Subducción

Un mecanismo focal es una solución del plano de falla de un determinado sismo, en la cual se describen dos posibles direcciones y orientaciones del desplazamiento de falla que pudo haber generado la señal sísmica registrada en los sismómetros [*Lowrie*, 2007].

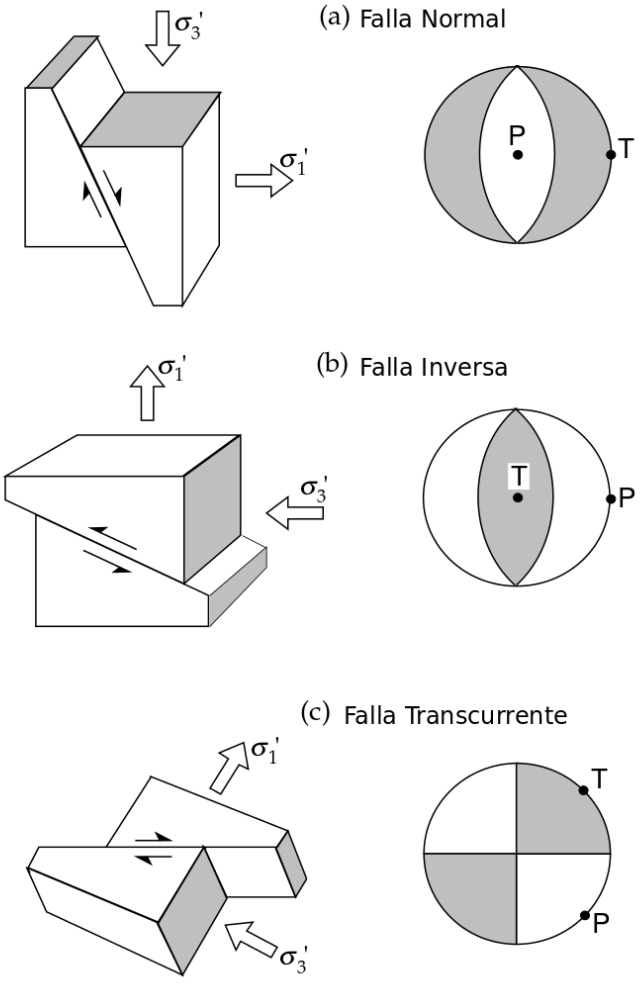


Figura 2.3. Representación de los mecanismos focales en símbolos de pelotas de playa. Fuente: Modificado de *"Fundamentals of Geophysics", Lowrie 2007.*

Una de las formas de derivar los mecanismos focales es con base en soluciones del tensor de momento de los eventos sísmicos, las cuales son estimadas a partir del análisis de las formas de onda registradas por las estaciones sísmicas [*Sipkin*, 1994]. Por lo general, éstos se representan con símbolos denominados *Beach Balls*, Pelotas de Playa, en los cuales se reflejan las direcciones de mínimo y máximo stress compresivo en los denominados ejes T y P, así como también el plano de falla y el plano auxiliar (perpendicular al plano de falla). Es a partir de los mecanismos focales que se estima si un sismo está asociado a un movimiento de falla transcurrente (*Strike-Slip*), normal (*Normal*) o inversa (*Thrust*) [*Lowrie*, 2007].

La sismicidad que por lo general se asocia a zonas de subducción está relacionada principalmente a fallas tipo *thrust* (entre 40 y 50 km de profundidad) así como también a fallas normales (a profundidades, por lo general, no mayores a 25 km). La sismicidad que conforma la zona de Wadati-Benioff por lo general presenta, ya sea el eje de compresión P (para profundidades menores a 300 km) o el eje de extensión T (para profundidades mayores a 300 km) en la dirección del buzamiento de la placa litosférica realizando el proceso de subducción [*Stein et al.*, 2002].

2.2. La Zona de Subducción en el Pacífico Centroamericano

Desde el mioceno, a lo largo de los últimos 22 millones de años, la placa de cocos ha venido realizando un proceso de subducción por debajo de la placa del Caribe. [*Mann*, 2007].

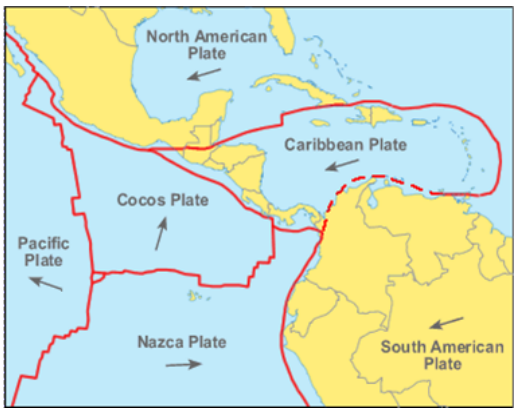


Figura 2.4. Placas tectónicas en la región mesoamericana. Fuente: *M7.3 El Salvador Nicaragua.* http://www.earthscope.org/science/geo-events/m7.3-el-salvador-nicaragua. Consulta: 20 de Mayo, 2015.

La placa de Cocos es una placa de litósfera oceánica localizada frente a la costa suroeste de Centro América, debajo del Océano Pacífico. La placa del Caribe, por otro lado, está compuesta tanto de litósfera oceánica (en el Mar Caribe) como de litósfera continental (en Centro América). La Figura 2.4 muestra a ambas placas en un contexto continental.

La zona de subducción formada debido a la interacción entre la placa de Cocos y la placa del Caribe, y entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana inicia en lo que es conocido como la fosa Mesoamericana, la cual es una fosa oceánica formada paralelamente a la costa del Pacífico de Centroamérica y parte de México, así como también al arco volcánico centroamericano.

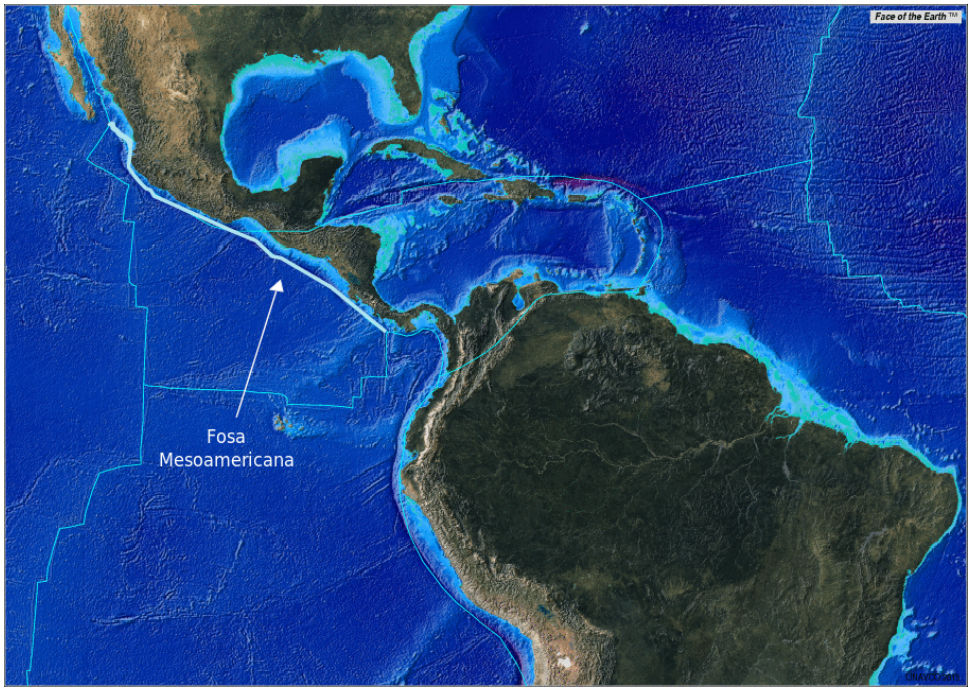


Figura 2.5. La fosa mesoamericana. Mapa generado con la ayuda de la herramienta Jules Verne Voyager, desarrollado por UNAVCO. www.jules.unavco.org Face of the Earth es una marca registrada, ARC Science Simulations © 1999

2.2.1. Movimiento de la Placa de Cocos

Mediciones geodésicas han estimado que la placa de Cocos se mueve en una dirección noreste perpendicular a la fosa Mesoamericana a una velocidad relativa a la placa del Caribe de 73 mm/año frente a las costas de Guatemala y El Salvador y

de 85 mm/año frente a las costas de Costa Rica [*DeMets*, 2001]. Esto evidencia que la placa de Cocos realiza el proceso de Subducción en tal dirección relativa a la fosa Mesoamericana.

2.2.2. Grosor de la Litósfera

Los grosores de la litósfera pueden estimarse de varias formas, ya sea en base a su edad, actividad sísmica, comportamiento de las ondas sísmicas que viajan a través de ella, perfiles térmicos, etc. [*Karato*, 2008]. El modelo de Conrad y Lightgow-Bertelloni (2006) estima grosores para la litósfera oceánica proporcionales a la raíz cuadrada de su edad, y para la litósfera continental en base a métodos de tomografía sísmica. Para la litósfera oceánica en la placa de Cocos, este modelo ha estimado un grosor máximo de 50 km, y para la litósfera continental en la placa del Caribe, un grosor aproximado de 100 km [*Conrad et. al.*, 2006]. Otros estudios también han estimado grosores similares para la placa de Cocos, el cual se ha determinado puede aumentar a medida que ésta realiza el proceso de subducción [*Kim et al.*, 2010].

2.3. Definición de la Región Geográfica de Estudio

Este trabajo de investigación se enfocará en estudiar la parte de la zona de subducción definida por la fosa Mesoamericana localizada entre las longitudes 87°W a 94°W. La figura siguiente muestra tal región:

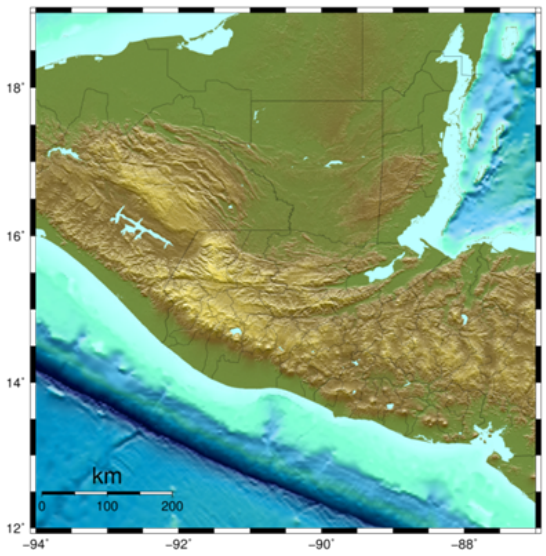


Figura 2.6. Región geográfica de estudio.

El mapa mostrado en las Figuras 2.6 y 2.7 fue realizado mediante el uso del GMT (*Generic Mapping Tools*) versión 4.5.13 (*Paul Wessel y Walter H. F. Smith, 2015*).

2.3.1. Sismicidad Importante Asociada a la Zona de Subducción en la Región Geográfica de Estudio

Por lo general, los eventos sísmicos mas fuertes de la historia han estado asociados a los diferentes procesos de subducción que se dan alrededor del mundo, cantidades enormes de energía se liberan durante tales procesos a medida que las placas litosféricas convergen entre si. La zona de subducción en el Pacífico centroamericano no es excepción a este comportamiento; la Figura 2.7 muestra sobre un mapa los eventos sísmicos más fuertes (de magnitudes mayores a 5.9) que han ocurrido en la región geográfica de estudio desde la década de 1950.

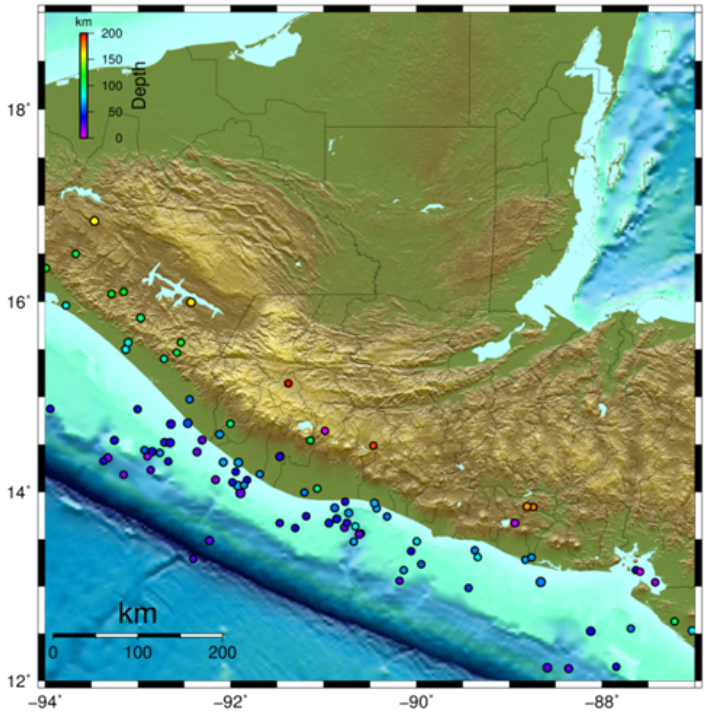


Figura 2.7. Eventos sísmicos de mayor magnitud asociados a la zona de subducción en la región geográfica de estudio. Información sísmica tomada del USGS.

3. DATOS DE SISMICIDAD ANALIZADOS

En este trabajo de investigación se estudia la sismicidad asociada a la zona de subducción localizada frente a las costas del Pacífico de Guatemala y alrededores para estimar características relacionadas a su morfología, específicamente la de la zona de Wadati-Benioff asociada a tal región de la zona de subducción.

Las proyecciones de hipocentros de eventos sísmicos realizadas para la observación de la zona de Wadati-Benioff estudiada en este trabajo serán llamadas perfiles de profundidad, los cuales han sido realizados en una dirección noreste perpendicular a la fosa Mesoamericana.

Para poder observar las zonas de Wadati-Benioff es necesario contar con una buena cantidad de datos de sismicidad. Actualmente, el catálogo sísmico del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología –INSIVUMEH–, es el más apto dado que cuenta con la mayor cantidad de datos de sismicidad para la región geográfica de interés (alrededor de cuarenta y tres mil datos, de los cuales un alto porcentaje se encuentran asociados a la zona de subducción).

Sin embargo, a medida que se fue analizando y filtrando el catálogo, se descubrió que éste no sería suficiente para realizar el estudio deseado de una forma satisfactoria, razón por la cual se vio la necesidad de complementarlo con otro catálogo sísmico. El catálogo elegido fue el del *U.S. Geological Survey* –USGS–. A esta fusión de datos se le ha denominado Catálogo Principal. Las razones por las que hubo que realizarlo, así como sus características, serán el principal tema a tratar en éste capítulo.

3.1. El Catálogo Sísmico de INSIVUMEH

La principal ventaja de trabajar con este catálogo es la alta cantidad de registros sísmicos que contiene para el territorio de Guatemala; en total hay 43659 eventos sísmicos registrados entre 1984 y 2014, y esta cantidad aumenta día con día.

Sin embargo, la mayoría de estos datos no pueden ser utilizados ya que muchos de estos presentan grandes rangos de incertidumbre en lo que se refiere a la estimación de la localización de los eventos sísmicos; estos rangos de error pueden llegar a ser de miles de kilómetros en la estimación de las coordenadas sísmicas del evento (es decir, en su latitud, longitud o profundidad).

El mayor problema que esto representa es que, como se verá a continuación, las zonas de Wadati-Benioff son muy difíciles de observar cuando hay tantos eventos sísmicos con localizaciones tan inciertas. La solución mas inmediata a tal problema es la de filtrar el catálogo por error.

3.1.1. Filtrado del Catálogo de INSIVUMEH en Base a las Estimaciones de Error

El objetivo principal de filtrar el catálogo en base al error en la estimación de las coordenadas geográficas y las profundidades sísmicas de los eventos registrados en éste es el de encontrar la mayor cantidad de datos con buenas localizaciones que permitan, no solo observar, sino también poder definir claramente la zona de Wadati-Benioff en la región geográfica de interés. En la tabla 3.1 se muestran los filtros que se han realizado:

Tabla 3.1. Filtros por error en la localización realizados sobre el catálogo de INSIVUMEH

	Errores permitidos [1]	Eventos sísmicos
Filtro 0	todos	43659
Filtro 1	menores a 20.1 km	18294
Filtro 2	menores a 10.1 km	12189

Como puede verse, en la búsqueda de asegurar la calidad de los datos se han tenido que desechar una gran parte de estos. El primer filtro (Filtro 1) ha desestimado un 58 % de los eventos sísmicos registrados en el catálogo, mientras que el segundo filtro (Filtro 2) solamente ha logrado mantener un 28 % de estos.

Si bien la desestimación de tantos datos es lamentable, ésta ha sido una medida totalmente necesaria. En la Figura 7 puede apreciarse, no solo como es que los límites de la zona de Wadai-Benioff son casi imperceptibles al realizar perfiles de profundidad utilizando eventos sísmicos sin filtrar, sino también como es que la

[1] En latitud, longitud y profundidad.

forma y los límites de ésta se van afinando a medida que los eventos sísmicos con localizaciones con mayor error van desechándose.

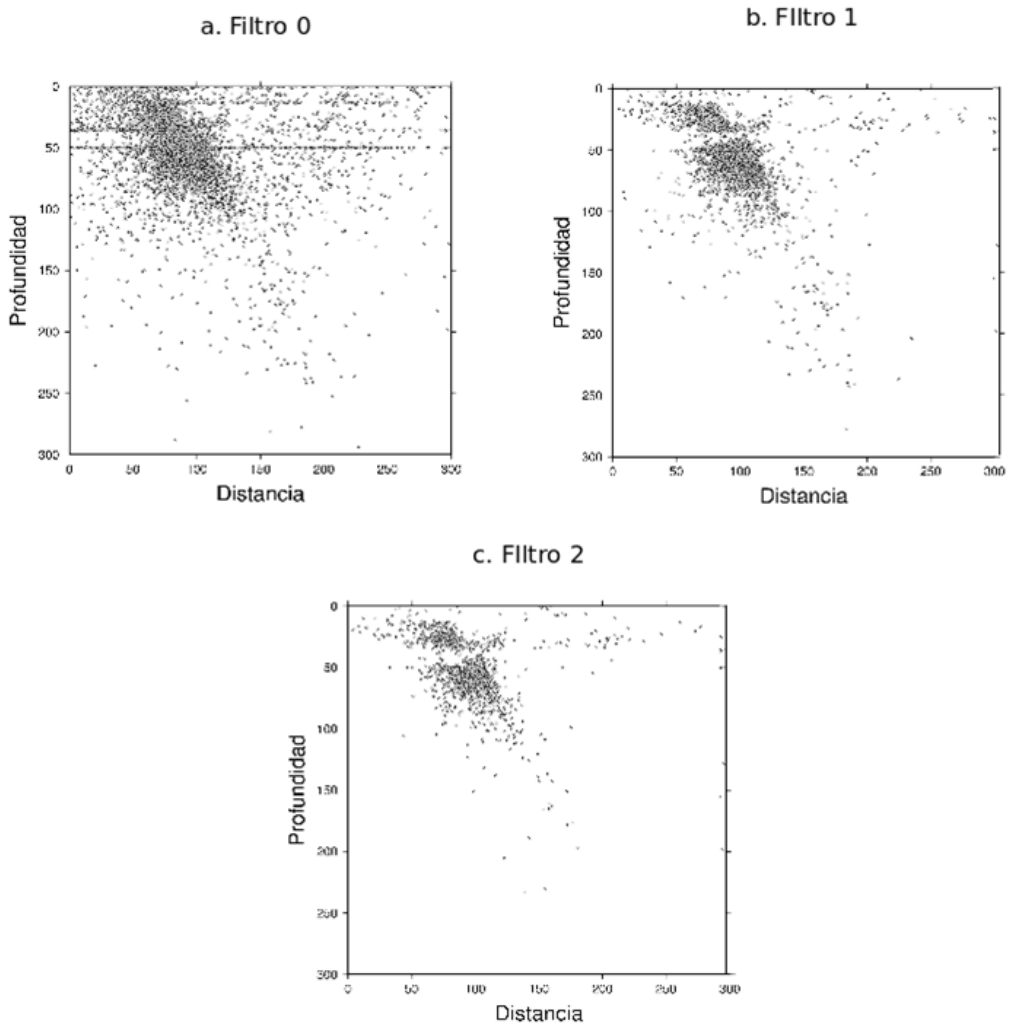


Figura 3.1. La forma de la zona de Wadati-Benioff se hace más evidente a medida que se van filtrando los eventos sísmicos con mayor error en sus localizaciones.

Con el Filtro 1 ya logra apreciarse la zona de Wadati-Benioff, pero el Filtro 2 afina aún mas la forma de esta. Debido a la naturaleza de este estudio, se ha utilizando el Filtro 2 sobre el catálogo sísmico de INSIVUMEH.

3.2. Complemento con el Catálogo Sísmico del USGS

Al utilizar el Filtro 2 sobre el catálogo sísmico de INSIVUMEH, se ha desestimado un 72 % de los eventos sísmicos registrados en éste. Esto, en consecuencia, ha causado la pérdida de mucha información acerca de la sismicidad profunda locali-

zada en la región geográfica de estudio (aunque, si tal información ha desaparecido debido al filtrado de datos, se puede entender que ésta no era muy confiable). De los datos conservados, solo 2 % de estos presentan profundidades mayores a los 100 km.

A medida que la litósfera oceánica alcanza mayores profundidades en el proceso de subducción, la sismicidad en ésta disminuye. Sin embargo, aun se esperaría que una cantidad significativa de ésta ocurriera entre profundidades de 100 y 200 km [*Kirby et al.*, 1996]. En la Figura 3.2, puede observarse como éste no es el caso con el catálogo de INSIVUMEH, en donde la cantidad de registros entre 100 y 200 km de profundidad es casi tan pobre como entre 200 y 300 km.

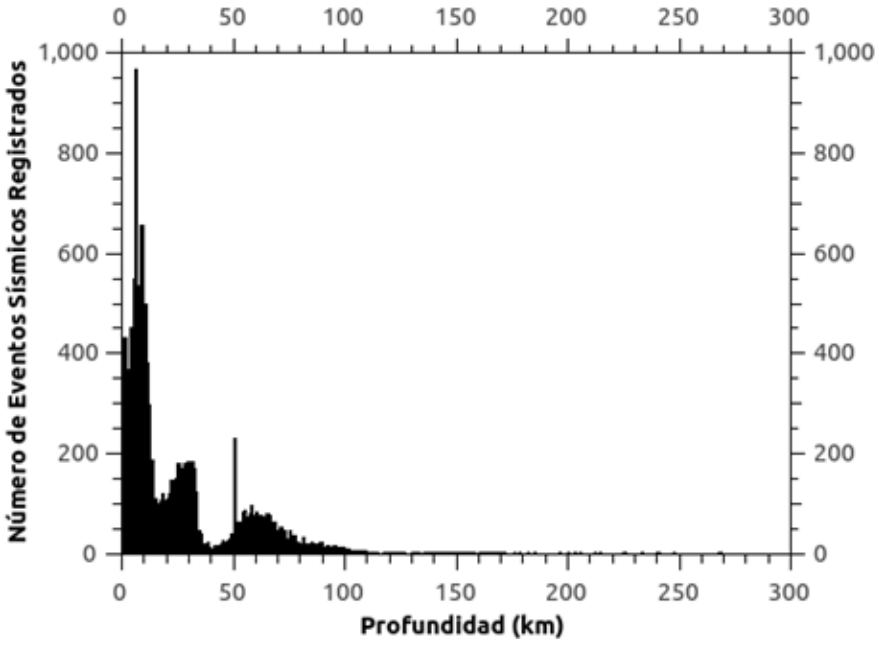


Figura 3.2. Distribución de profundidades sísmicas registradas en el catálogo de INSIVUMEH.

Las razones por las que el catálogo de INSIVUMEH contiene tan pocos datos de sismicidad profunda no están todas relacionadas al filtrado de datos; la red de monitoreo de INSIVUMEH está diseñada para la sismicidad local (por ejemplo, la sismicidad tipo enjambre que se da en el departamento de Santa Rosa o en la ciudad Capital), y su configuración no es muy apropiada para la detección de sismos de grandes profundidades.

Dado que la información de sismicidad profunda es sumamente importante para la definición y estimación de propiedades de las zonas de Wadati-Benioff, se ha visto la necesidad de complementar el catálogo sísmico de INSIVUMEH con algún otro catálogo que pudiera incrementar la información de sismicidad profunda en la región geográfica de interés. El catálogo utilizado ha sido el del *US Geological Survey* (USGS), esto ha sido debido a dos razones en particular:

- El *National Earthquake Information Center* (NEIC), el cual es el centro que procesa los datos de sismicidad que se encuentran en el catálogo del USGS, es reconocido por proveer localizaciones sísmicas de buena confiabilidad.
- La red global de monitoreo sísmico que utiliza el NEIC tiene la misma capacidad para detectar eventos sísmicos tanto superficiales como profundos en la región geográfica de interés.

Al momento de consultarlo, el catálogo del USGS presentaba 7708 registros sísmicos localizados en la región geográfica de interés, del cual un 15 % presenta profundidades iguales o mayores a los 100 km. La Figura 3.3 muestra como es que las profundidades están distribuidas de una manera mas uniforme en este catálogo que en el de INSIVUMEH:

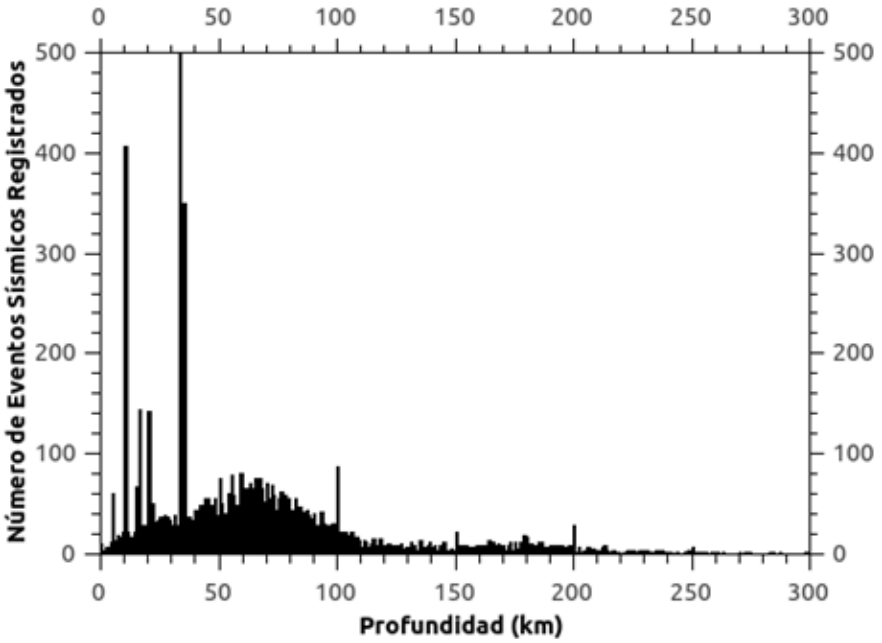


Figura 3.3. Distribución de profundidades sísmicas registradas en el catálogo de USGS.

A diferencia del catálogo de INSIVUMEH, donde la distribución de profundidades alcanza su máximo por debajo de los 20 km de profundidad (y otro menor entre los 30 y los 35 km), en el catálogo del USGS esta lo hace entre los 60 y los 70 km de profundidad. También puede observarse un incremento significativo de la sismicidad registrada entre los 110 y los 220 km de profundidad.

3.2.1. Sismicidad Registrada en el Catálogo del USGS

Como se mencionó anteriormente, la red de monitoreo que utiliza el NEIC no presenta las mismas dificultades que la de INSIVUMEH para detectar sismicidad profunda, esto es debido a que ésta es una red global (la cual utiliza además estaciones sísmicas que están disponibles de manera libre). En la Figura 3.4 puede observarse la relación entre las magnitudes y las profundidades de los eventos sísmicos registrados en el catálogo del USGS en la región geográfica de interés:

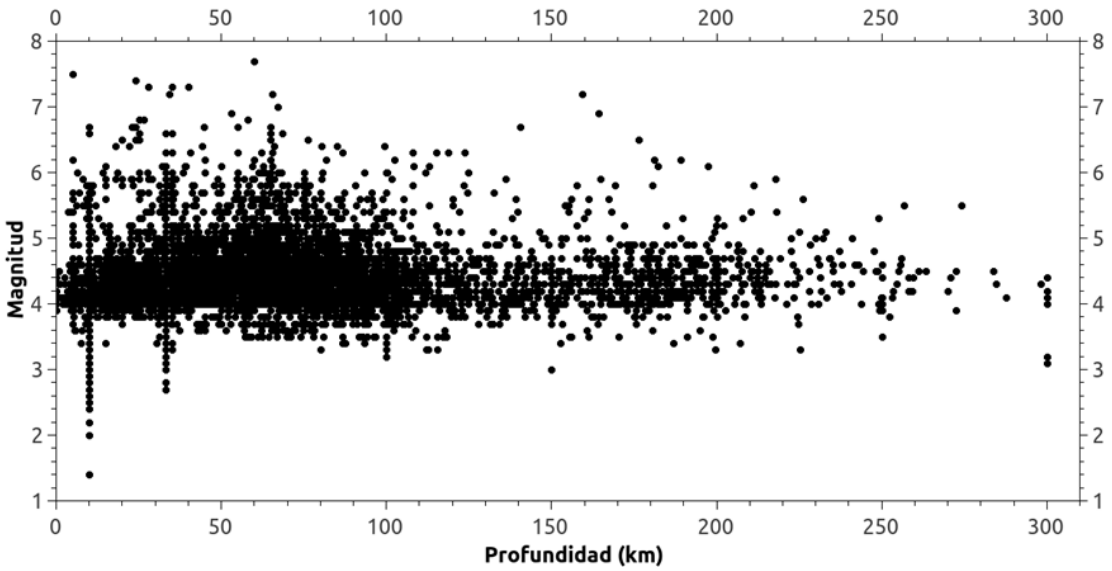


Figura 3.4. Distribución de las magnitudes registradas en el catálogo del USGS con respecto a la profundidad.

En la imagen anterior puede apreciarse cómo el catálogo del USGS presenta una capacidad de detección de magnitudes de 3.6 para arriba para la sismicidad localizada en la región geográfica de interés. La mayor parte de ésta ocurre entre profundidades de 0 a 110 km, muy pocos eventos sísmicos con magnitudes por encima de 5 ocurren para profundidades mayores a esta. En total, la sismicidad en la región geográfica estudiada parece ocurrir en tres diferentes rangos de profundidad (aunque la transición entre estos no se observan de forma muy clara): de 0 a 110-120 km, de

110-120 km a 210-220 km y de 210-220 km a 300 km.

3.3. Fusión de los Catálogos Sísmicos: el Catálogo Principal

Para poder estudiar la morfología de la zona de subducción en base a su sismicidad, ha sido necesario contar con suficientes datos sísmicos de la mejor calidad posible en cantidades tales que se pueda delimitar o estimar el espacio físico ocupado por ésta.

El catálogo sísmico de INSIVUEMEH ofrece información valiosa respecto a la sismicidad superficial y de profundidades medias (entre 40 y 100 km de profundidad) localizada en el territorio de Guatemala y frente a sus costas, pero no dice mucho acerca de la sismicidad profunda. Por otro lado, el catálogo del USGS no ofrece mucha información para la sismicidad superficial, pero proporciona suficientes datos de sismicidad profunda (mayor a los 100 km de profundidad) y de profundidades medias. El catálogo del USGS ayuda también a complementar la información de la sismicidad localizada en áreas de México y El Salvador, la cual es necesaria para apreciar de mejor manera la morfología de la región estudiada, y donde la red de INSIVUMEH pierde capacidad de detección. Por lo tanto, es fácil ver como es que ambos catálogos se complementan entre si.

De esta forma, se ha reunido la información presentada en ambos catálogos y se ha fusionado en lo que ha sido denominado como el catálogo principal de este estudio, o simplemente Catálogo Principal. Este catálogo es el que ha sido utilizado para estudiar la zona de Wadati-Benioff en la región geográfica de interés. Antes de detallar sus especificaciones, hay dos detalles que hay que tomar en consideración:

- Repetición de eventos sísmicos: hubo que eliminar varios eventos sísmicos del catálogo principal debido a que se encontraban registrados tanto en el catálogo de INSIVUMEH como en el del USGS. En algunos casos fueron eliminados eventos de INSIVUMEH y en otros del USGS, esto fue realizado de forma totalmente aleatoria, sin discriminar a un catálogo por debajo del otro.

- Escalas de magnitud distintas: los dos catálogos reportan la magnitud de los eventos sísmicos en escalas diferentes, INSIVUMEH reporta una magnitud coda (basada en la duración del evento sísmico previamente establecida para la región) mientras que USGS prefiere utilizar magnitudes basadas en el momento

sísmico. Esto, sin embargo, no ha representado un problema, dado que para el fin de apreciar la morfología de la zona de subducción no es necesario tomar en consideración la magnitud de los eventos sísmicos, por lo que no se ha visto en la necesidad de homogenizar el catálogo.

La sismicidad en el catálogo principal está distribuida de la siguiente forma (recordando que no todos los eventos sísmicos que ahí aparecen están asociados a la zona de subducción, muchos de estos están relacionados a movimiento de fallas en la litósfera continental):

- Número de eventos sísmicos: 19325
- Sismos con profundidades entre 40 y 100 km: 28.2 %
- Sismos con profundidades mayores a 100 km: 7.3 %
- Sismos con profundidades mayores a 200 km: 1.1 %
- Sismos con profundidades mayores a 220 km: 0.53 %

Esta distribución de profundidades puede observarse de mejor forma en la Figura 3.5:

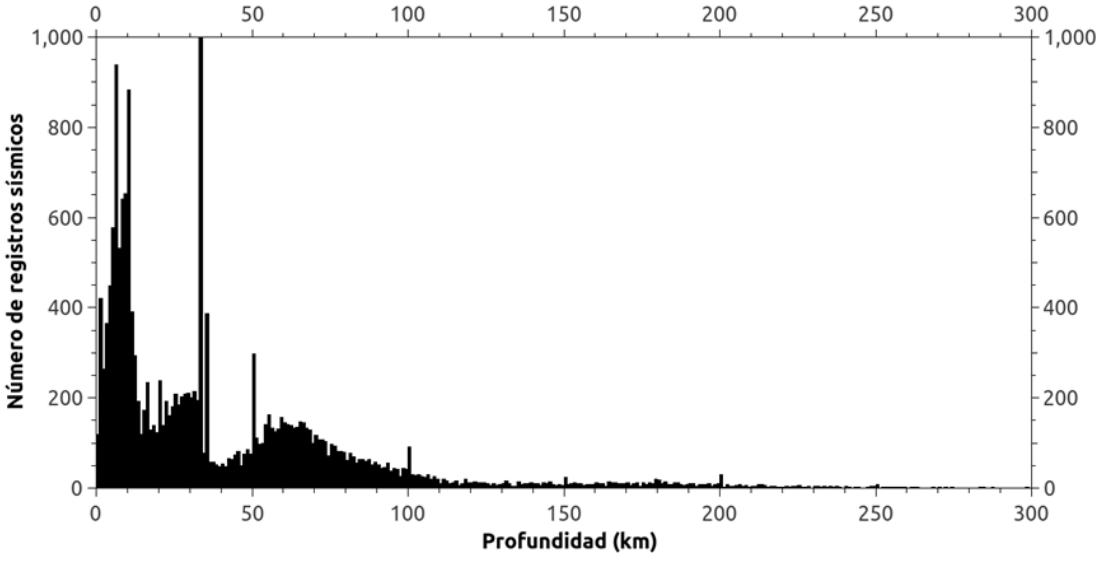


Figura 3.5. Distribución de profundidades del catálogo principal.

3.4. Catálogo de Mecanismos Focales

Se ha utilizando el catálogo de mecanismos focales del CMT [*Dziewonski et al.*, 1981; *Ekström et al.,* 2012]. El número de eventos sísmicos localizados en la región geográfica de interés registrados en dicho catálogo es de 627, el cual contiene información acerca de la localización de los hipocentros, el tensor de momento y los ángulos de *strike, dip* y *rake* de los mecanismos focales. Sin embargo, éste no presenta información relacionado a la incertidumbre en el cálculo de los mecanismos focales.

4. MAPEO SÍSMICO DE LA ZONA DE SUBDUCCIÓN

Haciendo uso del GMT (*Generic Mapping Tools*) versión 4.5.13 (*Paul Wessel y Walter H. F. Smith*, 2015), se han ploteado en un mapa en proyección mercator los epicentros registrados en el catálogo principal detallado en el capítulo 3, agregando una escala de color para representar su profundidad.

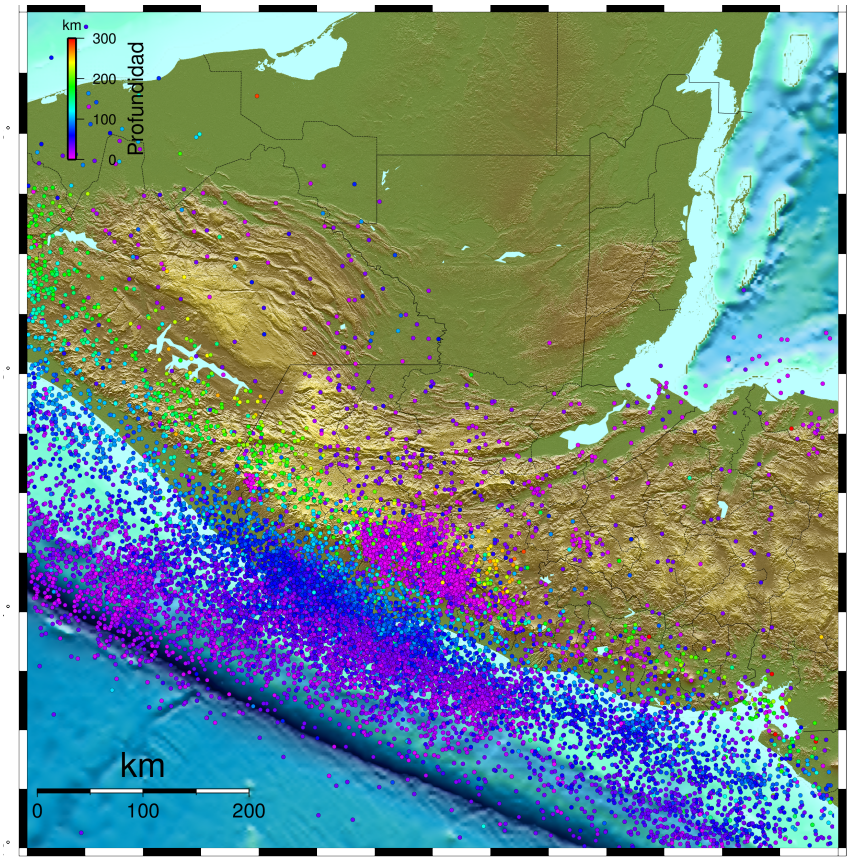


Figura 4.1. Mapa de la sismicidad registrada en el catálogo principal

Para poder apreciar rasgos de la morfología de la Zona de Subducción, se ha realizado una serie de perfiles de profundidad a lo largo de la región geográfica de

interés. Las especificaciones de tales perfiles, así como la zona de Wadati-Benioff revelada a partir de estos, serán el tema principal de este capítulo.

4.1. Elaboración de Perfiles de Profundidad

Para éste trabajo han sido realizado varios perfiles de profundidad a lo largo de la parte de la Fosa Mesoamericana localizada entre las longitudes 94°W y 87°W (extendiéndose, básicamente, desde el Pacífico sur de México hasta aproximadamente el golfo de Fonseca). Ésta se ha aproximado a una recta, la cual ha sido tomada como la recta base para realizar los perfiles de profundidad (ver Figura 4.2).

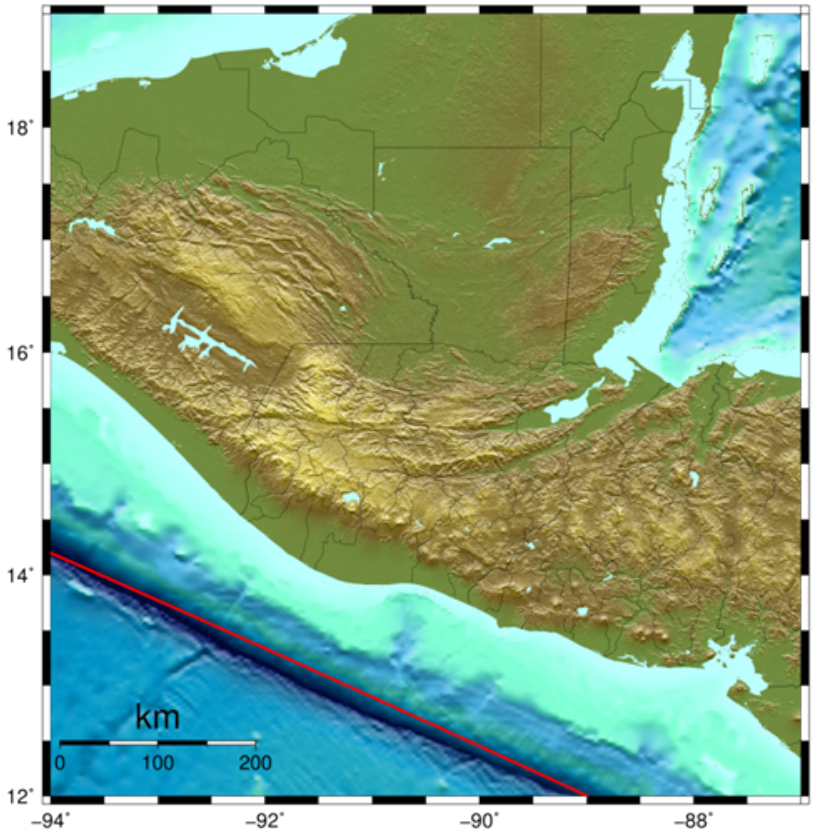


Figura 4.2. Recta base utilizada en los perfiles de profundidad, localizada sobre la fosa mesoamericana.

A partir del análisis de estos perfiles se han logrado observar algunas características de la zona de subducción relacionadas a su morfología.

4.1.1. Especificaciones de los Perfiles de Profundidad

Los perfiles de profundidad han sido generados por medio de la elaboración de scripts de GMT basados en los trabajos de la Dra. Gina Schmalzle [Schmalzle, 2014]. La Figura 4.3 detalla las generalidades de tales perfiles:

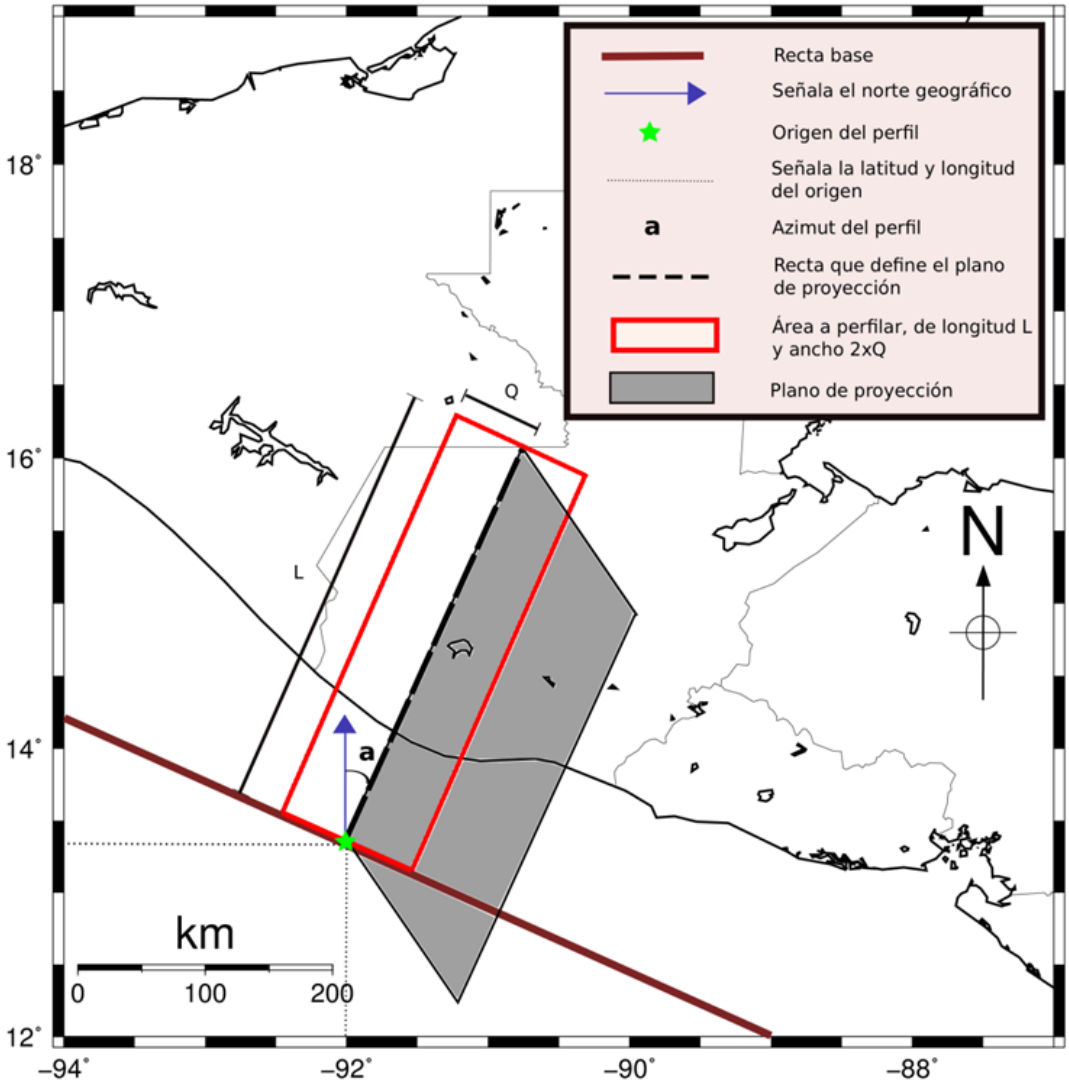


Figura 4.3. Características de los perfiles de profundidad. Toda la sismicidad con epicentros localizados dentro del área a perfilar se proyecta en el plano de proyección, lo cual hace posible observar la zona de Wadati-Benioff asociada a la zona de subducción.

El propósito de los perfiles de profundidad es esencialmente el de proyectar en un plano, el plano de proyección, los focos de todos los eventos sísmicos registrados en el catálogo principal con epicentros localizados en la región geográfica delimitada

por el área del perfil. En el plano de proyección, entonces, se puede comparar la profundidad de los eventos sísmicos contra la distancia a la que estos ocurrieron respecto al origen del perfil (o, mas bien dicho, respecto a la recta base); es en estos planos donde la zona de Wadati-Benioff puede ser apreciada. El azimut de todos los perfiles ha sido fijado en 24.27°(dirección perpendicular a la recta base).

4.2. Resultados Obtenidos a Partir del Análisis de los Perfiles de Profundidad

Trabajos anteriores han determinado que el buzamiento de la litósfera de la placa de Cocos varía a lo largo de la zona de subducción [*Álvarez,* 2010; *Rebollar et al.,* 1998]. Para observar de forma específica como es que tales variaciones se dan a lo largo de la región geográfica de interés, se muestra a continuación la zona de Wadati-Benioff reflejada en tres perfiles de profundidad diferentes (con Q = 0.50°):

- Perfil 1: origen en la longitud 94.00°w sobre la recta base.
- Perfil 2: origen en la longitud 92.50°w sobre la recta base.
- Perfil 3: origen en la longitud 91.00°w sobre la recta base.

Los perfiles 1, 2 y 3 ocupan una gran área superficial, y fueron seleccionados luego de observar detalladamente una mayor cantidad de perfiles de menor área superficial a través de toda la región geográfica de interés, para poder así apreciar las áreas que han representado cambios aparentes. En la Figura 4.4 se observa cómo el buzamiento de la parte estudiada de la litósfera oceánica no se mantiene constante a lo largo de la zona de subducción, el cual parece ser mayor al sureste de ésta que al noroeste. La naturaleza de tales variaciones en el buzamiento puede apreciarse mucho mejor al comparar los perfiles en parejas.

Las Figuras 4.5, 4.6 y 4.7 exhiben claramente dos características muy importantes de la región estudiada de la zona de subducción:

- El ángulo de buzamiento de la litósfera oceánica reflejado en la zona de Wadati-Benioff del perfil 3 es mayor que el reflejado en la del perfil 1.
- Este cambio de buzamiento está mediado por una transición en la región geográfica representada en el perfil 2.

Esto significaría que los cambios de buzamiento que sufre la litósfera oceánica a lo largo de la región estudiada de la zona de subducción estarían ocurriendo de una manera gradual, no de una manera abrupta. En otras palabras, la estructura de la litósfera oceánica no presentaría segmentación a lo largo de tal región, sino más bien plegamientos.

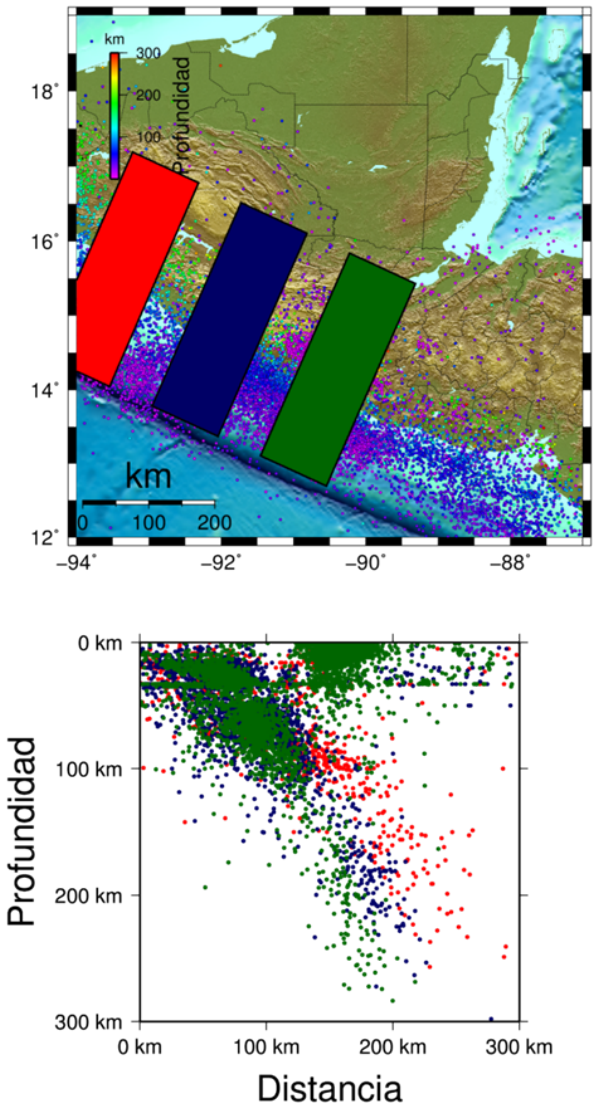


Figura 4.4. La zona de Wadati-Benioff exhibe ángulos de buzamiento diferentes en cada uno de los perfiles 1, 2 y 3.

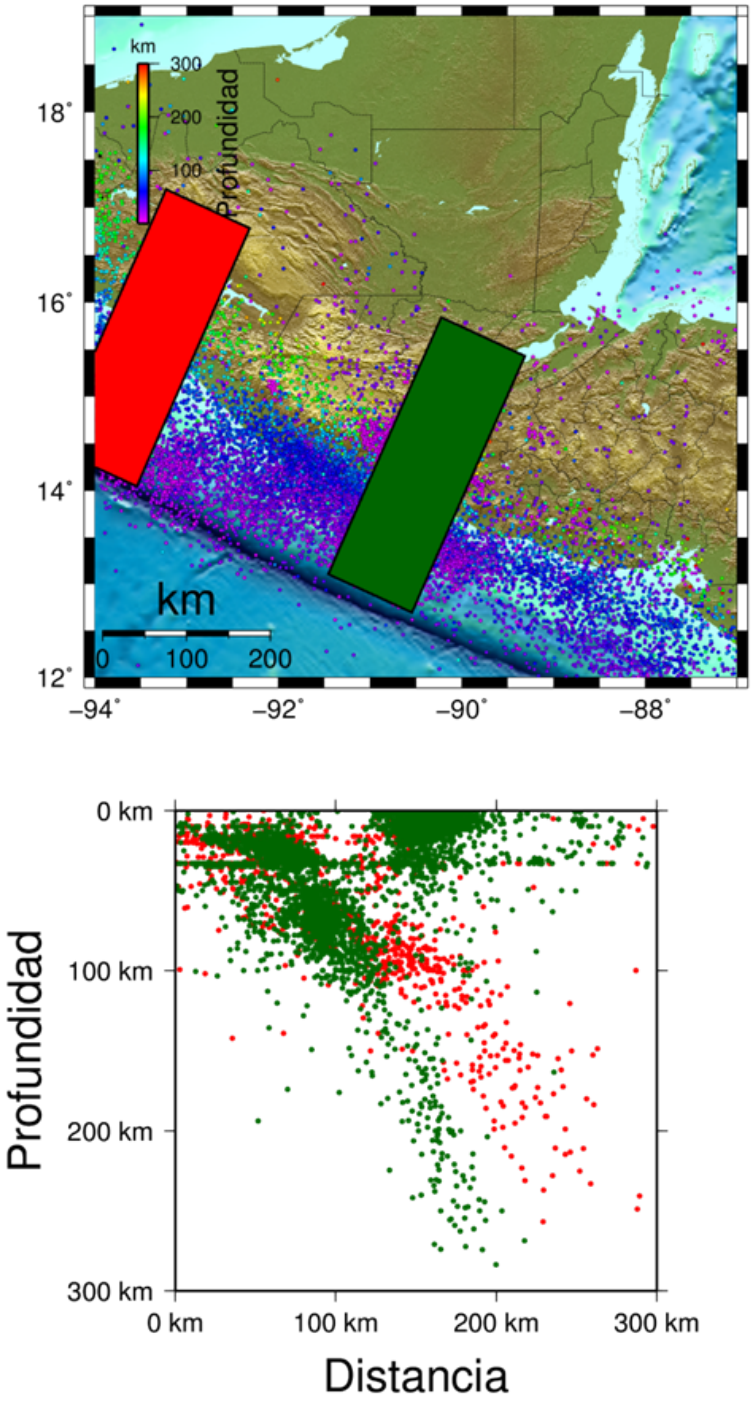


Figura 4.5. Comparación entre el ángulo de buzamiento de la litosfera oceánica exhibido en los perfiles 1 y 3.

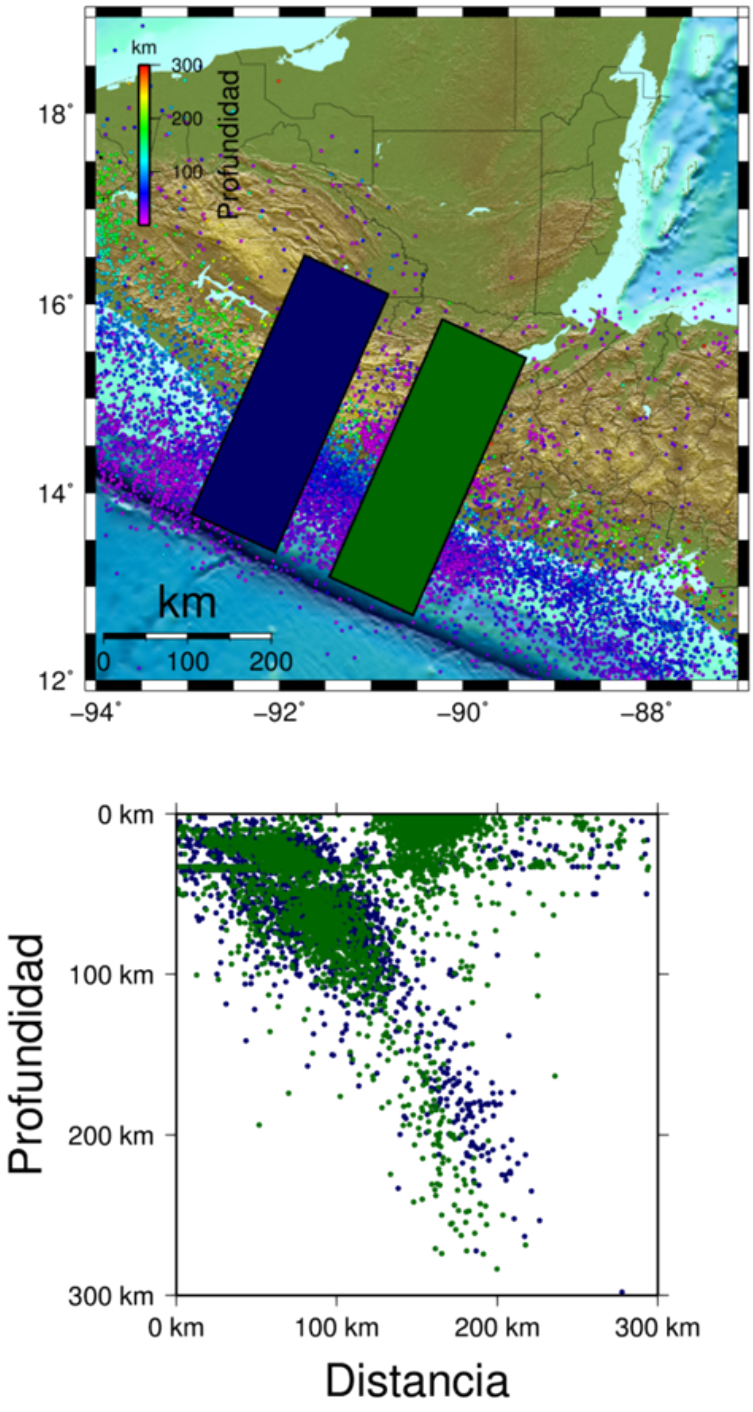


Figura 4.6. Comparación entre los perfiles 2 y 3.

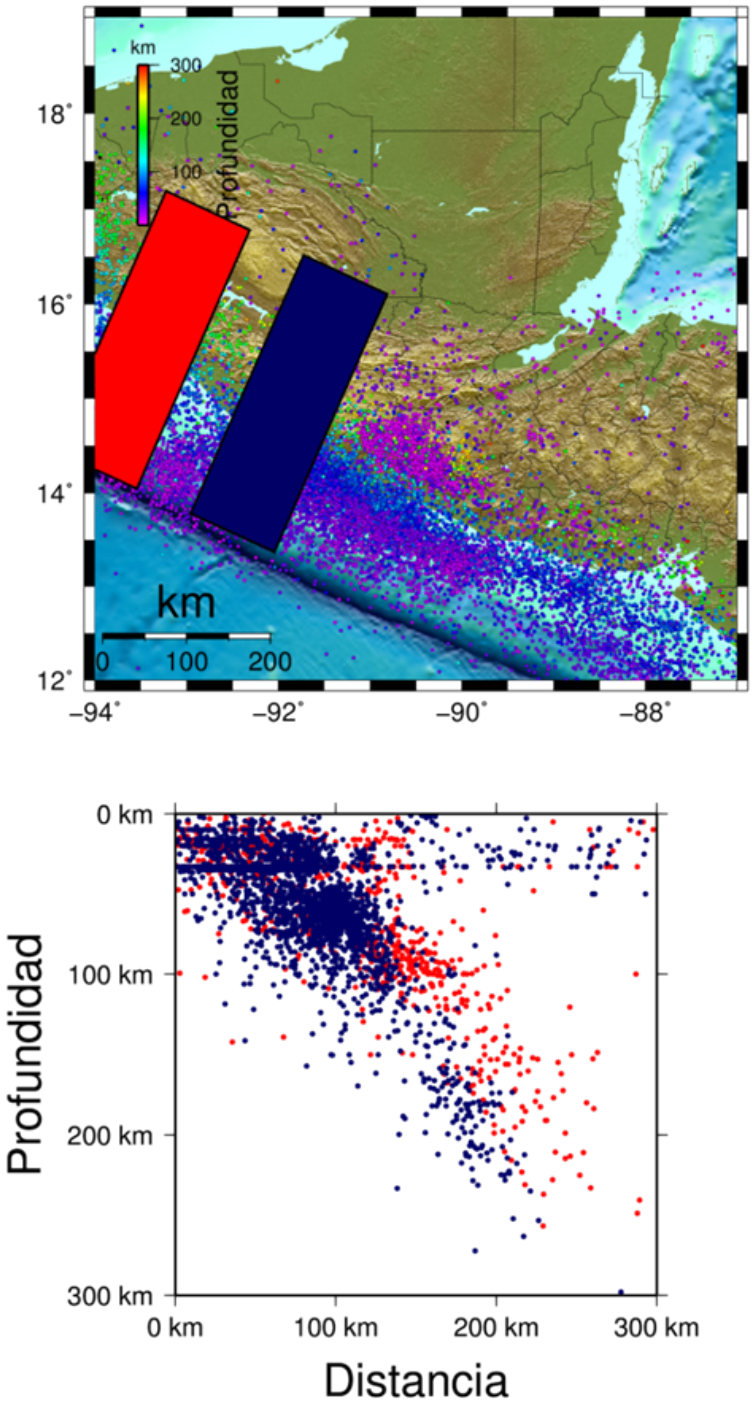


Figura 4.7. Comparación entre los perfiles 1 y 2.

4.3. Modelo del Cambio de Buzamiento Promedio de la Litósfera Oceánica en la Zona de Subducción

Entendiendo mejor la naturaleza de las variaciones en el buzamiento de la litósfera oceánica a lo largo de la zona de subducción, puede ahora modelarse el buzamiento promedio que ésta presenta en la región geográfica de interés.

Para tal propósito, se han realizado medidas en 13 perfiles diferentes, con la ayuda del editor de gráficos vectoriales Inkscape, de las distancias promedio (desde la fosa mesoamericana) a las cuales toma lugar la sismicidad para diferentes profundidades. La razón por la cual se ha decidido utilizar solamente esta cantidad de perfiles y no más es porque era necesario escoger entre perfiles que abarcaran la menor área superficial posible pero que a su vez contuvieran una alta cantidad de datos de sismicidad. Por lo que al final se escogieron perfiles de Q = 0.25°, de los cuales solamente 13 llegaron a tener cantidades de datos apropiadas para poder ser analizados. En la Tabla 4.1 se muestran las profundidades promedio bajo las cuales toma lugar la sismicidad en cada uno de los perfiles para diferentes profundidades (los perfiles han sido nombrados en base a la coordenada de longitud del origen de cada perfil sobre la recta base):

Tabla 4.1. Mediciones realizadas sobre los perfiles de profundidad.

	Distancias desde la fosa mesoamericana, en km, a las que toma lugar la sismicidad								
Perfil	**20**	**40**	**60**	**80**	**100**	**150**	**200**	**250**	**300**
88.00W_25*	26	55	78	100	112	148	169	188	194
89.00W_25	27	57	78	99	118	147	172	189	197
89.50W_25*	30	60	82	100	111	147	165	182	196
90.50W_25	20	60	78	95	108	137	166	185	198
91.00W_25	23	68	85	103	116	141	164	181	196
91.50W_25*	34	69	88	104	119	151	179	190	201
91.90W_25*	31	56	82	103	121	152	185	208	226
92.25W_25	32	57	84	103	118	155	190	215	235
92.50W_25	36	65	82	103	117	159	194	225	254
93.00W_25*	33	57	86	104	120	161	203	244	277
93.25W_25	31	69	85	105	130	174	219	255	284
93.50W_25*	26	67	90	109	125	173	218	251	284
94.00W_25*	30	69	93	118	142	184	223	262	286
	Profundidades promedio, en km, a las que toma lugar la sismicidad								

Con estos datos puede realizarse un esbozo del buzamiento promedio con el que la litósfera oceánica desciende en dirección a la astenosfera a medida que ésta atraviesa el proceso de subducción. Antes cabe resaltar que en algunos de los perfiles involucrados en la tabla anterior (esos remarcados por un asterisco) no fue detectada sismicidad cercana a los 300 km de profundidad, por lo que en tales casos hubo que extrapolar para poder crear un modelo sistemático; tal extrapolación fue realizada en base a las tendencias exhibidas por la orientación de las zonas de Wadati-Benioff reflejadas en los perfiles de profundidad. Por lo que en el modelo que en la Figura 4.8 se presenta no se presume que en tales regiones la litósfera aun presente una estructura sólida o sísmicamente activa [*Skinner et al.,* 2011], sino mas bien que, de presentarla, estaría localizada alrededor de tales profundidades.

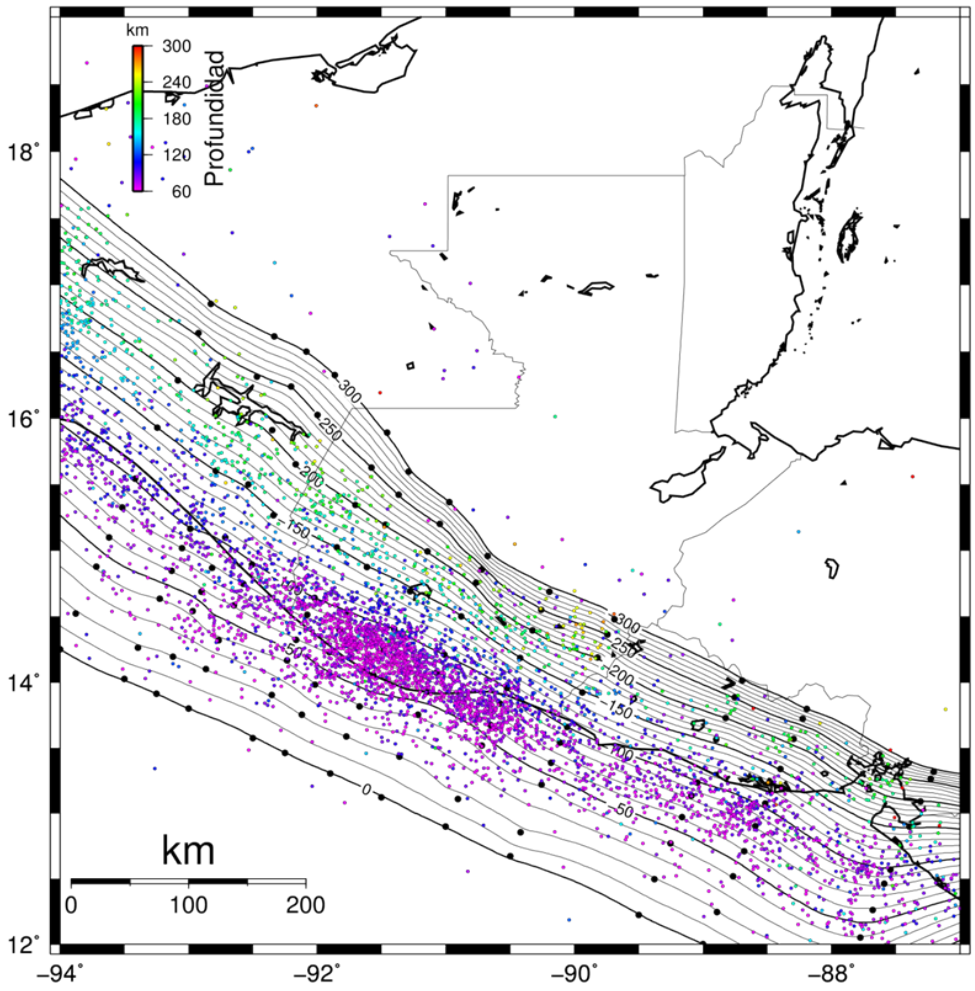


Figura 4.8. Modelo del buzamiento de la litósfera oceánica atravesando el proceso de subducción

El modelo presentado en la Figura 4.8 muestra datos de sismicidad con hipocentros de 60 a 300 km de profundidad, así como los nodos utilizados para realizarlo, los cuales fueron obtenidos a partir de los datos de la tabla 4.1. Los trazos que unen tales nodos representan curvas de nivel (o líneas de contorno) de las profundidades promedio de la litósfera oceánica; los valores mostrados están en kilómetros.

Con la ayuda de la escala de color puede observarse que no todas las profundidades sísmicas corresponden a las profundidades representadas en el modelo, esto sin embargo no implica que éste este erróneo. Hay que recordar que el modelo simplemente representa las profundidades promedio de la litósfera oceánica exhibidas en los perfiles, sin prestar atención al grosor de ésta, el cual es capaz de alcanzar cantidades de decenas, inclusive cientos de kilómetros [*Karato*, 2008]. Pero esto se discutirá mas adelante, por el momento lo que interesa son los cambios en el buzamiento que el modelo propone para la litósfera oceánica.

4.3.1. Identificación de Posibles Zonas de la Litósfera Oceánica en Base a los Cambios en su Buzamiento

En base al modelo presentado, se han identificado tres zonas principales definidas por diferentes características relacionadas al buzamiento de la litósfera oceánica. Cabe resaltar que cualquier grado de confiabilidad que pueda asociarse al modelo no puede ir mas allá de esas regiones estudiadas mediante perfiles de profundidad. En la Figura 4.9 se muestran remarcadas en colores diferentes tales zonas.

La zona más al noroeste del mapa será la "zona A", la intermedia la "zona B" y la que esta localizada más al sureste será la "zona C". Como puede observarse, las zonas A y C presentan buzamientos mas o menos uniformes de forma paralela a la fosa mesoamericana (detallada en el modelo por la curva de nivel de profundidad 0). Es la zona B, la zona intermedia, en la que el buzamiento cambia de forma dramática; es en ésta donde ocurre la transición entre el buzamiento de la zona A y la zona C. La tabla 4.2 muestra las diferencias entre los ángulos de buzamiento de las diferentes zonas identificadas para todo el rango de profundidades de la litósfera oceánica.

Tabla 4.2. Buzamiento de la litósfera oceánica en cada una de las posibles zonas identificadas.

	0-50 km	**50-100 km**	**100-150 km**	**150-200 km**	**200-250 km**	**250-300 km**
Zona A	32°- 33°	40°- 45°	49°	47°- 50°	53°- 54°	58°- 60°
Zona B	34°- 35°	45°	50°- 54°	50°- 58°	51°- 66°	56°- 71°
Zona C	33°- 36°	47°- 51°	57°- 58°	66°- 67°	71°	70°- 75°

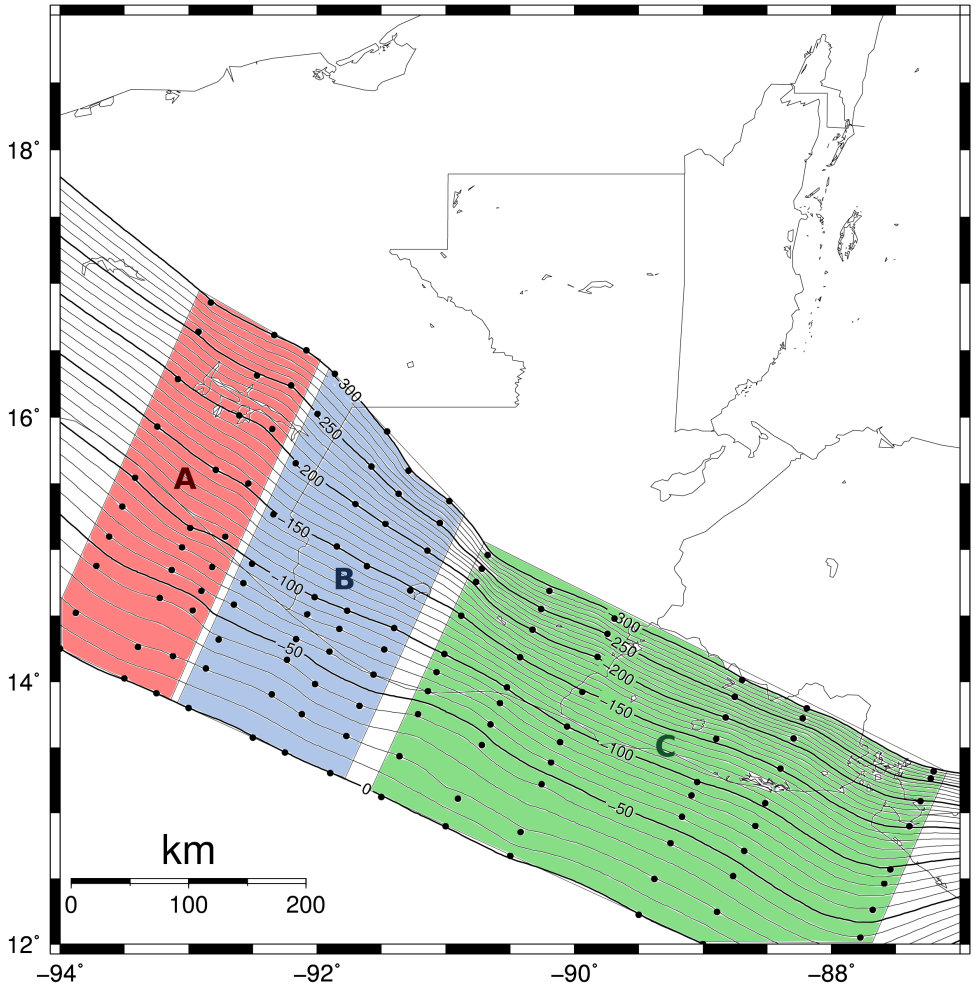


Figura 4.9. División de la litósfera oceánica en zonas caracterizadas por buzamientos diferentes.

4.3.2. Discusión del Modelo en Relación al Grosor de la Litósfera Oceánica

El modelo presentado anteriormente es una representación del buzamiento promedio de la litósfera oceánica a lo largo de la zona de subducción; el buzamiento

da información acerca de la orientación y geometría de ésta. Viéndolo de otra perspectiva aproximada, podría decirse que lo que se está modelando es la forma de un plano intermedio de la litósfera oceánica localizado entre sus planos superficiales (superior e inferior).

Si al modelo se le añade información acerca del grosor de la placa de Cocos, al cual le ha sido estimado un valor aproximado de 50 km [*Conrad et al.*, 2006] éste describiría entonces una posible estructura tridimensional de la litósfera oceánica.

Anteriormente fue mencionado como es que no todas las profundidades registradas en el catálogo sísmico principal parecen coincidir con las profundidades modeladas para la litósfera oceánica. Esto, se habló, era debido a que solamente se estaba modelando el buzamiento promedio de la litósfera oceánica. Incorporando ahora la información disponible acerca del grosor litosférico, se puede entonces discutir que tan bien describe el modelo la estructura tridimensional de la litósfera oceánica. Para lograrlo se observa que tanto coincide el espacio ocupado por la litósfera oceánica de acuerdo al modelo, con la localización de la sismicidad asociada a ésta.

Para tales propósitos, han sido construidos dos planos paralelos al plano intermedio, desplazados a ± 35 km de éste, y se ha determinado la cantidad de eventos sísmicos localizados entre éstos para cada una de las zonas propuestas en el modelo. Estos planos representan las superficies superior e inferior de la litósfera oceánica; 25 de los 35 km de desplazamiento son debido al semi-grosor estimado de la litósfera oceánica, los 10 km restantes son debido al error aceptado en los parámetros de localización de los eventos sísmicos. Se está asumiendo que el grosor de la litósfera se mantiene constante a lo largo de toda la zona de subducción.

En la figura 4.10 se muestra la zona de Wadati-Benioff de la litósfera oceánica superpuesta al perfil de los planos que describen su posible estructura tridimensional. Más adelante, en la Tabla 4.3 se detalla la cantidad de eventos símicos asociados a la zona de subducción localizados fuera del espacio físico que ocuparía la litósfera oceánica de acuerdo al modelo.

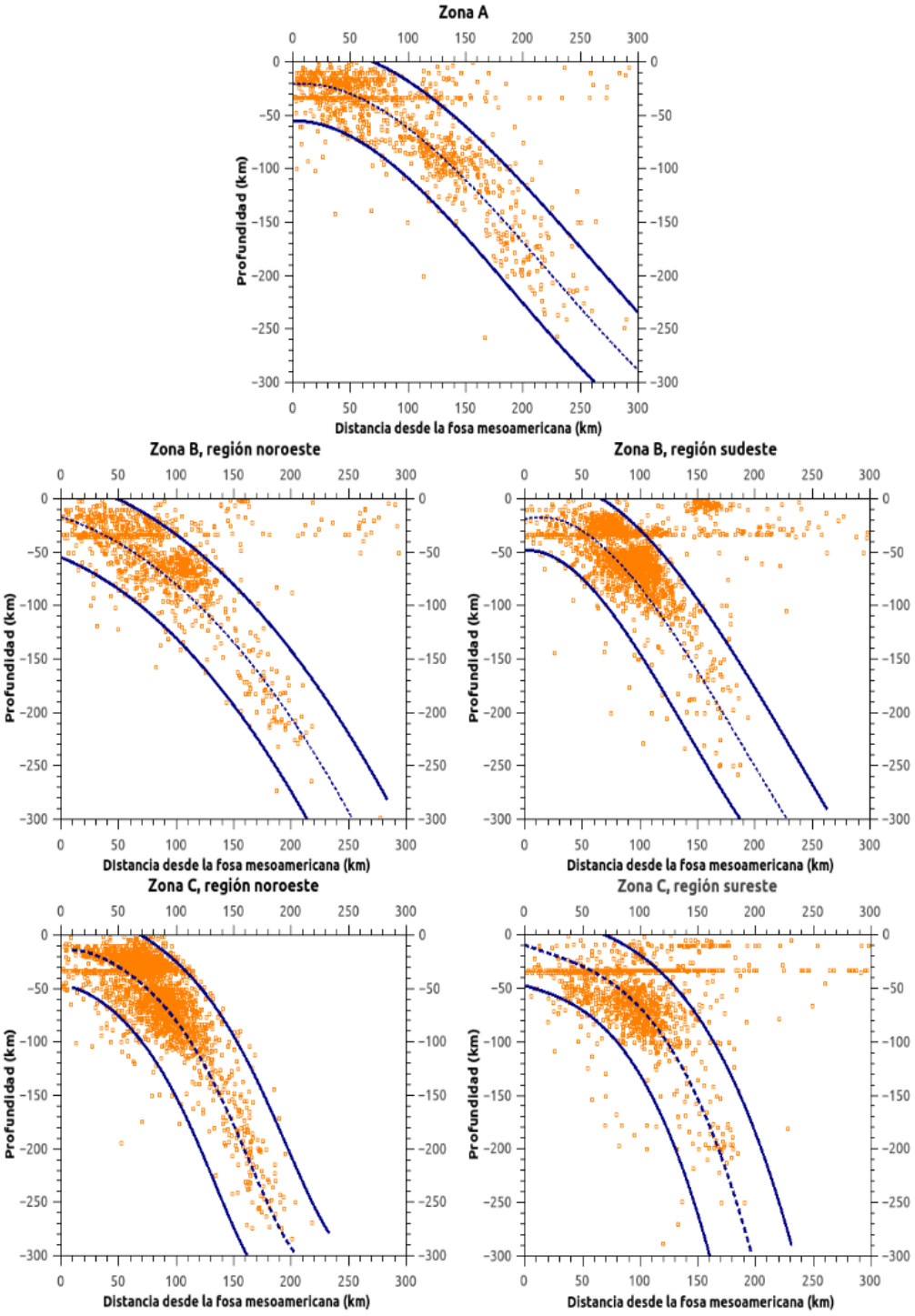


Figura 4.10. Zonas de Wadati-Benioff superpuestas al perfil del modelo tridimensional de la litosfera oceánica fijado con un grosor de 50 km.

Tabla 4.3. Eventos sísmicos localizados fuera de la estructura modelada de la litósfera oceánica.

Zona	Sismos	Discrepancia [1]
A	1083	6.5 %
B	3028	4.8 %
C	4569	9.2 %
Total	8680	7.3 %

En general, el modelo parece adaptarse bien al grosor estimado por Conrad et. Al. (2006) para la placa de Cocos, coincidiendo la localización de la sismicidad con la estructura tridimensional modelada en al menos un 92.7 %. Este porcentaje seguramente es mayor; como puede verse en la Figura 4.10, mucha de la sismicidad (representada en los perfiles de profundidad) localizada fuera de los límites modelados de la litósfera oceánica está claramente asociada a la litósfera continental.

[1] Porcentaje de sismicidad localizada fuera de la estructura modelada de la litósfera oceánica.

5. SISMICIDAD IMPORTANTE ASOCIADA LA ZONA DE SUBDUCCIÓN

En el capítulo 4 fueron identificadas tres zonas de la litósfera oceánica en la región geográfica estudiada en base a variaciones en el ángulo de subducción exhibido por ésta. Es posible que tales variaciones del buzamiento conlleven lo siguiente:

- Diferencias en el comportamiento de la interacción entre ambas placas litosféricas.
- Diferencias en la distribución de presiones y temperaturas a las que las distintas zonas de la litósfera oceánica estarían sometidas a medida que ésta realiza el proceso de subducción [*Stein et al.,* 2002].

Esto lleva a plantear la hipótesis de que es posible que la sismicidad localizada en cada una de las zonas propuestas de la litósfera oceánica presente características diferentes, una con respecto a las otras; esto es debido a que las propiedades descritas anteriormente son las principales fuentes de sismicidad asociadas a las zonas de subducción [*Stein et al.,* 2002]. En éste capítulo se estudiará la distribución de la sismicidad de grandes magnitudes localizada en la litósfera oceánica junto con sus mecanismos focales con el fin de observar el comportamiento de la sismicidad en cada una de las zonas propuestas de la litósfera oceánica.

5.1. Características Generales de la Sismicidad de Grandes Magnitudes Localizada en la Región Geográfica de Interés

La zona de subducción asociada a la fosa mesoamericana es responsable del 93 % de la energía sísmica liberada en la región comprendida por Centroamérica y el sur de México, siendo capaz de generar sismos de magnitud Ms 7.9 (sismos de mayores magnitudes aun no han sido registrados) [*Bundschuh et al.,* 2007]. La región más activa de la zona de subducción es la que está localizada en el Pacífico de Guatemala, El Salvador y Nicaragua; es ahí donde ocurren los terremotos mas fuertes

del área (mas no necesariamente los mas peligrosos para la población) [*Bundschuh et al.,* 2007]. De acuerdo al catálogo del USGS, más de 680 sismos de magnitud M >4.9 han ocurrido en la región geográfica de interés desde la década de 1950.

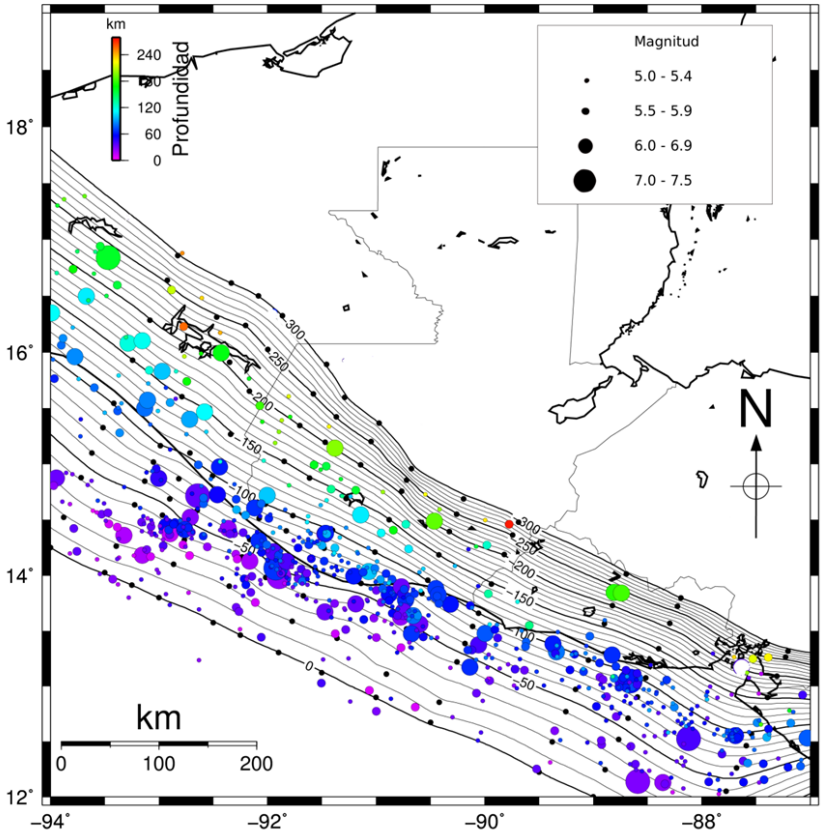


Figura 5.1. Sismicidad de grandes magnitudes localizada en la zona de subducción, tomada exclusivamente del catálogo del USGS.

La sismicidad en las zonas de subducción puede dividirse en dos tipos principales: sismicidad interplaca, la cual ocurre debido a la interacción convergente entre las placas, y sismicidad intraplaca, la cual ocurre debido a deformaciones y rupturas en el interior de la placa realizando el proceso de subducción debido a condiciones de alta temperatura y presión [*Ruff,* 1996; *Kirby et al.,* 1996]. Dada la región de la zona de Wadati-Benioff en la que parece ocurrir el plegamiento de la litósfera oceánica (observada en los perfiles de profundidad), en este trabajo se estará considerando a la sismicidad de subducción con profundidades menores a 80 km como sismicidad interplaca y a la sismicidad con profundidades mayores a estas como sismicidad intraplaca.

En la Figura 5.1 puede observarse como es que la mayoría de la sismicidad fuerte en la región estudiada de la zona de subducción sería interplaca; mientras que solamente alrededor de un 30 % de la sismicidad con M >5.9 sería sismicidad intraplaca. La sismicidad interplaca parece concentrarse más fuertemente frente a las costas de Guatemala que a las de El Salvador y el sur de México. Por otro lado, la sismicidad intraplaca de grandes magnitudes parece estar localizada en mayor medida bajo el territorio del sur de México.

5.1.1. Distribución de la Sismicidad de Grandes Magnitudes en las Diferentes Zonas Propuestas Para la Litósfera Oceánica

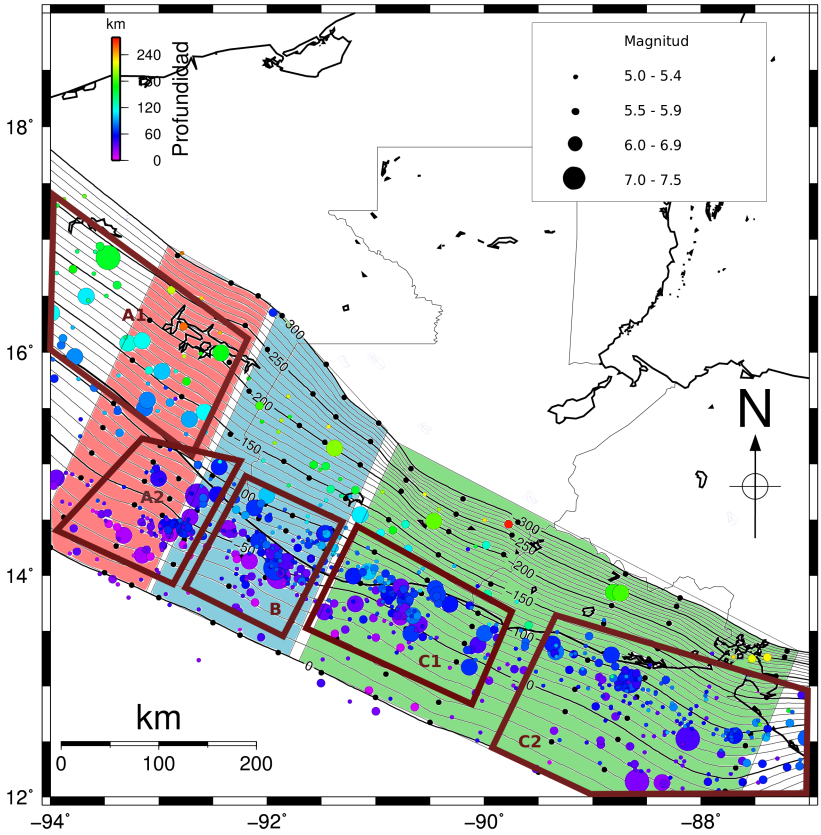


Figura 5.2. Agrupaciones aparentes de la sismicidad de grandes magnitudes asociada a la zona de subducción.

En la Figura 5.2 pueden apreciarse aparentes agrupaciones de la sismicidad de grandes magnitudes en áreas, o polígonos, cuyos límites, en su mayor parte, no atraviesan las fronteras de las zonas propuestas para la litósfera oceánica; esto podría

respaldar la hipótesis planteada anteriormente. Las agrupaciones A1 y A2 son los únicas que se extienden mas allá de los límites de las zonas propuestas (la zona A), la agrupación A2 de hecho ocupa parte de dos zonas diferentes, la A y la B. De acuerdo a ésto se podría pensar en extender el área que ocupa la zona A, tal y como lo muestra la línea punteada en la figura 5.3.

De acuerdo a la escala de colores, la sismicidad de cuatro de las cinco agrupaciones identificadas parece ser primordialmente interplaca (la agrupación A1 sería la única excepción, ya que ésta se encuentra conformada solamente de sismicidad intraplaca; esta es de hecho otra forma en la que la zona A se diferencia de las otras dos, ya que solo en ésta se aprecian agrupaciones de tal tipo de sismicidad). Tales agrupaciones parecen dividir a la litósfera oceánica en zonas, las cuales parecen concordar en su mayor parte con las zonas identificadas en el capítulo anterior en base al buzamiento de la litósfera oceánica. Esto no debería de ser sorpresa ya que ambos fenómenos, el buzamiento de la litósfera oceánica y la sismicidad interplaca, son consecuencia directa de la interacción convergente entre las placas litosféricas.

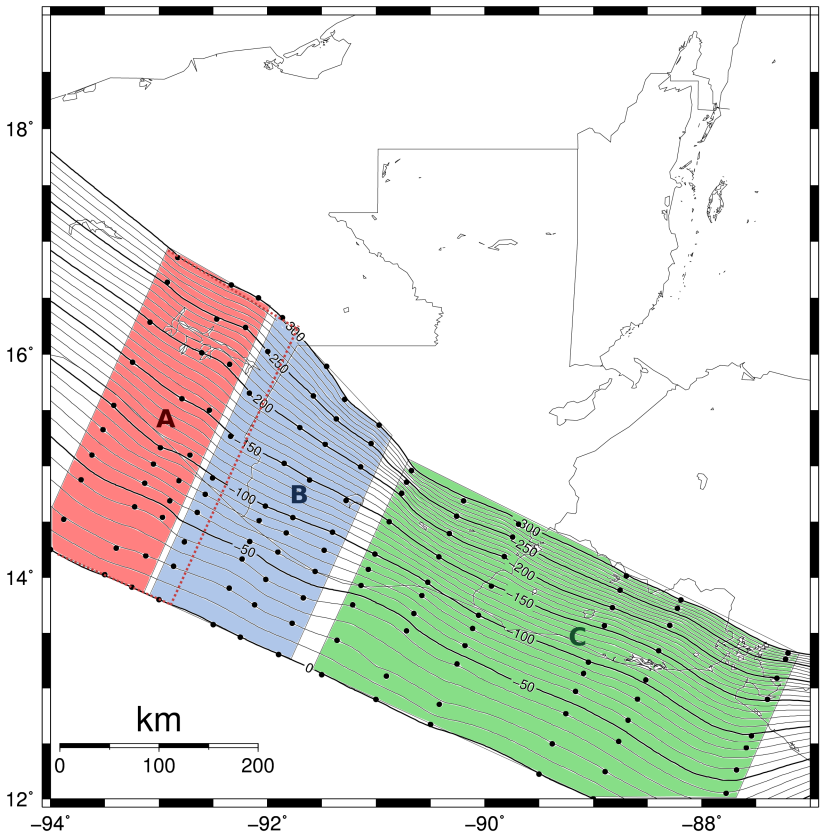


Figura 5.3. Propuesta alternativa de la separación en zonas de la litósfera oceánica.

5.2. Mecanismos Focales en las Diferentes Zonas Propuestas de la Litósfera Oceánica

Se han analizado los mecanismos focales registrados en el catálogo del CMT [*Dziewonski et al.*, 1981; *Ekström et al.,* 2012] de la sismicidad localiza en el área geográfica de interés, tratando de observar indicios que apoyen las conclusiones alcanzadas en el capítulo anterior, así como también la hipótesis planteada al inicio de este capítulo.

Debido a la complejidad de analizar mecanismos focales individualmente cuando estos se concentran en una determinada región geográfica, o cuando no todos son similares [*Frohlich*, 1992], en este trabajo se ha decidido representar a los mecanismos focales en diagramas triangulares, los cuales asignan a los eventos sísmicos puntos específicos dentro de una región triangular en base a los ejes P (de compresión) y T (de tensión) de sus respectivos mecanismos focales. Dichos diagramas sirven para observar como es que la actividad sísmica se encuentra distribuida en base al principal tipo de movimiento de falla asociada a ésta: sismicidad debido a fallamientos transcurrentes (*Strike-slip*), normales (*Normal*) o inversos (*Thrust*) [*Frohlich*, 1992]. En la sección de apéndices se presentan los parámetros de los mecanismos focales utilizados, así como la representación de estos en su simbología mas común de pelotas de playa mapeados en la región geográfica de interés, y su proyección en un perfil de profundidad arbitrario.

Para realizar los diagramas triangulares se ha utilizado el paquete de software *RFOC*, versión 3.3-3, programado en lenguaje R por Jonathan M. Lees en 2012. En la Figura 5.4 se muestran los diagramas triangulares de los mecanismos focales localizados en cada una de las zonas propuestas (modificadas en base a las agrupaciones mostradas en la Figura 5.2), los cuales exhiben las características esperadas de una zona de subducción: sismicidad asociada principalmente a fallas inversas y, en una menor proporción, a fallas normales [*Stein et al.,* 2002]. Para la zona C solamente han sido diagramados los mecanismos focales localizados sobre y frente a las costas de Guatemala (y noroeste de El Salvador), ya que para el resto de ésta no se cuenta con muchos datos.

Es de especial interés estudiar la sismicidad asociada a fallas inversas (tipo *Thrust*), ya que es ésta la que se encuentra mas relacionada al tipo de movimiento

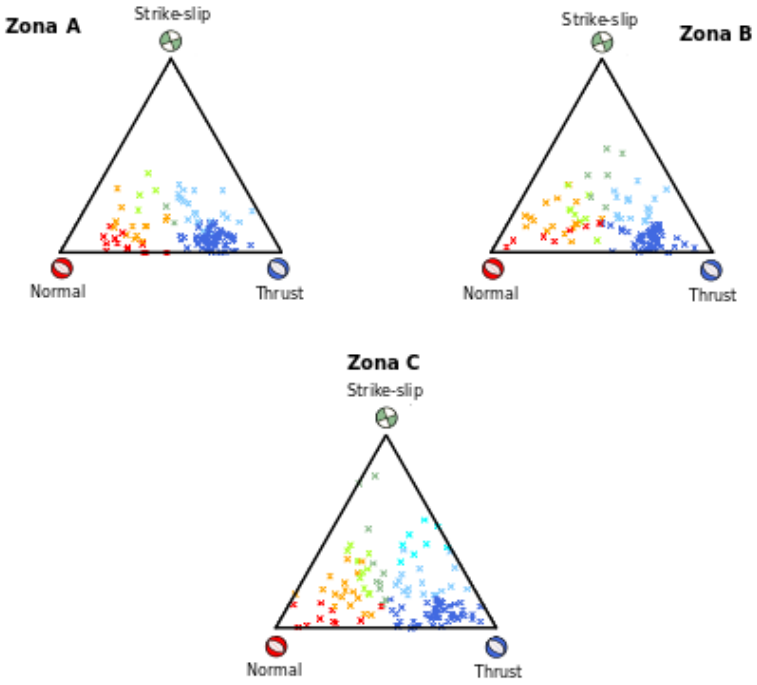


Figura 5.4. Diagramas triangulares de la sismicidad localizada en cada una de las zonas propuestas de la litósfera oceánica.

que ocurre entre las placas litosféricas involucradas en un proceso de subducción [*Stein et al.*, 2002].

En la Figura 5.5 se comparan las regiones del diagrama triangular en las que se concentra la sismicidad caracterizada por una componente *Thrust* dominante en sus mecanismos focales para las posibles zonas de la litósfera oceánica identificadas en el capítulo anterior. Como puede apreciarse, la zona con sismicidad mas cercana al vértice *Thrust* sería la zona C, a ésta le sigue la zona B y, por último, la zona A. Esto quiere decir que las zonas que exhiben un mayor ángulo de buzamiento son también las que presentan sismicidad con una mayor componente de sismicidad tipo *Thrust*. Esto último puede expresarse mediante la proporción relativa f_{Thrust} de la componente *Thrust* que presenta un mecanismo focal, la cual está definida como [*Frohlich*, 1992]:

$$f_{Thrust} = \sin^2 \delta_T$$

Donde δ_T representa el dip angle del eje T del mecanismo focal. En la Tabla 5.1 se presenta el f_{Thrust} promedio de la sismicidad *Thrust* de cada una de las zonas.

Tabla 5.1. Proporción relativa de la sismicidad *Thrust* de la litósfera oceánica.

	Ángulo de buzamiento máximo	**Mecanismos focales**	δ_T **promedio**	f_{Thrust} **promedio**
Zona A	60°	84	63.3°	0.786
Zona B	71°	73	65.6°	0.815
Zona C	75°	68	67.0°	0.826

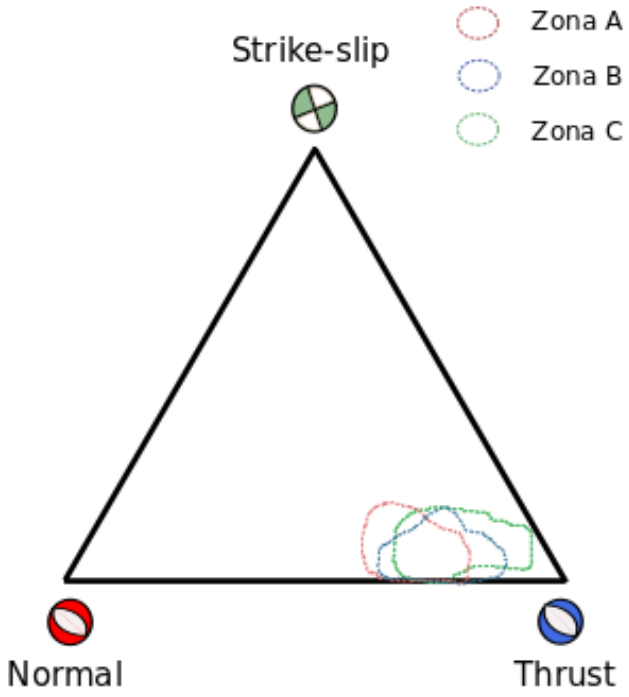


Figura 5.5. Distribución en los diagramas triangulares de la sismicidad tipo *Thrust* localizada en las diferentes zonas propuestas de la litósfera oceánica.

Como puede apreciarse claramente, mientras mayor es el ángulo de buzamiento de cada una de las zonas propuestas de la litósfera oceánica, mayor es también la proporción *Thrust* relativa promedio de sus mecanismos focales. Por lo tanto, así como con la sismicidad interplaca de altas magnitudes, en los mecanismos focales también se encuentra apoyo a la división de la litósfera oceánica en zonas representadas por buzamientos diferentes.

CONCLUSIONES

1. Pese a haber sido escogido como fuente primaria de información, alrededor de un 72 % del catálogo sísmico de INSIVUMEH ha tenido que ser desestimado debido a la alta incertidumbre asociada a muchas de las localizaciones sísmicas registradas en éste. Por lo tanto, hubo que incorporar información del catálogo sísmico del USGS para poder observar la zona de Wadati-Benioff (asociada a la zona de subducción estudiada en este trabajo) por medio de perfiles de profundidad. El estudio detallado en este trabajo no hubiera podido haber sido realizado sin la información obtenida de la combinación de ambos catálogos.

2. El ángulo de buzamiento cambia a lo largo de la región estudiada de la litósfera oceánica de una forma gradual. No han sido observadas posibles fragmentaciones de ésta.

3. A través del análisis de la zona de Wadati-Benioff, se ha construido un modelo del buzamiento promedio de la región estudiada de la litósfera oceánica. Al agregar a dicho modelo información del grosor de la placa de Cocos, éste describe una posible estructura tridimensional de la litósfera oceánica. Utilizando el estudio de Conrad et. al. (2006) para grosores litosféricos, se ha encontrado que mas del 92 % de la sismicidad de subducción estudiada en este trabajo se encuentra localizada dentro de los límites modelados de la litósfera oceánica.

4. En el modelo han sido identificadas tres diferentes zonas en las que la región estudiada de la litósfera oceánica estaría dividida, las cuales se diferencian entre si en base al ángulo de buzamiento exhibido por estas: la zona A y la zona C presentan buzamientos máximos (en su región mas profunda) de 60°y 75°respectivamente, y tal cambio de buzamiento ocurre de manera gradual (no abrupta) a través de la zona B, la cual ha sido identificada como la zona de transición (en el buzamiento) entre las zonas A y C.

5. La sismicidad interplaca de grandes magnitudes tiende a agruparse en regiones cuyos límites, en su mayor parte, no atraviesan los límites propuestos para

las zonas identificadas de la litósfera oceánica. El único caso en que esto ha sucedido ha sido utilizado para modificar ligeramente el límite entre la zona A y la zona B.

6. En las tres zonas identificadas de la litósfera oceánica ocurre sismicidad intraplaca de grandes magnitudes; sin embargo, ésta solamente parece agruparse de manera significativa en la zona A.

7. Mientras mayor es el ángulo de buzamiento de las zonas propuestas, mayor es también la proporción Thrust relativa promedio de los mecanismos focales localizados en estas: para los mecanismos focales registrados en el catálogo del CMT, éste valor a resultado ser de 78.6 %, 81.5 % y 82.60 % para las zonas A, B y C respectivamente. Y lo mismo sucede con el valor promedio del *dip angle* del eje T, el cual ha resultado ser de 63.3°, 65.6°y 67.0°respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. Buscar las posibles causas relacionadas a la alta incertidumbre asociada a muchas de las localizaciones sísmicas registradas en el catálogo de INSIVUMEH y estudiar la posibilidad de relocalizar eventos sísmicos con localizaciones poco confiables.

2. Tratar de implementar un catálogo de mecanismos focales utilizando las formas de onda registradas en la base de datos de INSIVUMEH, de manera que en el futuro pueda estudiarse de una manera mas completa la sismicidad asociada a la zona de subducción.

3. Complementar los resultados obtenidos en este estudio con información geotectónica que ayude a comprender desde otra perspectiva la interacción entre la placa de Cocos y la placa del Caribe.

4. Realizar otros estudios que complementen o enriquezcan la comprensión de la zona de subducción.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J. Álvarez. *Tectónica activa y geodinámica en el norte de Centroamérica. Tésis de doctorado.* Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Geodinámica, España, 2009.

[2] J. Bundschuh, G. E. Alvarado. *Central America: geology resources hazards.* Taylor Francis Group, LLC, Boca Raton, FL., 2012,

[3] J. Case, T. Holcombe, R. Martin. Map of geological provinces in the Caribbean region. Geological Society of America Memoir, 162, 1-30, 1984.

[4] C. P. Conrad, Lightgow-Bertelloni. *Influence of continental roots and asthenosphere on planet-mantle coupling.* Geophysical research letters, 33, L05312, 2006.

[5] C. DeMets. *A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: implications for slip along the Central American volcanic arc.* Geophysical Research Letters, 28, 4043-4046s, 2001.

[6] A. M. Dziewonski, T.-A. Chou and J. H. Woodhouse. *Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity.* J. Geophys. Res ., 86, 2825-2852, 1981.

[7] G. Ekström, M. Nettles, Dziewonski. *The global CMT project2004-2010: centroid-moment tensor for 13017 earthquakes.* Phys. Earth planet. Inter., 200-201, 1-9, 2012.

[8] C. Frohlich. *Triangle diagrams: ternary graphs to display similarity and diversity of earthquake focal mechanisms.* The university of Texas institute for geophysics, 8701 N MoPac Exwy, Austin, TX 78759, USA, 1992.

[9] B. H. Hager, R. J. O'Connell. *Subduction zone dip angles and flow driven by plate motion.* Elsevier scientific publishing company, Amsterdam, 1978.

[10] K. H. James. *The Caribbean ocean plateau - an overview, and a different understanding.* Institute of geography and earth science, University of Wales, UK, 2007.

[11] S-I. Karato. *Earth materials: an introduction to the rheology od solid Earth.* Cambridge University Press, New York, 2008.

[12] Y. R. Kim, W. Clayton, J. M. Jackson. *Geometry and seismic properties of the subducting Cocos plate in central Mexico.* Journal of geophysical research, vol. 115, 2010.

[13] S. H. Kirby, S. Stein, E. Okal, D. C. Rubie. *Metastable mantle phase transformations and deep earthquakes in subducting oceanic lithosphere.* Rev Geophys., 34, 261-306, 1996.

[14] J. M. Lees. Package RFOC. Consultado en septiembre del 2015. `https://cran.r-project.org/web/packages/RFOC/RFOC.pdf`

[15] W. Lowrie. *Fundamentals of geophysics.* Segunda edición, Cambridge University press, Cambridge, 2007.

[16] P. Mann. *Geologic and tectonic development of the Caribbean plate boundary in northern Central America.* Geological society of America, Inc., USA, 2007.

[17] C. J. Rebollar et. al. *Distributions of stresses and geometry of the Wadati-Benioff zone under Chiapas, Mexico.* Geofísica internacional, vol. 38, 1999.

[18] L. J. Ruff. *Large earthquakes in subduction zones: segment interaction and recurrence times.* S. American geophysical union, Washington DC, 1996.

[19] N. A. Rupert, J. M. Lees, N. P. Kozyreva. *Seismicity, earthquakes and structure along Alaska-Aleutian and Kamchatka subduction zones: a review.* AGU, Washington DC, 2007.

[20] G. Schmalzle. *Mapping and plotting data with generic mapping tools (GMT).* Consultado el 31 de Diciembre del 2014 en `http://geodesygina.com/GMT.html`

[21] H. Sigurdsson et al. *The encyclopedia of volcanoes.* Segunda edición, Elsevier Inc., USA, 2015.

[22] S. A. Sipkin. *Rapid determination of global moment-tensor solutions.* Geophysical research letters, v. 21, 1994.

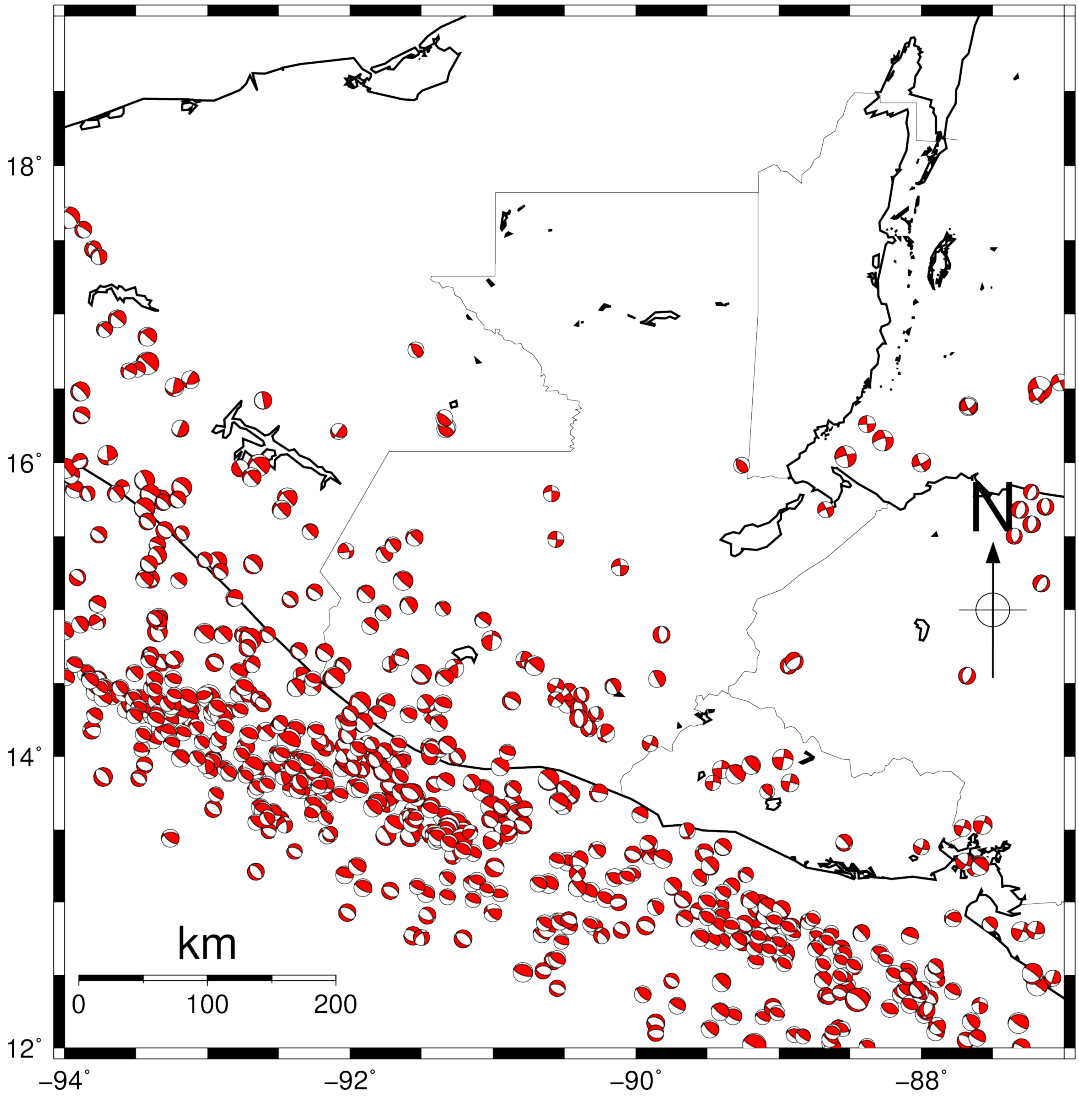
[23] B. J. Skinner, B. W. Murck. The blue planet: an introduction to Earth system science. Tercera edición, John Wiley Sons Inc, USA, 2011.

[24] S. Stein, E. Klosko. *International handbook of earthquake and engineering seismology, Part A, Chapter 07: earthquake mechanisms and plate tectonics.* Academic press, 2002.

APENDICE A

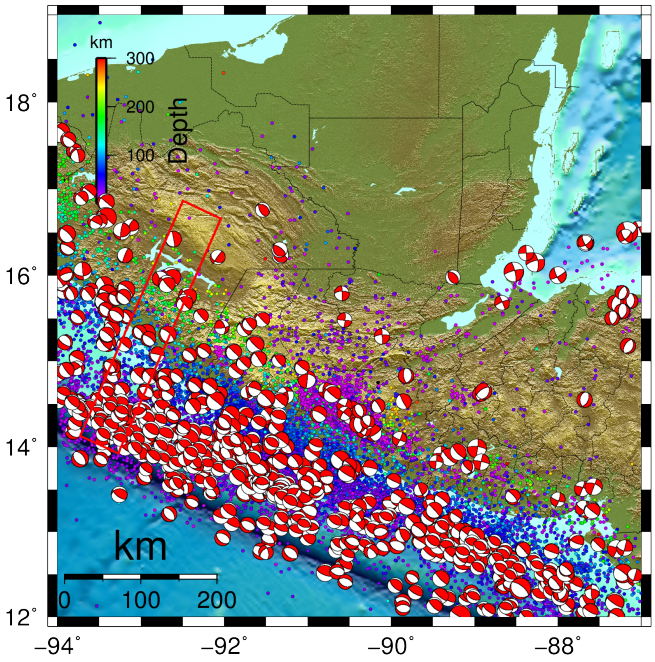
Mapa de Mecanismos Focales

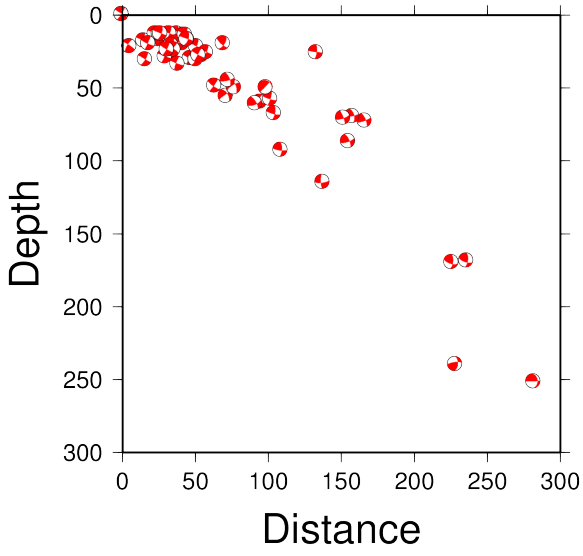
A continuación se muestran en un mapa los mecanismos focales registrados en el CMT localizados en la región geográfica de interés



Perfil de profundidad de mecanismos focales

En la siguiente imagen se representa a los mecanismos focales proyectados en un plano perpendicular a la fosa mesoamericana.





APENDICE B

Diagramas Triangulares

A continuación se muestra un listado de los mecanismos focales utilizados para realizar los diagramas triangulares discutidos en el capítulo 5. La información de ángulos de strike, dip y rake mostrada a continuación fue derivada por medio del paquete de software RFOC en base a la información, tomada del catálogo del CMT, de los tensores de momento de los eventos sísmicos.

Mecanismos focales utilizados para realizar
el diagrama triangular de la zona A

Longitud	Latitud	Strike	Dip	Rake
-93.83	14.53	129.01179	58.4488	97.77829
-93.82	14.52	133.26022	72.18217	97.05483
-93.81	14.18	132.2859	45.3931	314.8134
-93.79	14.44	125.50641	73.22203	95.45808
-93.79	14.28	125.3058	76.33967	96.12204
-93.77	14.52	120.99628	75.06874	265.9433
-93.75	14.47	132.30075	68.15458	97.39204
-93.73	14.4	131.13597	70.70408	95.89201
-93.72	14.48	129.66393	66.59477	95.6234
-93.67	14.41	140.8765	68.0409	104.6144
-93.66	14.41	129.13804	65.94672	97.09135
-93.64	14.45	135.12026	81.26317	92.05938
-93.61	14.47	143.71165	70.1841	99.58581
-93.59	14.43	133.27284	66.88461	97.86057
-93.57	14.32	142.46775	73.46019	75.26178
-93.52	14.34	129.06958	71.03449	98.90651
-93.52	14.4	137.90677	67.65262	105.53971
-93.51	14.57	138.10174	79.09672	116.21258
-93.51	14.34	283.45052	23.71094	65.52457
-93.51	14.28	286.223	20.88102	60.81058
-93.48	14.34	132.73516	59.69169	107.64335
-93.47	14.39	119.88768	73.80365	92.2097
-93.46	14.29	117.22382	69.5671	90.62504
-93.46	14.05	92.80162	60.85053	70.01148
-93.45	14.15	129.9502	59.6129	95.6063
-93.44	15.21	139.17085	75.57718	110.70626
-93.44	14.32	126.86041	71.56243	96.56711
-93.41	15.31	128.95893	13.43576	270.42592
-93.41	14.66	144.73722	60.31774	124.4843
-93.4	15.21	113.93356	29.02458	257.64811
-93.4	14.69	161.05941	20.07856	287.84667
-93.39	14.28	119.9925	70.60892	94.15642
-93.39	14.47	130.14686	66.88557	95.87682
-93.38	14.11	116.0595	70.38425	92.15824
-93.37	14.53	127.52168	66.20704	95.13775
-93.37	14.46	130.04821	60.1734	98.06348

-93.37	14.94	135.6653	30.08941	271.45603
-93.36	14.26	124.12981	61.13582	98.93864
-93.35	15.44	98.06614	15.74961	251.15876
-93.35	15.37	122.4501	19.7559	247.2177
-93.35	14.85	166.2994	32.8516	295.0737
-93.35	14.38	125.38991	65.13942	99.61237
-93.35	14.3	115.58603	53.18579	86.49894
-93.34	14.88	96.69634	64.60927	82.36617
-93.34	14.95	125.17206	74.14759	102.23026
-93.34	14.92	13.91536	76.48816	315.11442
-93.33	14.19	119.90859	76.00781	93.82948
-93.33	14.32	103.49079	69.75495	88.44071
-93.32	14.64	107.20854	35.90045	232.4988
-93.32	14.36	124.80141	69.87801	94.14748
-93.32	14.31	120.58939	71.92012	95.62597
-93.32	15.56	135.63088	33.74328	281.15756
-93.31	14.16	119.81164	71.02618	92.7343
-93.31	14.35	129.99537	66.26467	103.5847
-93.28	14.36	142.83032	72.94058	97.40172
-93.27	14.17	103.96125	69.78893	80.69102
-93.26	14.25	117.99357	71.92061	91.35141
-93.26	14.32	109.93076	59.64789	88.96038
-93.25	14.09	114.76217	66.79616	99.0767
-93.25	14.35	122.55729	72.82118	96.79569
-93.24	14.14	114.76449	69.86965	90.63563
-93.24	14.53	120.89078	54.75872	105.20746
-93.23	14.66	81.69135	36.09874	213.30236
-93.23	14.42	112.0968	60.77455	89.21893
-93.21	15.75	173.55418	18.85749	312.98742
-93.2	15.2	130.3459	84.40368	95.91505
-93.19	13.99	129.74172	75.86619	97.59427
-93.19	14.29	115.6794	73.29009	95.97255
-93.18	15.83	137.44628	21.56178	274.56396
-93.18	15.52	147.28486	31.21139	276.93695
-93.17	14.16	111.93088	63.71738	90.56678
-93.14	14.4	121.24721	67.53508	93.03199
-93.13	14.32	118.65008	65.43399	99.25128
-93.12	14.25	164.53816	19.34595	311.23663
-93.11	14.33	122.51424	63.71444	78.86494
-93.08	14.2	140.05805	75.50958	124.13355
-93.07	13.99	143.77578	69.12432	101.32224
-93.04	14.1	140.4894	65.82756	104.88792
-93.02	14.84	133.48057	79.81056	106.52669
-93.02	15.34	158.15587	24.80245	289.0906
-93.02	14.42	274.26557	45.25276	112.78511
-93.01	13.94	174.19749	82.14733	124.60564
-92.99	14.41	123.63274	66.59655	96.02348
-92.97	14.3	121.29167	62.54466	93.38581
-92.96	13.98	102.24012	64.72893	279.56491
-92.96	14.27	112.37696	68.11587	102.69568
-92.95	14.64	130.8126	58.4568	283.0592
-92.94	14.32	128.92815	74.98313	109.86789
-92.94	14.31	121.54217	63.26894	93.927
-92.93	14.09	144.92163	74.37202	105.31505
-92.93	15.33	142.7951	12.83126	268.85696
-92.93	14.34	125.11912	61.32951	97.67754
-92.92	14.12	135.87496	71.0366	97.61759
-92.91	15.26	156.63452	24.51641	299.75612
-92.9	14.28	127.42474	65.21996	97.913
-92.89	14.83	234.632144	14.870444	8.438356
-92.88	14.2	127.1306	63.38985	99.33697
-92.85	14.31	134.87202	67.66021	96.55563
-92.81	15.08	280.49095	88.03395	251.94692
-92.78	14.43	122.419	82.41956	96.91994
-92.78	14.58	120.95379	66.14604	89.89917
-92.77	15.96	150.40993	87.08895	253.69352
-92.75	14.83	216.1581	24.38742	353.67495
-92.74	14.48	120.40273	59.10928	95.89728
-92.72	14.74	152.9893	31.9393	290.8301
-92.7	14.8	146.16383	26.92087	278.49894
-92.69	15.9	139.15733	85.10785	119.62021
-92.69	14.63	196.0948	35.6418	343.6472
-92.68	15.31	139.23492	21.63496	276.12298
-92.64	15.98	137.89823	83.48874	119.16602

-92.61	16.42	172.667956	2.101945	272.866728
-92.58	14.83	173.42155	28.75047	317.09244
-92.48	15.68	140.01546	82.00298	117.44401
-92.44	15.76	139.55659	84.91927	122.05783
-92.28	15.53	138.46184	84.66573	98.17092
-92.08	16.21	219.01968	84.76958	51.93081

Mecanismos focales utilizados para realizar el diagrama triangular de la zona B

Longitud	**Latitud**	**Strike**	**Dip**	**Rake**
–92.88	13.92	122.63808	67.85152	91.09386
-92.85	13.88	128.30259	64.15248	87.24286
-92.85	13.89	130.71982	68.42145	93.63245
-92.76	14.02	137.39995	59.56681	103.86486
-92.73	14.07	280.13157	28.14141	58.66386
-92.73	13.89	113.5468	69.31201	84.54151
-92.73	13.87	131.40448	59.36794	100.11974
-92.71	14.15	117.001	64.10677	95.73615
-92.68	13.94	118.99114	70.88153	95.75739
-92.66	13.77	103.49331	69.70308	89.141
-92.66	13.91	123.12289	62.80694	101.92323
-92.65	13.79	131.16248	65.00619	99.16162
-92.64	14.39	126.9329	30.2454	251.5226
-92.63	13.65	122.05642	72.76339	92.59689
-92.61	14.36	313.78364	51.13766	288.62484
-92.61	13.63	113.748	67.4751	91.71703
-92.59	14.17	227.71971	43.99232	5.04041
-92.59	13.91	121.9045	68.85307	98.74881
-92.58	13.81	125.00775	61.46156	92.79424
-92.54	13.91	136.04609	80.54804	107.5627
-92.54	13.62	114.17468	72.86697	94.05466
-92.51	14.02	108.03114	63.40178	84.14658
-92.5	14.21	95.94795	60.01958	61.08408
-92.5	14	125.10709	62.12023	95.31551
-92.49	14.23	306.39169	89.11892	255.21737
-92.48	14.02	123.81754	64.17397	100.85487
-92.47	13.86	167.19948	74.25374	117.96157
-92.44	13.86	125.246	68.11224	97.82976
-92.44	14.13	121.61527	59.93011	103.60636
-92.44	14.05	121.75171	63.91851	98.16168
-92.43	13.92	116.90539	64.33073	91.59346
-92.43	14.11	120.98285	65.53793	94.17208
-92.42	13.78	89.79156	63.91984	66.96197
-92.4	13.93	123.64966	61.48135	92.87404
-92.38	14.19	120.97513	62.1516	97.40759
-92.38	14.47	207.63613	6.085227	335.234407
-92.37	13.77	124.59482	64.85128	97.9336
-92.36	13.87	125.71607	68.81357	96.64553
-92.36	13.99	115.11351	69.69351	97.26646
-92.36	14.72	162.53735	19.73683	305.03036
-92.35	13.83	153.14863	62.40596	103.77375
-92.34	14.55	149.99736	44.30787	347.87956
-92.34	13.77	125.62491	62.45662	99.02166
-92.33	13.82	124.56159	65.88425	93.91428
-92.33	13.98	126.88807	61.60685	100.66116
-92.3	13.97	121.04443	58.97596	89.7027
-92.27	14.48	310.51405	89.99629	253.0831
-92.27	13.86	128.21071	61.71958	101.02304
-92.26	13.68	124.17333	63.95269	99.28523
-92.26	14.53	115.19535	53.97974	96.78149
-92.26	13.82	120.88582	69.40207	96.36805
-92.26	13.61	84.84913	47.94524	51.10931
-92.25	13.93	110.11891	66.78927	91.6336
-92.25	13.92	126.70993	62.42827	99.45051
-92.25	15.12	167.69418	20.88677	312.46745
-92.24	14.18	123.05734	63.76802	108.53576
-92.22	13.66	107.34381	40.45556	87.5352
-92.22	13.8	110.91741	62.85423	111.99252

-92.21	14.1	119.42452	74.47482	242.99133
-92.21	13.92	126.36858	59.70467	98.12031
-92.2	13.86	117.77677	71.43344	90.43962
-92.19	13.79	122.16321	65.48938	106.04154
-92.18	13.74	133.9112	68.60303	130.0931
-92.18	14.71	305.95917	81.00324	257.291
-92.17	14.06	112.76606	64.29971	240.65548
-92.17	13.81	125.39562	65.1682	99.92103
-92.17	13.58	140.42363	64.49325	92.53813
-92.16	13.46	142.24392	73.70641	119.01158
-92.14	13.47	90.21567	29.08437	222.25655
-92.13	14.53	132.50657	65.80755	275.36191
-92.11	14.54	130.56976	89.49281	104.52145
-92.07	13.74	116.37054	64.32241	95.4217
-92.06	13.92	133.91219	78.38997	101.61836
-92.06	14.62	79.78114	32.1712	195.36175
-92.05	14.62	151.77268	16.59522	287.11943
-92.04	14.07	130.73382	48.68444	272.69621
-92.04	14.24	127.98696	59.87856	102.6368
-92.04	13.99	333.78896	70.32613	307.89179
-92.03	15.4	343.19557	57.42608	165.74199
-92.02	14.15	183.2013	28.42687	318.21518
-92.01	14.23	101.47291	56.06221	87.17646
-92	14.29	145.03274	30.15828	282.82307
-91.98	13.92	139.05446	40.53208	263.12006
-91.97	14	96.21972	42.06537	211.55709
-91.95	13.79	128.51228	63.87135	98.29729
-91.94	14.06	126.62163	52.26325	94.02647
-91.93	14.37	192.20293	19.45827	330.5917
-91.93	13.78	120.75195	61.98679	96.24305
-91.92	13.91	121.51558	39.06077	254.03328
-91.91	14.23	182.92572	19.87598	319.80301
-91.89	15.11	219.60715	14.59031	355.07255
-91.88	14.09	141.82429	59.07068	176.43207
-91.86	14.89	129.21643	84.60942	89.23194
-91.85	14.04	120.0025	72.245	280.6326
-91.85	14.02	172.56573	39.92352	292.05816
-91.85	14.08	103.93443	39.83544	233.39278
-91.83	13.98	164.21008	29.40012	294.19052
-91.81	14.29	123.25656	75.52143	100.03445
-91.8	13.95	127.1606	38.1481	248.4878
-91.77	14.98	135.2148	84.84157	103.53005
-91.76	15.38	145.02531	73.32004	107.38143
-91.76	14.04	156.22032	21.80193	292.84728
-91.75	14.37	114.83358	82.02186	123.99756
-91.73	14.02	184.54082	24.86853	319.93186
-91.72	14.63	171.93601	80.67201	59.761
-91.7	15.44	143.65	80.5878	109.5529
-91.65	14.68	186.46702	30.66905	346.99692
-91.63	15.2	134.80297	78.79568	100.57332
-91.62	15.03	325.42805	89.10538	255.50872
-91.55	15.49	231.381763	23.974029	5.847685
-91.5	14.56	89.44273	19.46246	225.51797
-91.35	15.01	143.53276	78.60581	106.96177

Mecanismos focales utilizados para realizar el diagrama triangular de la zona C

Longitud	Latitud	Strike	Dip	Rake
-91.75	13.46	105.0474	21.7559	228.319
-91.74	13.68	79.6484	57.20298	192.37163
-91.72	13.72	125.30743	59.72415	109.04738
-91.69	13.54	123.33044	67.04232	91.56819
-91.65	13.87	141.2853	53.0685	102.5372
-91.64	13.76	120.79309	66.37875	96.25359
-91.59	13.58	124.17092	64.08839	96.20306
-91.58	13.45	101.14586	33.34473	227.88026
-91.58	13.75	121.46566	38.51495	270.78032
-91.57	13.54	119.38638	64.1259	96.71563

-91.57	13.58	89.52749	19.87481	211.11668
-91.56	13.75	137.12934	26.19568	276.12495
-91.56	13.63	118.7058	58.55996	242.29955
-91.55	13.49	328.5837	72.59392	299.80137
-91.54	13.58	88.50811	62.65428	73.12723
-91.53	13.72	99.72652	77.30199	73.38401
-91.44	13.64	119.23448	63.25642	99.56531
-91.44	14.06	209.38051	29.75469	357.00834
-91.43	14.05	124.13623	53.24487	95.66196
-91.43	14.01	3.322373	36.577476	346.642114
-91.43	13.47	81.33836	40.25778	206.75641
-91.43	13.66	100.00036	28.78849	239.7678
-91.42	14.28	130.54251	68.95687	317.20284
-91.41	13.47	114.50488	62.77701	101.1145
-91.41	13.81	123.48948	62.16212	278.3231
-91.4	13.42	120.3203	60.20647	102.42831
-91.39	13.45	121.10633	63.91413	96.55665
-91.38	13.43	111.49337	58.10643	96.43011
-91.38	14.23	136.10614	79.47485	108.73228
-91.37	14.05	122.93995	53.12525	98.61881
-91.35	14.36	113.07682	64.79647	95.99465
-91.35	13.59	120.39804	69.18418	96.54639
-91.34	14.54	132.97772	84.03426	112.60322
-91.33	13.47	120.78359	57.63936	96.71185
-91.33	13.83	125.58181	82.76365	93.06919
-91.32	13.51	119.98559	56.09843	94.30348
-91.32	13.17	138.6503	68.9638	106.9595
-91.32	14.08	205.55277	11.47333	349.11574
-91.31	13.53	121.93205	57.61803	96.26815
-91.31	13.41	126.56702	61.3875	98.55539
-91.3	13.42	117.66149	57.72641	100.66784
-91.28	13.32	80.25876	43.17818	195.68818
-91.27	14.6	241.68573	62.37506	147.75323
-91.25	13.56	123.03684	63.51888	94.97829
-91.25	14	145.93705	25.02436	275.09471
-91.24	13.44	123.47953	60.22584	93.05246
-91.24	13.45	321.26114	67.02453	308.5308
-91.22	13.43	123.68106	60.19783	99.01623
-91.21	13.49	127.89337	63.72598	106.60104
-91.21	13.51	84.46097	40.24179	207.22184
-91.16	13.48	272.87155	55.17939	133.15102
-91.15	13.13	115.84698	73.24442	91.59853
-91.15	13.82	85.28694	30.68762	212.22215
-91.14	13.02	113.38933	63.51499	91.08865
-91.14	13.34	124.25344	62.9382	98.47373
-91.11	13.15	111.88156	55.936	95.36598
-91.08	14.06	304.18975	87.24317	280.26971
-91.07	13.77	116.37222	75.99342	89.39675
-91.07	14.93	127.3559	87.42543	104.23127
-91.04	13.09	105.22993	55.56915	78.41521
-91.02	13.57	159.57886	29.80983	307.27228
-91.01	13.66	115.86317	77.55398	89.85473
-91	12.93	140.2561	56.68518	135.78121
-91	13.42	302.99845	79.35661	134.06567
-90.99	13.24	121.88844	61.93744	286.94732
-90.97	13.56	60.4879	33.19612	207.2952
-90.95	13.06	92.52887	46.78102	79.43381
-90.94	13.65	110.81063	28.87208	250.38271
-90.93	13.52	110.70364	13.73581	255.59578
-90.9	14.03	111.29299	67.78892	95.41408
-90.9	13.65	97.61967	63.1804	156.91353
-90.89	13.46	56.99436	39.95813	61.97151
-90.89	13.51	289.06062	66.71712	137.6994
-90.87	14.38	162.7357	26.2393	312.5927
-90.86	13.78	211.1522	23.76449	350.27887
-90.86	13.69	96.16297	22.27973	242.53909
-90.84	13.62	129.31731	76.82289	110.5209
-90.79	13.53	115.35134	32.08832	262.90154
-90.78	14.66	179.13754	54.49864	16.68009
-90.78	13.64	142.96215	24.06511	326.28397
-90.71	14.62	130.86429	82.12833	115.02512
-90.68	13.13	125.63749	64.52752	99.00012
-90.66	12.78	126.20495	67.40771	102.32689
-90.64	12.86	129.66833	62.57864	103.3649

-90.62	12.82	114.57943	75.74154	93.26638
-90.61	13.13	126.17082	64.46785	99.41461
-90.61	13.84	96.082815	9.938635	233.003486
-90.55	13.29	109.54744	64.54736	85.4549
-90.55	12.87	259.24155	47.81771	126.11281
-90.54	13.69	122.13816	81.36458	99.86503
-90.52	12.73	112.58945	67.02991	94.46869
-90.51	13.66	209.0517	20.62839	349.48605
-90.5	13.78	161.07618	13.51117	298.39076
-90.48	13.28	115.23292	62.80961	104.45894
-90.48	14.36	143.15824	84.54707	96.73313
-90.47	12.84	124.88192	62.84216	103.20624
-90.47	12.88	116.6417	56.585	282.1204
-90.47	14.44	51.88159	79.42167	185.00516
-90.46	13.74	38.32358	13.85478	181.46145
-90.41	13.1	139.51507	86.67281	98.33255
-90.41	13.2	226.58994	77.53973	346.93974
-90.4	13.29	191.46489	33.95691	339.3121
-90.32	12.85	121.22576	58.51009	94.4981
-90.32	13.07	117.41271	61.16811	76.56931
-90.29	12.83	136.79789	80.28323	118.84599
-90.27	13.36	143.60351	69.84036	122.37906
-90.26	13.75	177.98753	25.27998	346.34674
-90.24	12.77	196.12042	48.07084	328.98001
-90.21	13.03	119.25312	48.82621	87.00602
-90.21	14.16	167.75757	43.99014	24.73618
-90.16	14.48	206.35565	20.42544	327.47065
-90.15	13.17	130.7422	49.35661	110.06406
-90.12	13	275.82469	46.48803	287.18706
-90.1	12.81	112.32441	56.15628	250.3976
-90.06	13.18	119.72581	50.51722	96.07316
-90.02	13.2	116.88851	51.00655	94.3765
-90.02	13.33	110.85809	35.85774	271.75095
-89.97	13.11	111.16095	54.02607	96.33033
-89.93	12.84	121.38481	44.20299	281.97455
-89.91	13.4	310.0839	75.0785	307.0508
-89.9	13.32	140.86672	80.08201	137.34201
-89.86	12.97	157.04922	69.00604	113.63243
-89.85	14.53	152.57612	83.96765	91.05149
-89.81	13.3	118.41114	84.29448	88.40557
-89.64	13.49	53.72673	37.8069	164.90375