



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA  
SISMOLOGÍA Y FÍSICA DEL INTERIOR DE LA TIERRA

**ANÁLISIS DE COCIENTES ESPECTRALES USANDO TELESISMOS PARA LA DETERMINACIÓN DE ZONAS DE ATENUACIÓN EN EL VOLCÁN TACANÁ**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:

**GEMA VICTORIA CABALLERO JIMÉNEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. CARLOS MIGUEL VALDÉS GONZÁLEZ**  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:**

DR. SERVANDO DE LA CRUZ REYNA (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM)  
DR. JOSÉ LUIS MACÍAS VÁZQUEZ (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM)  
DRA. VALA HJÖRLEIFSDÓTTIR (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM)  
DR. JOSUÉ TAGO PACHECO (FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM)

**CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2018**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

# Índice

Índice de Figuras .....	ii
Índice de Tablas .....	vii
Resumen .....	viii
Abstract.....	ix
<b>CAPÍTULO I. ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
I.1 Localización.....	1
I.2 Estudios Previos .....	1
I.3 Tectónica y marco geológico.....	3
I.4 Actividad Eruptiva.....	5
I.4.1 La explosión de 1949 .....	6
I.4.2 La explosión de 1986 .....	6
I.5 Objetivo.....	7
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
II.1 Análisis de Fourier.....	8
II.2 Transformada de Fourier.....	9
II.3 Respuesta instrumental .....	10
II.4 Cocientes espectrales estándar .....	10
<b>CAPÍTULO III. DATOS Y PROCESAMIENTO .....</b>	<b>13</b>
III.1 Estaciones sismológicas .....	13
III.2 Sismicidad .....	15
III.3 Procesamiento .....	19
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>25</b>
IV.1 Resultados .....	27
IV.2 Discusión .....	63
IV.2.1 Sismicidad local .....	71
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>84</b>
V.1 Conclusiones .....	84
V.2 Recomendaciones .....	86
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>87</b>

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme continuar en este camino y demostrarme que aunque no quiera siempre estará conmigo.

A mi tutor, Dr. Carlos Valdés, por su infinita paciencia, la confianza que ha depositado en mí, los conocimientos compartidos, la amistad que me ha brindado, las enseñanzas de vida y todo el apoyo que me ha dado desde que lo conozco.

A mis sinodales, el Dr. Servando de la Cruz, Dr. José Luis Macías, Dra. Vala Hjörleifsdóttir y el Dr. Josué Tago, por el tiempo dedicado en la revisión de este trabajo y por sus valiosas aportaciones para mejorar esta tesis.

A mi Madre, por su amor y apoyarme siempre, ¡Te amo Tere!. A mi hermano por las charlas, comidas y el tiempo que compartimos juntos. A toda mi familia que me ayuda y me apoya.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme conocimientos y permitirme ser parte de su comunidad.

Al CONACYT, por los recursos otorgados para realizar mis estudios de maestría.

A mis amigos de clases durante la maestría y mis compañeros de guardias, Margarita Vidal, Adriana González y Jonatán Arreola, por todas esas experiencias que vivimos juntos clase tras clase y sismo tras sismo.

A mis amigos, Leticia Ramírez, Elizabeth Vergara y Moisés Armendáriz, por su apoyo incondicional, las experiencias vividas y los momentos compartidos, que me han permitido crecer como persona, así como la orientación que me han brindado durante estos años de amistad, gracias de todo corazón.

A todos mis amigos del Servicio Sismológico Nacional, por las enseñanzas, las gratas charlas y su amistad.

A todas aquellas personas que siempre me dieron ánimos para seguir adelante y no decaer.

Al Centro Nacional de Prevención de Desastres, por las facilidades para el desarrollo de este trabajo.

Al volcán Tacaná, por formar parte de la hermosa naturaleza y me dio la oportunidad de conocer más de él.

# Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Localización del volcán Tacaná. Los triángulos rojos representan las estaciones y el rombo verde la boca que se abrió con la explosión de registrada en 1986. ....	3
<b>Figura 2.</b> Mapa geológico del volcán Tacaná, tomada de (Scolamacchia & Macías, 2015). .....	5
<b>Figura 3.</b> Imágenes de las fumarolas del volcán Tacaná. a) Actividad de 1949. b) Actividad de 1986 Tomada de (Scolamacchia & Macías, 2015).....	7
<b>Figura 4.</b> Red de estaciones sísmicas del volcán Tacaná (Triángulos rojos).....	13
<b>Figura 5.</b> Izquierda: Sismómetro de banda ancha marca Guralp modelo 6TD. Derecha: Reloj GPS de alta precisión marca Guralp modelo CMG-GPS2.....	14
<b>Figura 6.</b> Estación central de registro Tapachula, Chiapas.....	15
<b>Figura 7.</b> Localización de los sismos registrados por la red de monitoreo del volcán Tacaná.....	17
<b>Figura 8.</b> Sismogramas en la componente Z para las 4 estaciones del sismo registrado el 16 de abril de 2012.....	18
<b>Figura 9.</b> Sismogramas de las tres estaciones en la componente vertical para el sismo registrado el 16 de abril de 2013 en Irán con $M_w=7.7$ .....	18
<b>Figura 10.</b> Ejemplo de archivo de Polos y Zeros utilizado para remover la respuesta instrumental de la estación CHIQ en su componente E.....	19
<b>Figura 11.</b> En negro sismograma con amplitud en cuentas y en rojo sismograma sin respuesta instrumental y amplitud en nanómetros por segundo nm/s.....	20
<b>Figura 12.</b> Ejemplo de las trayectorias de las ondas sísmicas, obtenidas con TauP Toolkit .....	21
<b>Figura 13.</b> Ejemplo de los arribos de las fases de cuerpo P y S para el sismo del Golfo de California registrado el 12 de abril de 2012.....	22
<b>Figura 14.</b> Ventana alrededor de la onda P para el sismo registrado el 9 de febrero de 2013 con epicentro a 2 km al norte de Yacuanquer, Colombia. ....	23
<b>Figura 15.</b> Espectros de amplitud de la onda P para el sismo registrado el 9 de febrero de 2013 con epicentro a 2 km al norte de Yacuanquer, Colombia. ....	23

<b>Figura 16.</b> Proyección de las trayectorias de los sismos registrados por la red del Tacaná, los colores representan el azimut de arriba cada evento: azul-azimut NW, verde-azimut NE, rojo-azimut SE y amarillo-azimut SW.....	26
<b>Figura 17.</b> Ejemplo de los espectros de amplitud para la componente vertical del sismo con epicentro al Noroeste de Indonesia, registrado el 10 de enero de 2012 con Mw=7.2. ....	27
<b>Figura 18.</b> Cocientes espectrales para la fase P en la componente vertical del sismo registrado el 10 de enero del 2012 con epicentro al noroeste de Indonesia. La estación de referencia es PAVE las líneas azules representan la proyección de la trayectoria del rayo sísmico, los triángulos rojos representan las estaciones y el rombo verde representa la boca que se generó por la explosión de 1986.....	28
<b>Figura 19.</b> Cocientes espectrales para la fase P en la componente N-S, del sismo registrado el 10 de enero del 2012 con epicentro al noroeste de Indonesia. La estación de referencia es PAVE.....	29
<b>Figura 20.</b> Cocientes espectrales para la fase S en la componente E-W, del sismo registrado el 10 de enero del 2012 con epicentro al noroeste de Indonesia. La estación de referencia es PAVE.....	30
<b>Figura 21.</b> Cocientes espectrales para el sismo registrado el 10 de enero del 2012 con epicentro al noroeste de Indonesia y MW=7.2. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. ....	31
<b>Figura 22.</b> Cocientes espectrales para la fase P en la componente N-S, del sismo registrado el 31 de enero del 2012 con epicentro en Perú. La estación de referencia es CHIQ. ....	33
<b>Figura 23.</b> Cocientes espectrales para el sismo registrado el 31 de enero del 2012 con epicentro cerca de las costas de Perú y MW=6.4. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es CHIQ y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. ....	34
<b>Figura 24.</b> Cocientes espectrales para la fase P en la componente N-S, del sismo registrado el 15 de febrero del 2012 con epicentro en fuera de las costas de Oregón. La estación de referencia es PAVE.....	35
<b>Figura 25.</b> Cocientes espectrales para el sismo registrado el 15 de febrero del 2012 con epicentro fuera de las costas de Oregón y Mw=5.9. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. ....	36

<b>Figura 26.</b> Cocientes espectrales para la fase P en la componente vertical, del sismo registrado el 12 de abril del 2012 con epicentro en el Golfo de California, México con Mw=6.0. La estación de referencia es PAVE. ....	38
<b>Figura 27.</b> Cocientes espectrales para el sismo registrado el 12 de abril del 2012 con epicentro en el Golfo de California y Mw=6.0. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. ....	39
<b>Figura 28.</b> Cocientes espectrales para la fase P en la componente E-W, del sismo registrado el 12 de abril del 2012 con epicentro en el Golfo de California, México con Mw=7.0. La estación de referencia es PAVE. ....	41
<b>Figura 29.</b> Cocientes espectrales para el sismo registrado el 12 de abril del 2012 con epicentro en el Golfo de California y Mw=7.0. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. ....	42
<b>Figura 30.</b> Cocientes espectrales para la fase S en la componente E-W, del sismo registrado el 28 de mayo del 2012 con epicentro en Santiago del Estero, Argentina, con Mw=6.7. La estación de referencia es CHIQ. ....	44
<b>Figura 31.</b> Cocientes espectrales para el sismo registrado el 28 de mayo del 2012 con epicentro en Santiago del Estero, Argentina, Mw=6.7. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es CHIQ y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. ....	45
<b>Figura 32.</b> Cocientes espectrales para la fase S en la componente E-W, del sismo registrado el 7 de diciembre del 2012 con epicentro al este de Honshu, Japón con Mw=7.3. La estación de referencia es PAVE. ....	47
<b>Figura 33.</b> Cocientes espectrales para el sismo registrado el 7 de diciembre del 2012 con epicentro al este de Honshu, Japón, Mw=7.3. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. ....	48
<b>Figura 34.</b> Cocientes espectrales para la fase P en la componente Z, del sismo registrado el 6 de febrero del 2013 con epicentro al oeste de las Islas Salomón y Mw=8.0. La estación de referencia es PATR. ....	49
<b>Figura 35.</b> Cocientes espectrales para el sismo registrado el 6 de febrero del 2013 con epicentro al oeste de las Islas Salomón, Mw=8.0. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S.	

La estación de referencia es PATR y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. .... 50

**Figura 36.** Cocientes espectrales para la fase S en la componente E-W, del sismo registrado el 9 de febrero del 2013 con epicentro al norte de Yancuaquer, Colombia y Mw=6.9. La estación de referencia es CHIQ..... 52

**Figura 37.** Cocientes espectrales para el sismo registrado el 9 de febrero del 2013 con epicentro al norte de Yancuaquer, Colombia, Mw=6.9. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es CHIQ y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. .... 53

**Figura 38.** Cocientes espectrales para la fase P en la componente N-S, del sismo registrado el 16 de abril del 2013 con epicentro al este de Khash, Irán, Mw=7.3. La estación de referencia es PAVE..... 55

**Figura 39.** Cocientes espectrales para el sismo registrado el 16 de abril del 2013 con epicentro al este de Khash, Irán, Mw=7.7. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. .... 56

**Figura 40.** Cocientes espectrales para la fase S en la componente E-W, del sismo registrado el 09 de enero del 2014 con epicentro al noroeste de Corralillo, Cuba, Mw=5.0. La estación de referencia es PAVE. .... 58

**Figura 41.** Cocientes espectrales para el sismo registrado el 9 de enero del 2014 con epicentro al noroeste de Corralillo, Cuba, Mw=5.0. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. .... 59

**Figura 42.** Cocientes espectrales para la fase S en la componente N-S, del sismo registrado el 13 de enero del 2014 con epicentro al norte de Hatillo, Puerto Rico, Mw=6.4. La estación de referencia es CHIQ..... 61

**Figura 43.** Cocientes espectrales para el sismo registrado el 13 de enero del 2014 con epicentro al norte de Hatillo, Puerto Rico, Mw=6.4. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es CHIQ y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia. .... 62

**Figura 44.** Cocientes espectrales en la estación CHIQ para los eventos con trayectoria de arribo NW. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes espectrales para la onda P; las figuras d, e y f son los cocientes espectrales para la onda S. Los símbolos representan



la región epicentral de acuerdo al azimut. La línea negra se toma como referencia para determinar los eventos con más del 5 % de atenuación ..... 65

**Figura 45.** Cocientes espectrales en la estación CHIQ para los eventos con trayectoria de arribo NE (rojo) y SW (verde). Las figuras a, b y c, son los cocientes espectrales para la onda P y las figuras d, e y f son los cocientes para la onda S. Los símbolos representan la región epicentral de acuerdo al azimut. La línea negra se toma como referencia para determinar los eventos con más del 5 % de atenuación. .... 66

**Figura 46.** Cocientes espectrales en la estación PATR para los eventos con azimut NW. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes espectrales para la onda P; las figuras d, e y f son los cocientes espectrales para la onda S; los símbolos representan la región epicentral de acuerdo al azimut. La línea negra se toma como referencia para determinar los eventos con más del 5 % de atenuación ..... 68

**Figura 47.** Cocientes espectrales en la estación PART para los eventos con trayectoria de arribo NE (verdes) y SE (rojos). Las figuras a, b y c, son los cocientes espectrales para la onda P y las figuras d, e y f son los cocientes para la onda S. Los símbolos representan la región epicentral de acuerdo al azimut. La línea negra se toma como referencia para determinar los eventos con más del 5 % de atenuación ..... 69

**Figura 48.** Cocientes espectrales en la estación CIMA para los eventos con trayectorias de arribo NW (azul) y SE (rojo). Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes espectrales para la onda P; las figuras d, e y f son los cocientes espectrales para la onda S; los símbolos representan la región epicentral de acuerdo al azimut. La línea negra se toma como referencia para determinar los eventos con más del 5 % de atenuación ..... 70

**Figura 49.** Localización de los sismos volcanotectónicos registrados por la red del Tacaná y reportados por la UNICACH durante el 2013 (enero a octubre) (Tomado de UNICACH-Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático). ..... 72

**Figura 50.** Localización de los sismos volcanotectónicos registrados por la red del Tacaná durante el 2015 y 2016 (Modificado de CENAPRED 2015 y CENAPRED 2016). El color corresponde con la profundidad y el tamaño del círculo a la magnitud calculada. .... 73

**Figura 51.** Perfil N-S de los sismos volcanotectónicos registrados por la red del Tacaná durante 2015 y 2016. El color corresponde con la profundidad y el tamaño del círculo a la magnitud calculada..... 73

**Figura 52.** Perfil E-W de los sismos volcanotectónicos registrados por la red del Tacaná durante 2015 y 2016. El color corresponde con la profundidad y el tamaño del círculo a la magnitud calculada. .... 74

**Figura 53.** Perfil N-S con la proyección de los hipocentros y el error promedio asociado. De lado derecho el modelo de velocidades empleado para la localización. El color corresponde con la profundidad y el tamaño del círculo a la magnitud calculada. La línea

negra corresponde con la primera capa del modelo de velocidades empleado para la localización de los sismos volcanotectónicos..... 74

**Figura 54.** Proyección de las trayectorias de los sismos registrados por la red del Tacaná, los colores representan el azimut de arribo cada evento: azul-azimut NW, verde-azimut NE, rojo-azimut SE y amarillo-azimut SW..... 75

**Figura 55.** Perfiles N-S y E-W con las proyecciones de los rayos telesísmicos y los hipocentros de la sismicidad registrada en el volcán Tacaná durante 2015 y 2016. .... 77

**Figura 56.** Comparación de las zonas de atenuación encontradas en otros volcanes. ... 80

**Figura 57.** Perfiles N-S y E-W con las proyecciones de los rayos telesísmicos, los hipocentros de la sismicidad registrada en el volcán Tacaná durante 2015 – 2016 y la zona de atenuación propuesta en el presente trabajo (elipses). .... 81

**Figura 58.** Proyección en planta de la zona de atenuación propuesta, la sismicidad y las trayectorias de los telesismos..... 82

## Índice de Tablas

**Tabla 1.** Localización de los eventos registrados por la red sísmica del Tacaná.. 16

**Tabla 2.** Ejemplo de salida del programa TauP ..... 21

**Tabla 3.** Azimut y estación de referencia para los eventos registrados por la red sísmica del volcán Tacaná ..... 25

**Tabla 4.** Estudios realizados en otros volcanes y resultados encontrados ..... 79

## Resumen

El volcán Tacaná es un estratovolcán andesítico con una altura de 4060 msnm, que se localiza en la zona fronteriza entre México (Estado de Chiapas) y Guatemala (Departamento de San Marcos). La cima se ubica a una distancia aproximada de 30 km de Tapachula, Chiapas, México. Se estima que en un radio de 35 km queda expuesta, ante una erupción volcánica, una población de más de 465,000 habitantes.

Durante los últimos 50 mil años el volcán ha tenido, al menos seis erupciones plinianas, tres extrusiones de domo, dos colapsos del edificio volcánico, tres flujos de lava, así como eventos explosivos menores; tal es el caso de la actividad fumarólica y sísmica que se ha registrado de forma intermitentemente durante los años de 1855, 1878, 1900-1903, 1949-1950 y 1986-1987, por lo que es potencialmente activo.

Derivado de lo anterior el objetivo de este trabajo es identificar zonas de atenuación en el volcán Tacaná, que nos den indicio de la ubicación de reservorios de material magmático, mediante el análisis de cocientes espectrales de telesismos registrados por la red sísmica del volcán durante el periodo del 2012 al 2014.

Partiendo de las hipótesis de que la fuente, el trayecto, la instrumentación y el efecto de sitio sean similares, además que las ondas generadas por los telesismos, tendrían propagaciones sub-verticales, y que las ondas “S”, al propagarse por la presencia de material en estado semisólido y con alta temperatura, las atenúe, y permita identificar las zonas en donde éste fenómeno ocurre.

Se trabajó con un total de 126 trazas sísmicas de 12 telesismos y se tomó en cuenta la sismicidad volcanotectónica registrada durante 2015 y 2016, así como información obtenida de la consulta de estudios realizados en otros volcanes, en los que se encontraron zonas de atenuación a diferentes profundidades.

Con base en nuestros resultados y análisis, se encontró una zona de atenuación al sur del volcán, ubicada en  $92.1^{\circ}$  Long W y  $15.11^{\circ}$  Lat N, la cual se delimitó de 6 a 9.5 km de profundidad, con respecto del cráter. Para esta zona se estimó un volumen de  $33.66 \text{ km}^3$ , de los cuales se considera que un máximo del 12% podría corresponder con material parcialmente fundido, este porcentaje representaría un volumen de  $4.03 \text{ km}^3$ .

## Abstract

The Tacaná volcano is an andesitic stratovolcano with a height of 4060 masl, is located at the international border between State of Chiapas in southern Mexico and the San Marcos Department in northwestern Guatemala. The summit is located at an approximate distance of 30 km from Tapachula, Chiapas, Mexico. It is estimated that within a radius of 35 km, a population of more than 465,000 people is exposed to a volcanic eruption.

During the last 50 thousand years the volcano has had, at least six plinian eruptions, three dome extrusions, two collapses of the volcanic edifice, three lava flows, as well as minor explosive events; Such is the case of the fumarolic and seismic activity that has been registered intermittently during the years of 1855, 1878, 1900-1903, 1949-1950 and 1986-1987, so it is potentially active.

The objective of this work is to identify zones of attenuation in the Tacaná volcano, which give us an indication of the location of reservoirs of magmatic material, by means of the analysis of spectral ratios of telesisms registered by the seismic network of the volcano during the period from 2012 to 2014.

Starting from the hypothesis that the source, the path, the instrumentation and the site effect are similar, besides that the waves generated by the telesisms, they would have sub-vertical propagations, and that the "S" waves propagated by the presence of melt and with high temperature, attenuate them, and allow to identify the areas where this phenomenon occurs.

We worked with a total of 126 seismic traces of 12 telesisms and took into account the volcanotectonic seismicity registered during 2015 and 2016, as well as information obtained from the consultation of studies carried out in other volcanoes, in which different attenuation zones were found to different depths.

Based on our results and analysis, an area of attenuation was found south of the volcano, located at  $92.1^\circ$  Long W and  $15.11^\circ$  Lat N, which was delimited from 6 to 9.5 km deep, with respect to the crater. For this area a volume of  $33.66 \text{ km}^3$  was estimated, of which it is considered that a maximum of 12% could correspond with partially molten magma, this percentage would represent a volume of  $4.03 \text{ km}^3$ .

## **CAPÍTULO I. ANTECEDENTES**

### **I.1 Localización**

El volcán Tacaná es un estratovolcán andesítico con una altura de 4060 msnm, se localiza en la zona fronteriza entre Guatemala, Departamento de San Marcos, y México, Estado de Chiapas, (Figura 1). La cima se ubica en las coordenadas geográficas 15°08' N, 09°09' W, a una distancia aproximada de 30 km de Tapachula, Chiapas, México y es el segundo volcán más alto de América Central. De acuerdo al Atlas Nacional de Riesgos<sup>1</sup> (ANR), en un radio de 35 km queda expuesta ante una erupción volcánica, una población de 465,000 habitantes, infraestructura como viviendas (36,730), unidades médicas (150), escuelas (1,580), presas (3), además de bancos, gasolineras, supermercados y hoteles.

### **I.2 Estudios Previos**

El Tacaná ha captado la atención de varios investigadores en diversos ámbitos. Los primeros trabajos sobre este volcán fueron llevados a cabo por Humboldt en 1862 quien lo llamó volcán Soconusco (Macías J. L., 2005). El Tacaná se compone de varias estructuras (Böse, 1902 y 1903) y ha registrado actividad fumarólica en 1855, 1878, 1900-1903, y 1949-1950 (Mooser et al., 1958; Mullerried, 1951). Estudios más recientes fueron llevados a cabo por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) con el fin de evaluar potencial geotérmico (Collard et al., 2014).

De la Cruz-Reyna et al. (1989) analizaron las aguas de los manantiales cercanos al Tacaná con el fin de correlacionar cambios químicos con la crisis sísmica y la explosión freática de mayo de 1986, estos autores concluyen que existen dos cuerpos de agua a diferentes profundidades conectados de alguna manera por lo que la explosión freática fue generada por la degasificación moderada de un cuerpo de magma, incrementando el fracturamiento del basamento.

---

<sup>1</sup> <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>

Espíndola et. al. (1989, 1993) realizaron fechamiento con C-14 de algunos depósitos y determinaron una edad de más de 42,000 años. Mercado y Rose (1992), mediante fotos aéreas de cobertura estereoscópica, realizaron un mapa geológico y presentaron el primer mapa de riesgos basados en flujos piroclásticos, avalanchas de escombros y lahares.

Macías et al. (2000, 2005, 2012) realizaron estudios sobre la estructura del complejo volcánico así como sobre su historia eruptiva; Mora (2001) y Mora et al. (2004) hicieron estudios químicos y petrológicos; García-Palomo et al. (2006) estudiaron la evolución geológica del complejo volcánico y dan una descripción detallada de esta evolución. Estudios geoquímicos y petrológicos de los depósitos que dejó la erupción del volcán San Antonio perteneciente al CVT, ocurrida entre 1950 y 880 años antes del presente, así como un estudio petrológico experimental de magmas dacíticos, fueron realizados por Mora et al. (2013), con base en los resultados el autor sugiere que el reservorio magmático se encontraba a una profundidad de 6 km, ya que a esta profundidad el magma estaba sometido a una presión de 200 MPa con una temperatura de entre 844 y 888 °C. Collard et al. (2014), analizan el potencial geotérmico del volcán y concluyen que no tiene potencial para generar energía, en comparación con otros sistemas geotérmicos

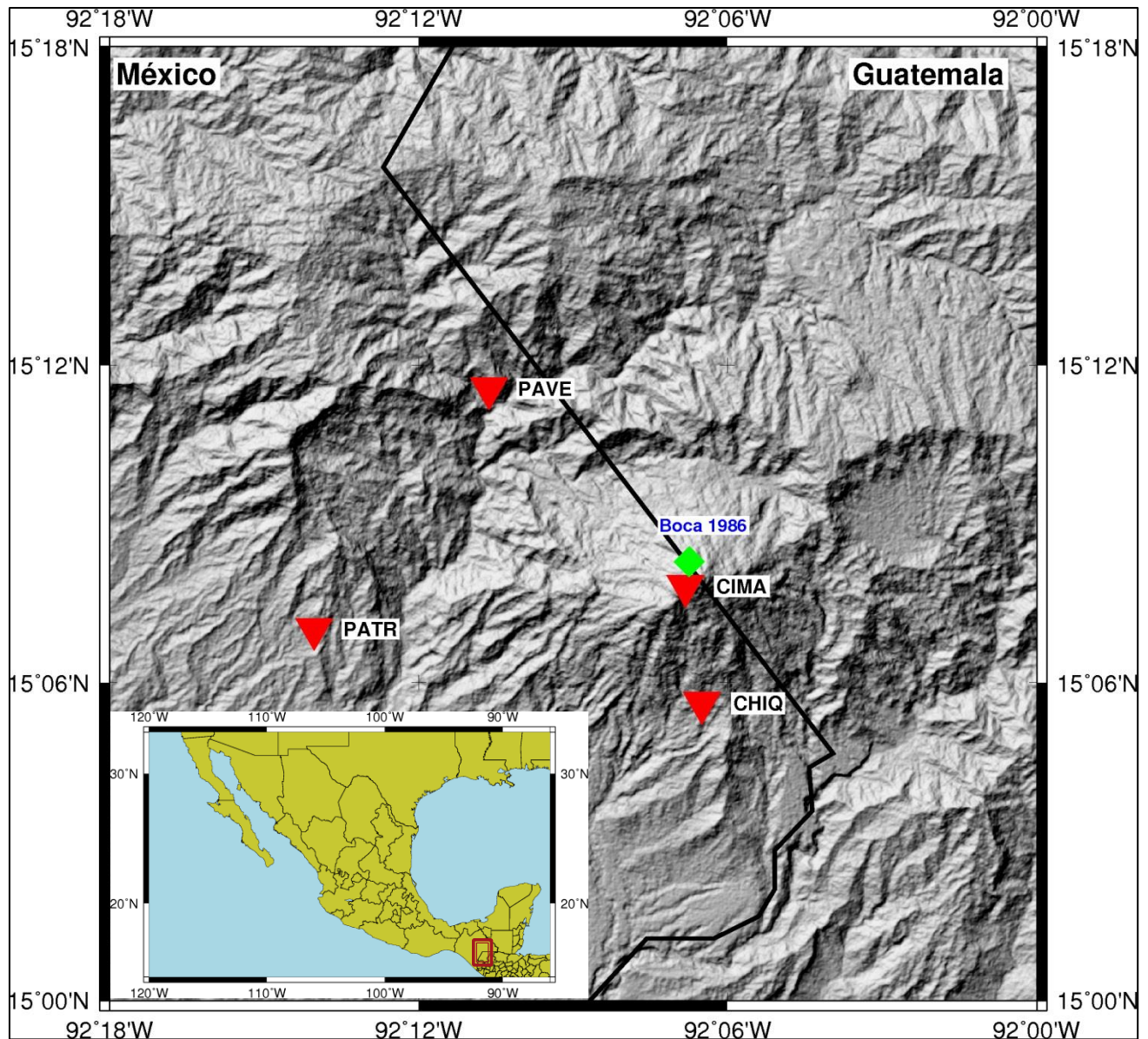


Figura 1. Localización del volcán Tacaná. Los triángulos rojos representan las estaciones y el rombo verde la boca que se abrió con la explosión de registrada en 1986.

### I.3 Tectónica y marco geológico

La tectónica del sureste de México y el noroeste de Guatemala está dominada por la interacción entre las placas de Cocos, Norteamericana y la del Caribe. La placa de Cocos subduce a las placas Norteamericana y la del Caribe a lo largo de la trinchera Mesoamericana, mientras que los límites entre las placas Norteamericana y la del Caribe parece estar delimitado por el sistema de fallas Motagua-Polochic (Guzmán-Speziale, et. al., 1989). El Tacaná forma parte del

Complejo Volcánico Tacaná (CVT), a su vez el CVT se localiza en la parte más noroccidental del Arco Volcánico Centroamericano (AVC). Dicho arco descansa sobre el bloque de Chortis y Chorotega (Manea et al., 2013), y está formado de estratovolcanes de composición calco-alkalina, paralelos a la trinchera Mesoamericana. El origen del AVC se relaciona con la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa del Caribe. El AVC tiene una extensión de 1300 km que abarca desde la frontera México-Guatemala hasta Costa Rica (García-Palomo, et al., 2006).

El complejo volcánico del Tacaná, descansa sobre basamento Mesozoico (gneis, esquistos, pizarras y granitos). Estas rocas fueron intrusionadas por dos episodios magmáticos: el primero durante el Eoceno tardío y el Oligoceno temprano; el segundo durante el Mioceno temprano y el Mioceno medio, el segundo episodio probablemente esté asociado con la subducción de la placa de Cocos por debajo de la placa Caribe. También fueron afectadas por un evento tectónico compresivo del Mioceno, generando fallas de rumbo e inversas. El esfuerzo principal que dio origen a las fallas tiene una alineación NE-SW; por lo tanto el basamento rocoso fue levantado y deformado como consecuencia del proceso de subducción. Durante el Plioceno se formaron tres estructuras de caldera (San Rafael, Chanjale y Sibinal), sobre el basamento, y durante el Plioceno y Pleistoceno temprano, estas calderas fueron afectadas por fallamiento normal con orientación NE-SW, originadas por el graben Tacaná, dentro de las cuales se emplazó el Complejo Volcánico del Tacaná. Este complejo está compuesto por cuatro estructuras: Chichuj, Tacaná, Plan de las Ardillas y San Antonio, mismas que se encuentran alineadas al NE-SW (García-Palomo, et al., 2006).

El CVT se emplazó dentro de la caldera San Rafael durante los últimos 100,000 años (Macías J. L., 2005). García-Palomo et. al. (2006) proponen la evolución del CVT de la siguiente manera: Primero se emplaza el volcán Chichuj, hace al menos 150 mil años. Después se formó el volcán Tacaná, hace 50 mil años, en los remanentes del volcán Chichuj. Posteriormente se formó el volcán San Antonio, hace aproximadamente 15 mil años, al SW del Tacaná, mediante la emisión de



flujos de lava andesítica y domos dacíticos (Figura 2). Finalmente se emplazó el domo andesítico Plan de las Ardillas, entre el Tacaná y el San Antonio.

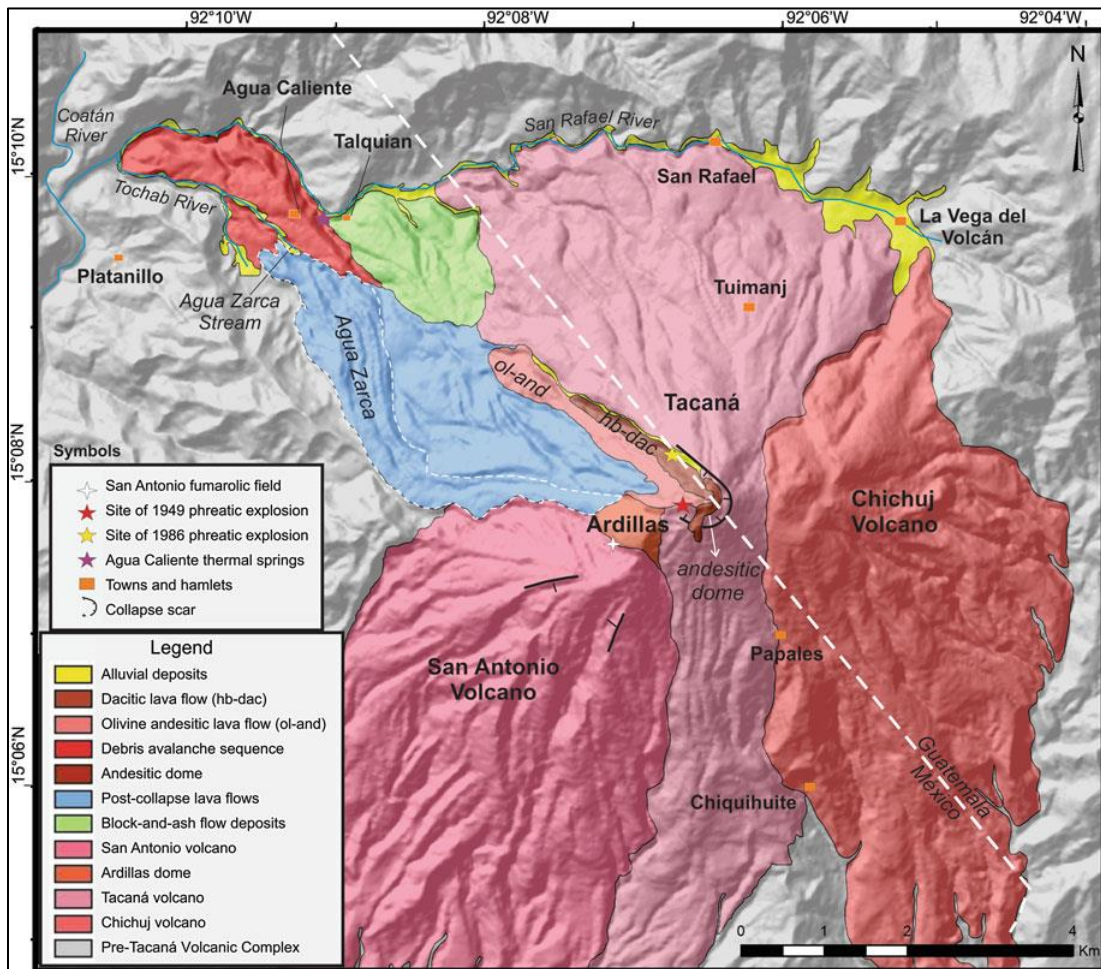


Figura 2. Mapa geológico del volcán Tacaná, tomada de (Scolamacchia & Macías, 2015).

#### I.4 Actividad Eruptiva

En la actualidad existe más información sobre la historia eruptiva del volcán Tacaná (Macías et al., 2015), sin embargo existe muy poca información histórica del Tacaná.

Mercado y Rose (1992) mencionan que el volcán Tacaná presenta actividad fumarólica acompañada de erupciones freáticas menores y son precedidos por el incremento en la actividad sísmica. También concluyen que los episodios se repiten cada 25 a 50 años por lo que resaltan cinco periodos de actividad en:

1855, 1878, 1900-1903, 1949-1950 y 1986-1987. En todos los casos se observaron emisiones de vapor de agua y se percibió un fuerte olor a azufre.

#### **I.4.1 La explosión de 1949**

El 22 diciembre de 1949 se registró un sismo en el volcán y días después pobladores de Unión Juárez (México), observaron una columna de vapor de agua así como caída de ceniza. Para el 10 de enero de 1950 se identificaron 3 cráteres localizados a 70, 160 y 230 metros debajo de la cima (Figura 3a) y se registraron 16 pequeñas fumarolas al suroeste de la cima (Mullerried, 1951; Scolamacchia & Macías, 2015).

#### **I.4.2 La explosión de 1986**

Para diciembre de 1985 comenzó una nueva serie de sismos volcanotectónicos localizados en un radio de 20 km del volcán. El 3 de febrero se registró un sismo volcanotectónico el cual causó daños en las construcciones de adobe en la ciudad de Ixchiguán perteneciente al departamento de San Marcos, Guatemala, a unos 25 km al este-noroeste de la cima del volcán. El 20 de abril, de ese mismo año, los sismos fueron sentidos y escuchados en las inmediaciones del volcán; esta actividad se mantuvo hasta el 7 de mayo. Para el 8 de mayo una pequeña explosión freática abrió un cráter, de 20 x 10 m, en el flanco noreste del volcán a una altura de 3600 m.s.n.m., casi en la línea fronteriza entre México y Guatemala. De este cráter emanaba una fumarola de vapor de agua con una altura aproximada de 1000 m (Figura 3b) (De La Cruz-Reyna et al., 1989). Después de la explosión, la actividad sísmica comenzó a decaer rápidamente.

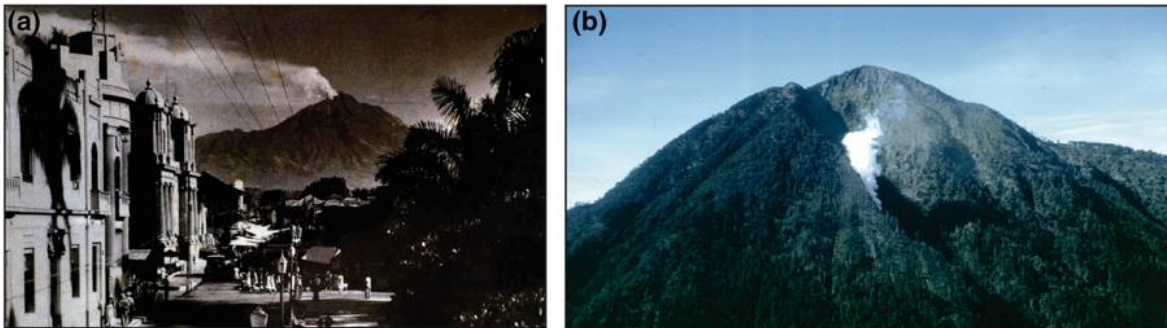


Figura 3. Imágenes de las fumarolas del volcán Tacaná. a) Actividad de 1949. b) Actividad de 1986 Tomada de (Scolamacchia & Macías, 2015)

## I.5 Objetivo

A pesar de los diversos estudios que existen sobre el volcán, se tiene un escaso conocimiento sobre el comportamiento eruptivo que podría tener el volcán en el futuro. Derivado de lo anterior el objetivo de este trabajo es identificar zonas de atenuación en el volcán Tacaná, que nos den indicio de la ubicación de los posibles reservorios magmáticos, mediante el análisis de cocientes espectrales de telesismos registrados por la red sísmica del volcán durante el periodo del 2012 al 2014.

Partiendo de las hipótesis de que la fuente, el trayecto, la instrumentación y el efecto de sitio sean similares, además que las ondas generadas por los telesismos, tendrían propagaciones sub-verticales, y que las ondas “S”, al pasar por la presencia de material en estado semisólido y con alta temperatura, las atenúe, y permita identificar las zonas en donde éste fenómeno ocurre. La técnica de cocientes espectrales estándar permite identificar si la onda atraviesa por un medio atenuante, en este caso material magmático, lo que resultaría en un cociente espectral atenuado.

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

Los sismogramas son una representación del movimiento del suelo, estos movimientos son causados por una repentina liberación de energía producida por fuentes sísmicas que pueden ser: sismos, erupciones volcánicas, explosiones, etc. Los registros que se obtienen de las estaciones sísmicas se usan para determinar los epicentros o hipocentros de los sismos; con el movimiento de partícula se puede obtener la localización de la fuente para las señales de tremor; etc. Con el análisis espectral se pueden estimar uno o más parámetros presentes en las señales, por ejemplo: frecuencia, fase, amplitud y potencia. La función de densidad espectral de potencia o simplemente el espectro de potencia modela la distribución de la potencia de una señal en función de la frecuencia.

### II.1 Análisis de Fourier

El análisis de Fourier se basa en la representación de una función cualquiera como una suma de funciones sinusoidales.

Cualquier señal periódica  $f(t)$  real, definida en el intervalo  $(-T/2, T/2)$  donde  $T$  es su periodo, se puede desarrollar en serie de Fourier siempre y cuando satisfaga las “Condiciones de Dirichlet” (Bäth, 1974):

1.  $f(t)$  debe ser periódica de periodo  $T$ , es decir,  $f(t) = f(t + T)$
2.  $f(t)$  debe tener un número finito de discontinuidades en el intervalo  $(-T/2, T/2)$ .
3.  $f(t)$  es de modulo integrable en un periodo, es decir la integral debe converger:

$$\int_{-T/2}^{T/2} |f(t)| dt < \infty \dots (1)$$

El desarrollo de  $f(t)$  en serie trigonométrica de Fourier tiene la forma:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \text{sen}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right] \dots (2);$$

Los coeficientes  $a_0$ ,  $a_n$  y  $b_n$  son reales y tienen la forma:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt = \langle x_T(t) \dots (3)$$

$$a_n = \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt \dots (4)$$

$$b_n = \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \operatorname{sen}\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) dt \dots (5)$$

Las expresiones (3), (4) y (5) son los coeficientes del desarrollo de una función en serie trigonométrica de Fourier.

## II.2 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta muy útil para el análisis en el campo científico ya que convierte una señal representada en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia sin modificar la información contenida en ella, es decir sólo se representa de forma diferente.

Sea  $f(t)$  una señal continua, se define la transformada de Fourier de  $f$  como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \dots (6).$$

La transformada toma valores complejos:

$$F(\omega) = a(\omega) - ib(\omega) = |F(\omega)|e^{-i\varphi(\omega)} \dots (7);$$

donde los espectros de amplitud  $F(\omega)$  y fase  $\Phi(\omega)$  se definen como:

$$|F(\omega)| = \sqrt{a^2(\omega) + b^2(\omega)} \dots (8)$$

$$\Phi(\omega) = \tan^{-1}\left(\frac{-b(\omega)}{a(\omega)}\right) + 2\pi n \dots (9).$$

### II.3 Respuesta instrumental

Las señales registradas por los sismómetros proporcionan información distorsionada del movimiento real del terreno. El interés en la sismología es poder obtener el movimiento real del suelo y para ello es necesario hacer la corrección por instrumento. Esta corrección no es más que la deconvolución, en el dominio del tiempo o la multiplicación en el dominio de las frecuencias, del registro sísmico con la función de transferencia del instrumento. Para esto es necesario conocer parámetros importantes del instrumento, tales como: la frecuencia natural, la constante de amortiguamiento y la constante del generador (Havsjov & Lars, 2010).

Si definimos  $x(t)$  como la señal registrada por el sismómetro, entonces  $X(\omega)$  no es el verdadero espectro del movimiento del terreno. Para obtener el verdadero espectro del movimiento  $Y(\omega)$ ,  $X(\omega)$  debe ser dividida por la respuesta compleja del instrumento  $T(\omega)$ , entonces el verdadero movimiento del suelo se puede obtener como:

$$Y(\omega) = \frac{X(\omega)}{T(\omega)} \dots (10).$$

La respuesta del instrumento también tiene amplitud y fase dadas por:

$$A(\omega) = \sqrt{\text{Re}(X(\omega))^2 + \text{Im}(X(\omega))^2} \dots (11)$$

$$\Phi(\omega) = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(X(\omega))}{\text{Re}(X(\omega))} \right) \dots (12)$$

### II.4 Cocientes espectrales estándar

El conocimiento, teorías y modelos sobre la estructura y los procesos del interior de la tierra se han obtenido a partir de la observación de fenómenos que los mismos procesos generan. Uno de los procesos, el relacionado con la generación

y propagación de ondas sísmicas, ha sido objeto de amplia investigación a nivel global.

Cuando ocurre un sismo, la energía liberada se propaga en forma de ondas sísmicas, en todas direcciones a través del medio de propagación o las diferentes capas de la Tierra. Este medio actúa como un filtro natural, lo que se manifiesta en una modificación del contenido espectral y amplitud de la señal, conforme esta avanza y pierde energía.

Bocherdt (1970) propuso el método que consiste en comparar estaciones cercanas usando una como referencia. Se asume que los registros del sitio de referencia (estación instalada en roca preferentemente), contiene la misma fuente y efectos de propagación como los registros de los otros sitios:

$$\frac{U_{ij}(f, r)}{U_{ik}(f, r)} = \frac{S_i(f)Z_j(f)A_{ij}(f, r)}{S_i(f)Z_k(f)A_{ik}(f, r)} \dots (13),$$

donde:

$U_{ij}(f, r)$  es la amplitud espectral del movimiento registrada en el sitio  $j$  para el evento  $i$

$S_i(f)$  corresponde a la función de la fuente  $i$

$Z_j(f)$  es la respuesta del sitio  $j$

$A_{ij}(f, r)$  es una función que representa la atenuación que incluye la dispersión geométrica, dispersión y atenuación intrínseca

$f$  es la frecuencia

$r$  es la distancia hipocentral

$k$  indica la estación de referencia.

El registro del movimiento del suelo en una estación se considera como la convolución de la fuente  $S_i(f)$ , el trayecto  $A_{ij}(f, r)$  y la respuesta del sitio  $Z_j(f)$ . Si las estaciones están cerca y la estación de referencia no está afectada por efecto de sitio, entonces:

$$Z_k = 1 \text{ y } A_{ij}(f, r) \approx A_{ik}(f, r) \dots (15)$$

Así, el cociente espectral arroja directamente la respuesta del sitio en la estación que se está comparando (Bormann, 2012).

A grandes distancias los efectos de fuente y trayecto son esencialmente los mismos en cada estación. Las ondas sísmicas que son generadas por fuentes distantes y registradas por instrumentos similares en ubicaciones muy cercanas, muestran variaciones en la amplitud que principalmente están en función de las condiciones geológicas del terreno (Borcherdt, 1970):

$$\frac{U_{ij}(f, r)}{U_{ik}(f, r)} = \frac{A_{ij}(f, r)}{A_{ik}(f, r)} \dots (16).$$

Por lo tanto, las diferencias observadas en la amplitud de nuestros cocientes espectrales deberán estar relacionadas directamente con el paso de las ondas sísmicas a través de medios que modifiquen su energía.



## CAPÍTULO III. DATOS Y PROCESAMIENTO

### III.1 Estaciones sismológicas

La red de monitoreo sísmico del volcán Tacaná en 2010 estaba constituida por 4 estaciones de banda, ancha localizadas en las laderas de la parte mexicana del volcán (Figura 4). La primera estación, Chiquihuites (CHIQ), se instaló el 5 de marzo de 2010, las tres estaciones restantes, La Cima (CIMA), Pavencul (PAVE) y La Patria (PATR), fueron instaladas el 8 de marzo de 2010. Las estaciones CIMA y CHIQ, se ubicaron en el municipio de Unión Juárez, por otro lado, las estaciones PAVE y PATR en el municipio de Tapachula en el estado de Chiapas. La distancia mínima entre estaciones es de 4 km (CIMA-CHIQ) y la máxima es de 13.5 km (CHIQ-PATR).

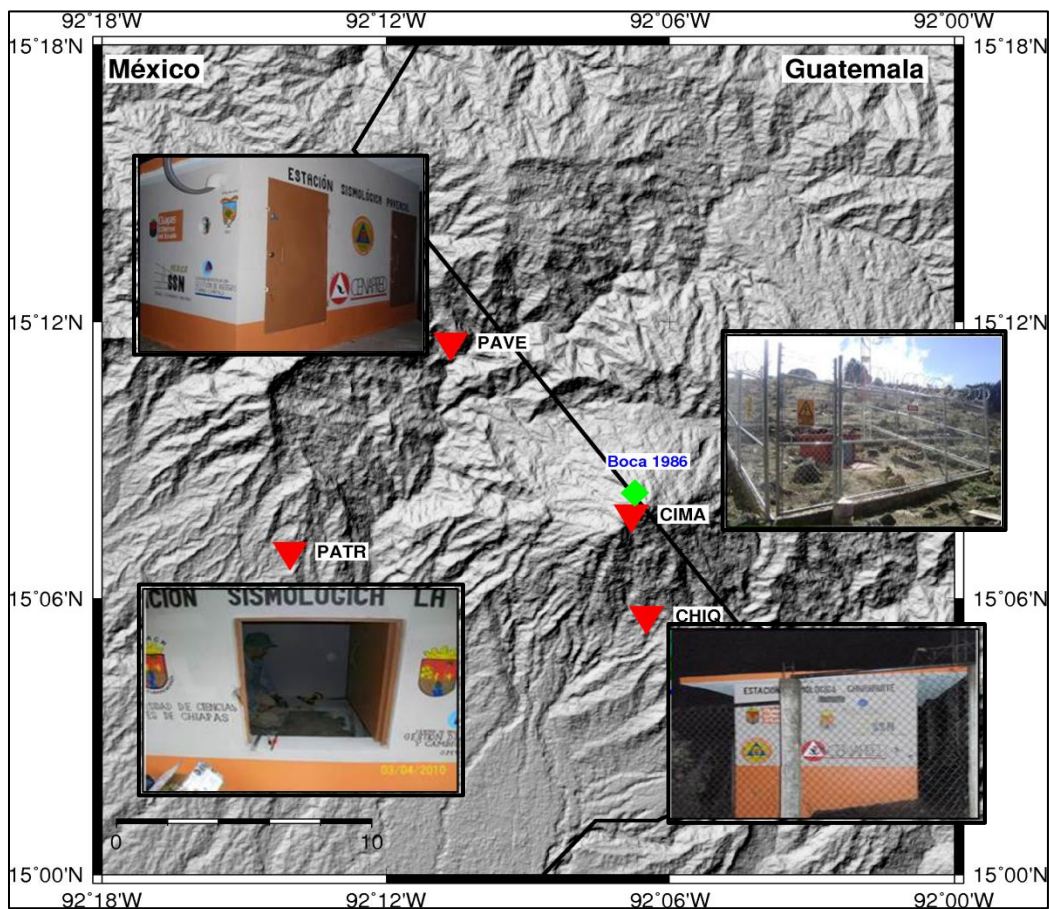


Figura 4. Red de estaciones sísmicas del volcán Tacaná (Triángulos rojos).

Cada estación sismológica consta de 1 sismómetro triaxial de banda ancha, marca Guralp modelo 6TD (Figura 5), con respuesta plana a la velocidad del suelo de 30 segundos a 50 Hz. Estos sensores tienen la capacidad de registrar sismos de magnitudes variables, desde sismos locales pequeños (en este caso sismos volcanotectónicos) hasta telesismos, sin problemas de saturación. Su instalación estuvo a cargo del Servicio Sismológico Nacional (SSN). Las señales del sensor de velocidad son muestreadas en forma continua a 40 muestras por segundo y se transmiten en tiempo real y vía telemetría a la estación central de registro localizada en Tapachula, Chiapas (Figura 6). Una vez almacenada la información de las trazas sísmicas se reenvía a las instalaciones del SSN vía satélite. Cuando llegan a su destino final se guardan por componente (Z, N-S, E-W) en archivos de 60 minutos con formato .gcf (formato nativo). Todas las estaciones cuentan además con un reloj GPS (Figura 5) marca Guralp modelo CMG-GPS2, que permite obtener una referencia de tiempo de alta precisión. Actualmente la red de monitoreo sólo cuenta con tres estaciones sismológicas (CHIQ, PAVE y PATR), ya que la estación CIMA fue vandalizada en 2013.



**Figura 5 Izquierda: Sismómetro de banda ancha marca Guralp modelo 6TD. Derecha: Reloj GPS de alta precisión marca Guralp modelo CMG-GPS2.**

La estación CHIQ está instalada sobre roca dura; CIMA se ubicó sobre sedimentos consolidados y en los alrededores se tienen basaltos; PAVE se encuentra sobre una roca dura y fracturada, en la parte alta de una barranca, y finalmente PATRIA se ubica en una finca cafetalera (SSN, comunicación personal).



Figura 6. Estación central de registro Tapachula, Chiapas.

El objetivo principal de esta red es poder detectar sismos volcanotectónicos, asociados a la acumulación de esfuerzos y fracturamiento de roca, así como sismicidad asociada al movimiento de fluidos dentro del edificio volcánico (eventos de período largo y/o tremor) que pudieran estar indicando una posible reactivación del sistema hidromagmático del volcán.

### III.2 Sismicidad

Para llevar a cabo este trabajo se realizó una búsqueda de información, sobre sismos registrados a distancias mayores a 1,000 km, la razón por la que se buscó que los eventos tuvieran grandes distancias es porque el arribo de las ondas es subvertical y podemos obtener información de la estructura debajo de cada estación; además para distancias grandes la red de estaciones del Tacaná se puede ver de forma puntual, debido a que la distancia entre ellas es pequeña en comparación con la distancia al hipocentro del evento. Los catálogos sísmicos de los que se obtuvo información fueron Global Centroid Moment Tensor Catalog

(Global CMT), United States Geological Survey (USGS) y National Earthquake Information Center (NEIC).

Para la elección de los eventos se verificó que se habían registrado en las cuatro estaciones de la red; sin embargo, por problemas técnicos con la estación CIMA en diversos periodos de tiempo durante su funcionamiento no fue del todo posible contar con todos los telesismos registrados por esta estación. En total se encontraron y utilizaron 12 eventos telesísmicos (Figura 7), registrados por la red de estaciones sísmicas del volcán Tacaná entre 2012 y 2014. De los 12 eventos, sólo los primeros seis fueron registrados por las cuatro estaciones de la red y los seis restantes fueron registrados por tres estaciones (CHIQ, PAVE y PATR). Se trató de tener la mayor cobertura azimutal posible; la localización, magnitud, hora de ocurrencia y distancia epicentral de los eventos con respecto al volcán, se desglosan en la Tabla 1.

**Tabla 1. Localización de los eventos registrados por la red sísmica del Tacaná**

<b>Evento</b>	<b>Fecha</b>	<b>Hora (GMT)</b>	<b>Long</b>	<b>Lat</b>	<b>Prof (km)</b>	<b>Mag Mw</b>	<b>Localización</b>	<b>Dist (km)</b>
1	10/01/2012	18:26:59	93.210	2.433	19	7.2	Noroeste de Indonesia	17,955
2	30/01/2012	05:11:00	-75.635	-14.168	43	6.4	Perú	3,666
3	15/02/2012	03:21:20	-127.518	43.625	11	5.8	Oregón	4,611
4	12/04/2012	07:06:00	-113.027	28.837	9	6.0	Baja California, México	2,600
5	12/04/2012	07:15:48	-113.104	28.696	13	7.0	Baja California, México	2,600
6	28/05/2012	05:07:23	-63.094	-28.043	587	6.7	Argentina	5,744
7	07/12/2012	08:18:23	143.949	37.890	31	7.3	Honshu, Japón	11,689
8	02/06/2013	01:12:25	165.114	-10.799	24	8.0	Salomón	11,666
9	09/02/2013	14:16:07	-77.393	1.135	145	6.9	Colombia	2,244
10	16/04/2013	10:44:20	61.996	28.033	80	7.7	Irán	14,477
11	09/01/2014	20:57:43	-80.728	23.182	10	5	Cuba	1,511
12	13/01/2014	04:01:03	-66.810	19.043	20	6.4	Puerto Rico	2,722

En la Tabla 1 se puede ver que tenemos eventos con distancias más allá de los 11,500 km, por lo que ya no se registran los arribos de ondas directas, sin embargo aunque no sean ondas directas, también podemos obtener información de la estructura debajo de las estaciones. En la Figura 8 se muestra, como ejemplo, el sismo registrado el 30 de enero de 2012 a las 05:11:00 horas (GMT) a una profundidad de 43 km con magnitud de momento  $M_w=6.4$  y a una distancia epicentral, con respecto al volcán, de  $33.4^\circ$  (3,707.4 km), este evento fue registrado por las 4 estaciones que componen la red sísmica del Tacaná; y en la Figura 9 se puede observar el sismo registrado el 16 de abril de 2013 a las 10:44:20 horas (GMT) a una profundidad de 80 km con magnitud de momento  $M_w=7.7$  y a una distancia epicentral, con respecto al volcán, de  $130.3^\circ$  (14,463.3 km); este evento solo fue registrado por tres de las estaciones de la red (CHIQ, PAVE, PATR).



Figura 7. Localización de los sismos registrados por la red de monitoreo del volcán Tacaná.

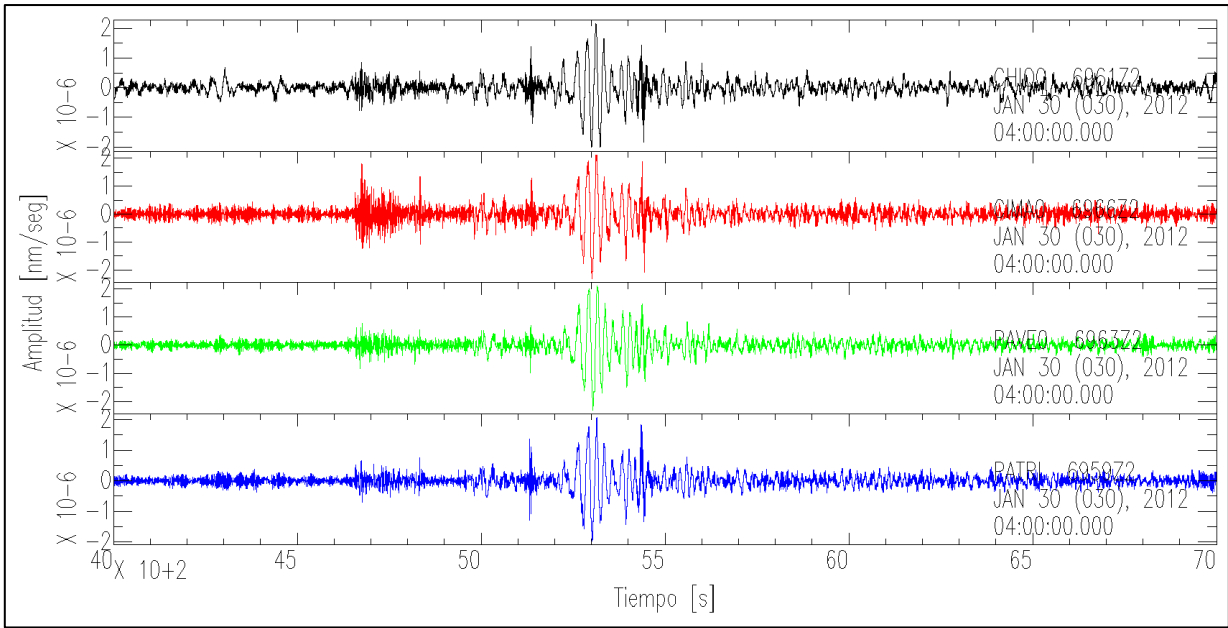


Figura 8. Sismogramas en la componente Z para las 4 estaciones del sismo registrado el 16 de abril de 2012

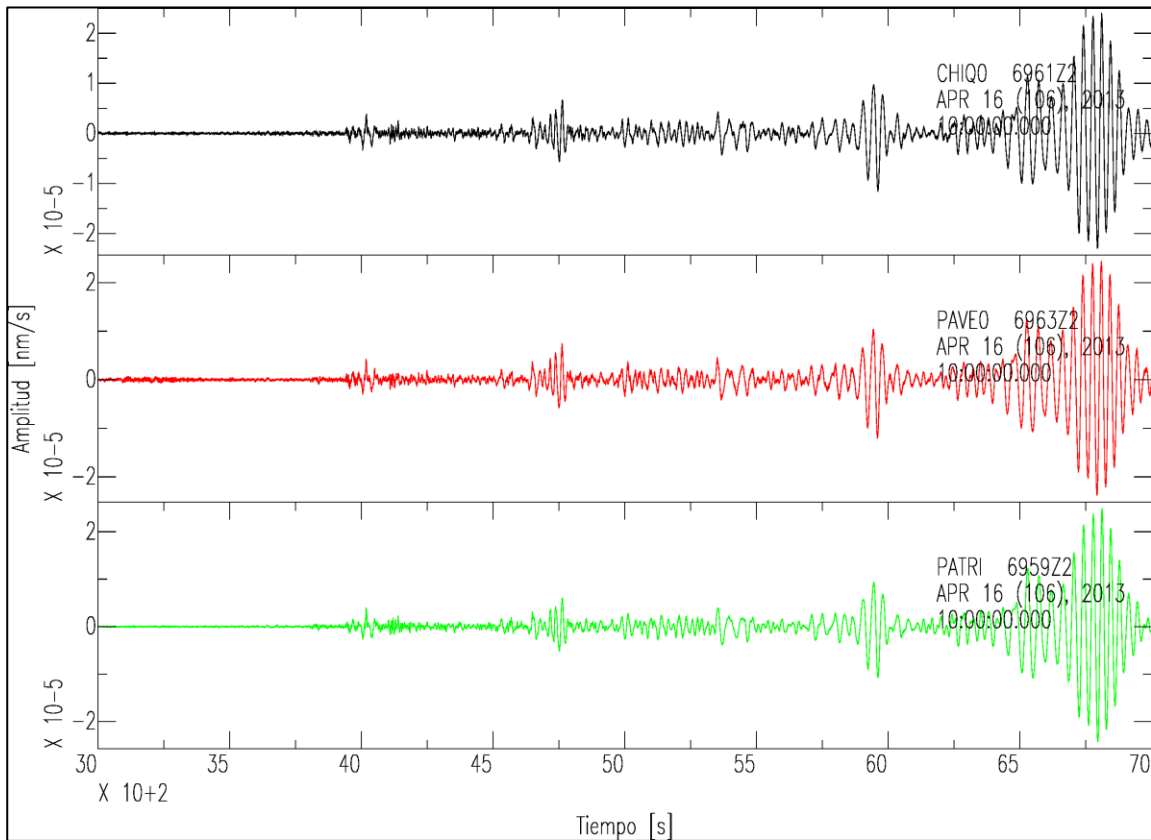


Figura 9. Sismogramas de las tres estaciones en la componente vertical para el sismo registrado el 16 de abril de 2013 en Irán con  $M_w=7.7$

### III.3 Procesamiento

Una vez identificados los eventos a utilizar, se realizó la búsqueda de las formas de onda en la base de datos del SSN. El procesamiento de los datos se llevó a cabo con el programa SAC (Seismic Analysis Code<sup>2</sup>); primero se convirtieron los datos del formato nativo (.gcf) al formato sac, después se removió la respuesta instrumental. Para poder hacer esto se construyeron los archivos de Polos y Zeros por estación y componente, con un total de 12 archivos; cada uno consta de 6 polos, 2 zeros y la constante de normalización (ver ejemplo en la Figura 10).

Antes de remover la respuesta instrumental se eliminó la media, la tendencia y se aplicó un *taper*<sup>3</sup> del 5% a los datos.

En la Figura 11 se muestra un ejemplo de una traza con y sin respuesta instrumental para la estación CHIQ en su componente Este. Se puede observar que una vez eliminada la respuesta instrumental la forma de onda cambia ligeramente y se hace más evidente en periodos muy largos.

ZEROS	2	
	+0.000000e+00	+0.000000e+00
	+0.000000e+00	+0.000000e+00
POLES	6	
	-14.80318e-02	+14.80318e-02
	-14.80318e-02	-14.80318e-02
	-391.955	+850.693
	-391.955	-850.693
	-2199.115	0.00
	-471.239	0.00
CONSTANT	1.462274E+022	

Figura 10. Ejemplo de archivo de Polos y Zeros utilizado para remover la respuesta instrumental de la estación CHIQ en su componente E

<sup>2</sup> Seismic Analysis Code (SAC) es un programa interactivo para el análisis de series de tiempo. <http://ds.iris.edu/ds/nodes/dmc/software/downloads/sac/>

<sup>3</sup> El comando "*taper*" en SAC ayuda a llevar los extremos de la señal a cero y se incrementa suavemente a su valor original.

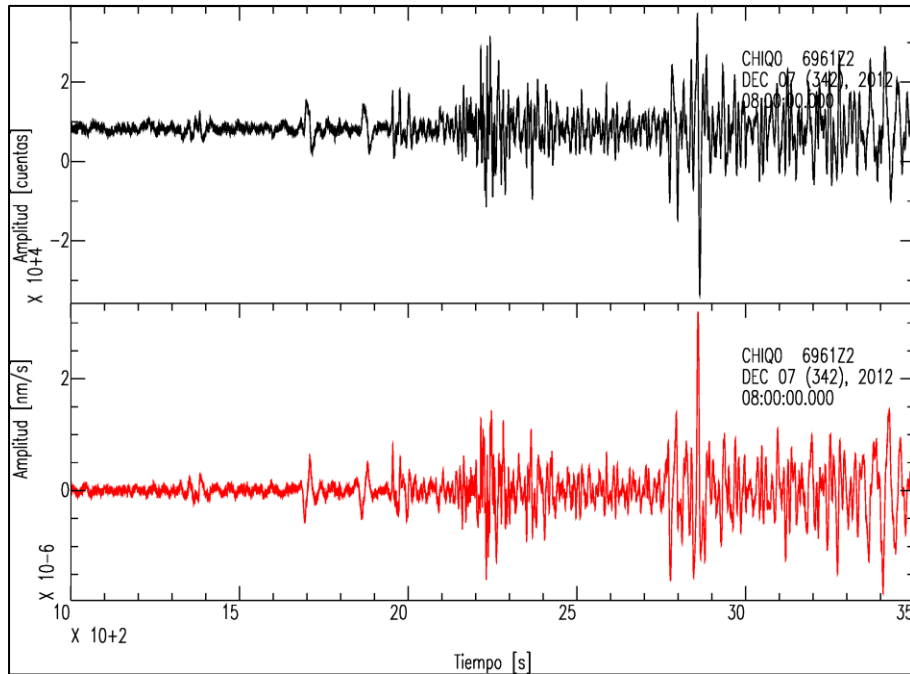


Figura 11. En negro sismograma con amplitud en cuentas y en rojo sismograma sin respuesta instrumental y amplitud en nanómetros por segundo nm/s.

Con ayuda del programa TauP Toolkit<sup>4</sup> (Crotwell, Owens, & Ritsema, 1999) y las tablas de Jeffreys y Bullen (1940), se calcularon los tiempos de viaje y se identificaron los arribos de las fases de las ondas de cuerpo P y S, de acuerdo a la distancia epicentral para cada evento con respecto a la red del volcán. El modelo de velocidades utilizado para el programa TauP fue el AK135 (Kennett, et. al., 1995). En la Tabla 2 se muestra un ejemplo de la salida del programa TauP para el sismo registrado el 30 de enero de 2012 en la estación CIMA. En la Figura 12 se ejemplifica la trayectoria de los rayos, de acuerdo a la salida de TauP, y se puede observar que la incidencia del rayo sísmico es sub-vertical, por lo que estaría atravesando de forma cuasi-perpendicular las estructuras que se encuentran debajo de cada estación.

<sup>4</sup> El programa TauP Toolkit calcula tiempos de viaje para las ondas sísmicas, de acuerdo a la distancia epicentral, modelo de velocidades elegido y profundidad el evento.



Tabla 2. Ejemplo de salida del programa TauP

Model:	ak135	Station:	CIMA					
Distance (deg)	Depth (km)	Phase Name	Travel Time (s)	Ray Param p (s/deg)	Takeoff (deg)	Incident (deg)	Purist Distance	Purist Name
33.41	45.7	P	394.15	8.714	39.4	27.03	33.41	P
33.41	45.7	PcP	554.78	2.814	11.83	8.44	33.41	PcP
33.41	45.7	S	712.12	15.5	39	28.84	33.41	S
33.41	45.7	PKiKP	1000.03	0.729	3.04	2.18	33.41	PKiKP
33.41	45.7	ScS	1016.39	5.205	12.2	9.32	33.41	ScS
33.41	45.7	SKiKS	1420.59	0.809	1.88	1.44	33.41	SKiKS

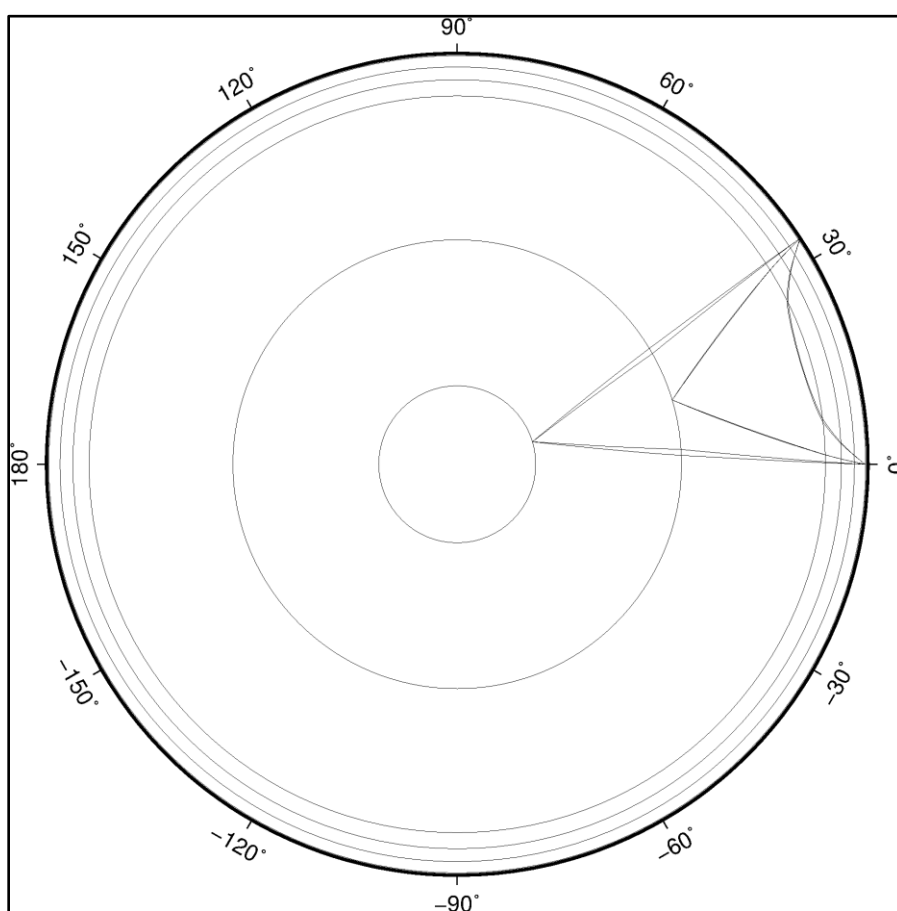
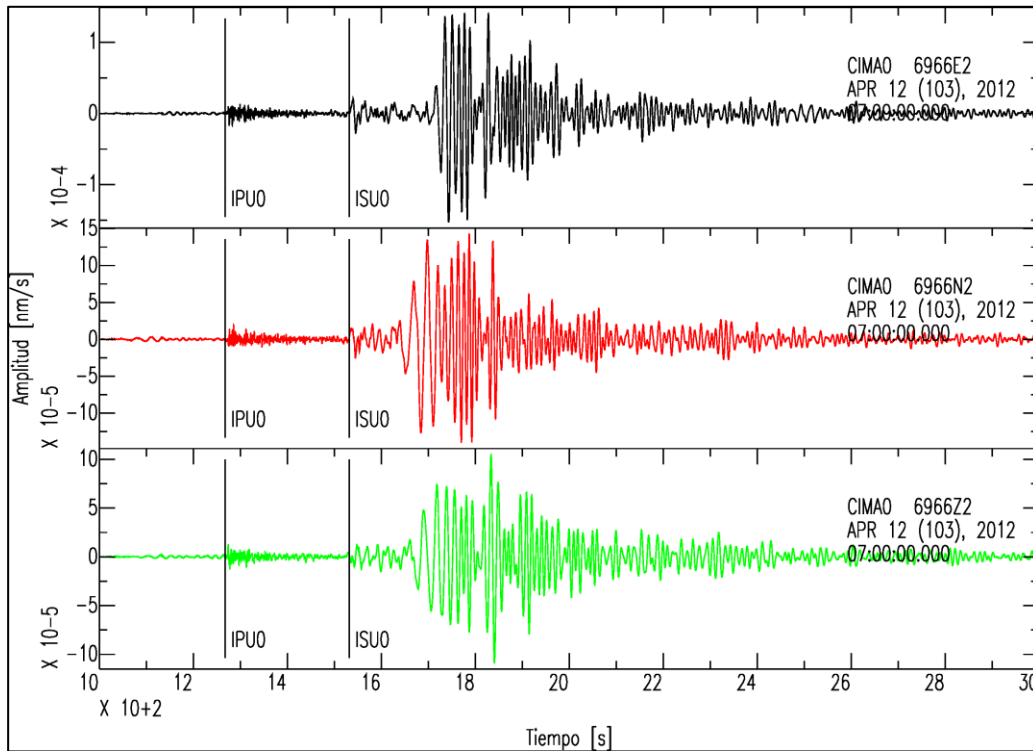


Figura 12. Ejemplo de las trayectorias de las ondas sísmicas, obtenidas con TauP Toolkit

Una vez que se obtuvieron los tiempos de viaje de las fases, se graficaron las fases de cuerpo (P y S) de acuerdo a los tiempo de viaje calculados, la Figura 13 muestra un ejemplo para el sismo registrado el 12 de abril de 2012 con magnitud de  $M_w=7.0$  y registrado por la estación la CIMA en sus tres componentes Z, N-S y E-W.



**Figura 13. Ejemplo de los arribos de las fases de cuerpo P y S para el sismo del Golfo de California registrado el 12 de abril de 2012**

El siguiente paso fue encontrar las ventanas óptimas para aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT por sus siglas en inglés) y obtener los cocientes espectrales. Se hicieron pruebas con ventanas de 25 y 50 segundos, en esta parte del proceso se eligieron las ventanas de 25 segundos, para no tener la influencia de otros arribos. Con la duración de la ventana elegida y la tasa de muestreo a 40 muestras/seg, da un total de 1,000 muestras, por lo que al aplicar la FFT se le agregaron 12 ceros en cada extremo de la señal y así se cumple con la restricción de la transformada de Fourier; antes de obtener los espectros de amplitud a las ventanas elegidas, para cada estación y componente, se aplicó nuevamente un *taper* del 5%, así como un filtro pasabandas de 25 segundos a 2 Hz.

En la Figura 14 se muestra un ejemplo de una ventana de 25 segundos para la fase P del sismo registrado el 9 de febrero de 2013 con epicentro en Colombia y en la Figura 15 se muestra un ejemplo de los espectros de amplitud para el sismo registrado el 12 de abril de 2012 con epicentro en el Golfo de California.

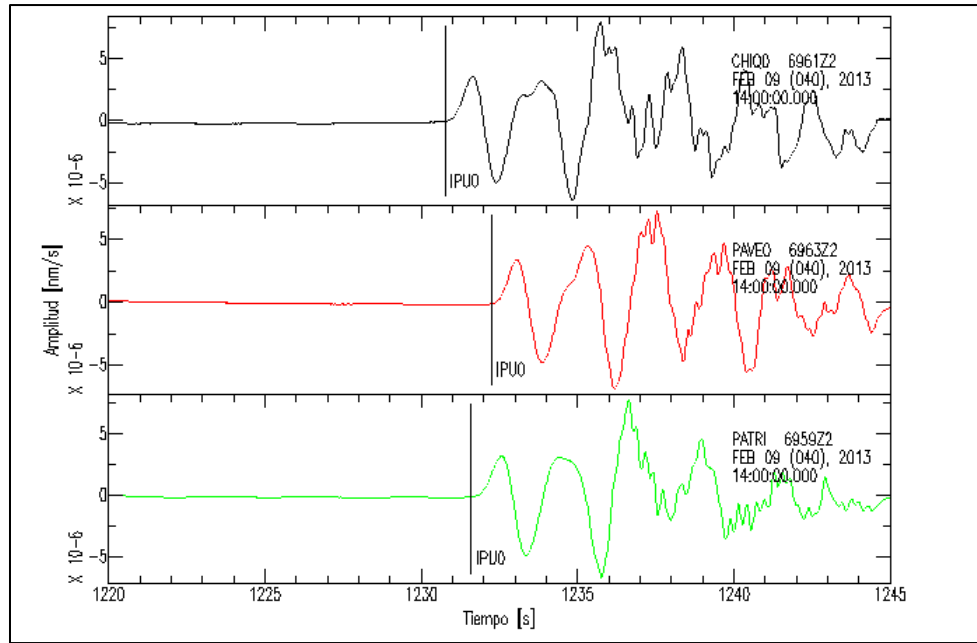


Figura 14. Ventana alrededor de la onda P para el sismo registrado el 9 de febrero de 2013 con epicentro a 2 km al norte de Yacuanquer, Colombia.

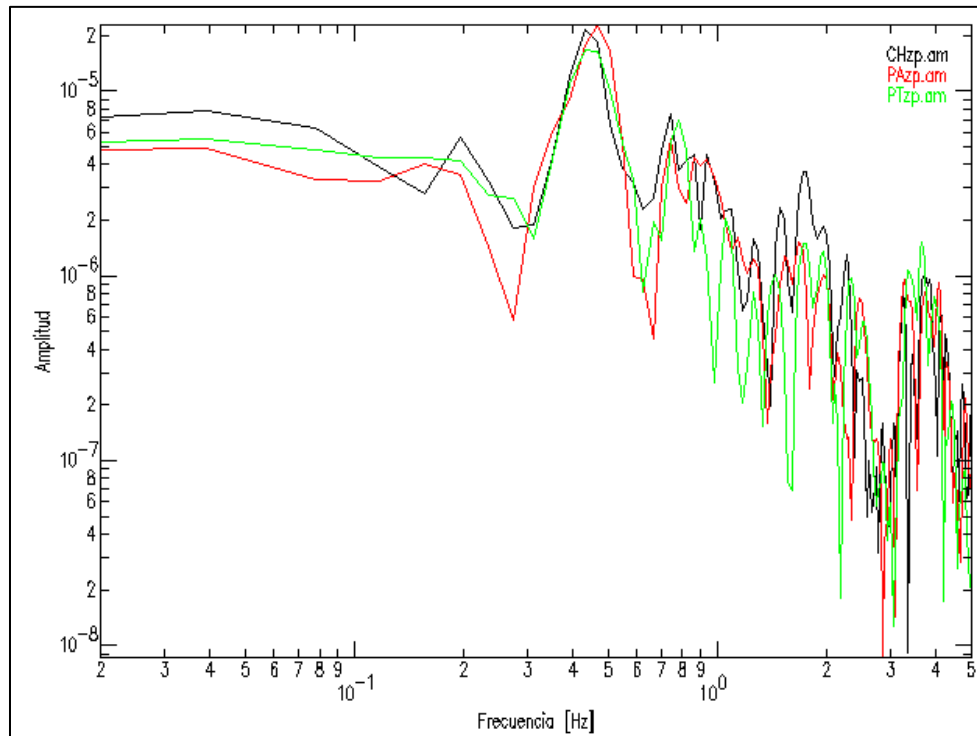


Figura 15. Espectros de amplitud de la onda P para el sismo registrado el 9 de febrero de 2013 con epicentro a 2 km al norte de Yacuanquer, Colombia.

Una vez obtenidos los espectros de amplitud para las tres componentes (Z, N-S, E-W), se eligió la estación de referencia para cada evento. El criterio para la elección de la estación de referencia fue de acuerdo al azimut del primer arribo, de la fase P, a la red de estaciones; eventos con azimut noroeste (NW), la estación de referencia fue PAVE (Pavencul); eventos con azimut sureste (SE), la estación de referencia fue CHIQ (Chiquihuites); eventos con azimut suroeste (SW), la estación de referencia fue PATR (La Patria) y finalmente eventos con azimut noreste la estación de referencia fue CIMA (La Cima), y con base en esto se realizaron los cocientes espectrales.

Las diferencias observadas serán asociadas a las heterogeneidades dentro de la estructura volcánica y se tomará como atenuación (baja amplitud) cuando el resultado de la división espectral tome valores menores a 1, en caso contrario se tomará como amplificación.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las trayectorias se clasificaron por azimut de arribo, es decir, para los eventos que tuvieron azimut noroeste (NW), la estación de primer arribo fue en la estación PAVE (Pavencul); los eventos con azimut sureste (SE), el primer arribo se registró en la estación CHIQ (Chiquihuites); los eventos con azimut suroeste (SW), el primer arribo lo registró la estación PATR (La Patria) y finalmente los eventos con azimut noreste el primer arribo, en teoría debió haberse registrado por la estación CIMA (La Cima), sin embargo como ya se mencionó la estación no estuvo en funcionamiento para todos los eventos elegidos, por lo que los eventos con este azimut se registraron por las estaciones CHIQ y PAVE. En la Tabla 3 se muestran los eventos de acuerdo al azimut y a la estación de referencia y en la Figura 16 se muestra la proyección de las trayectorias de los sismos registrados por la red del Tacaná; en color azul se representan los sismos que vienen de un azimut NW, en color verde a los sismos que vienen con un azimut NE, en color rojo los sismos que vienen del SE y en amarillo el sismo que vienen del SW.

**Tabla 3. Azimut y estación de referencia para los eventos registrados por la red sísmica del volcán Tacaná**

<b>Azimut</b>	<b>Estación de referencia</b>	<b>Eventos</b>
NW	PAVE	Noroeste de Indonesia, Honshu, Oregón, Golfo de California (2)
SE	CHIQ	Argentina, Colombia, Perú
SW	PATR	Islas Salomón
NE	PAVE	Irán, Cuba
	CHIQ	Puerto Rico

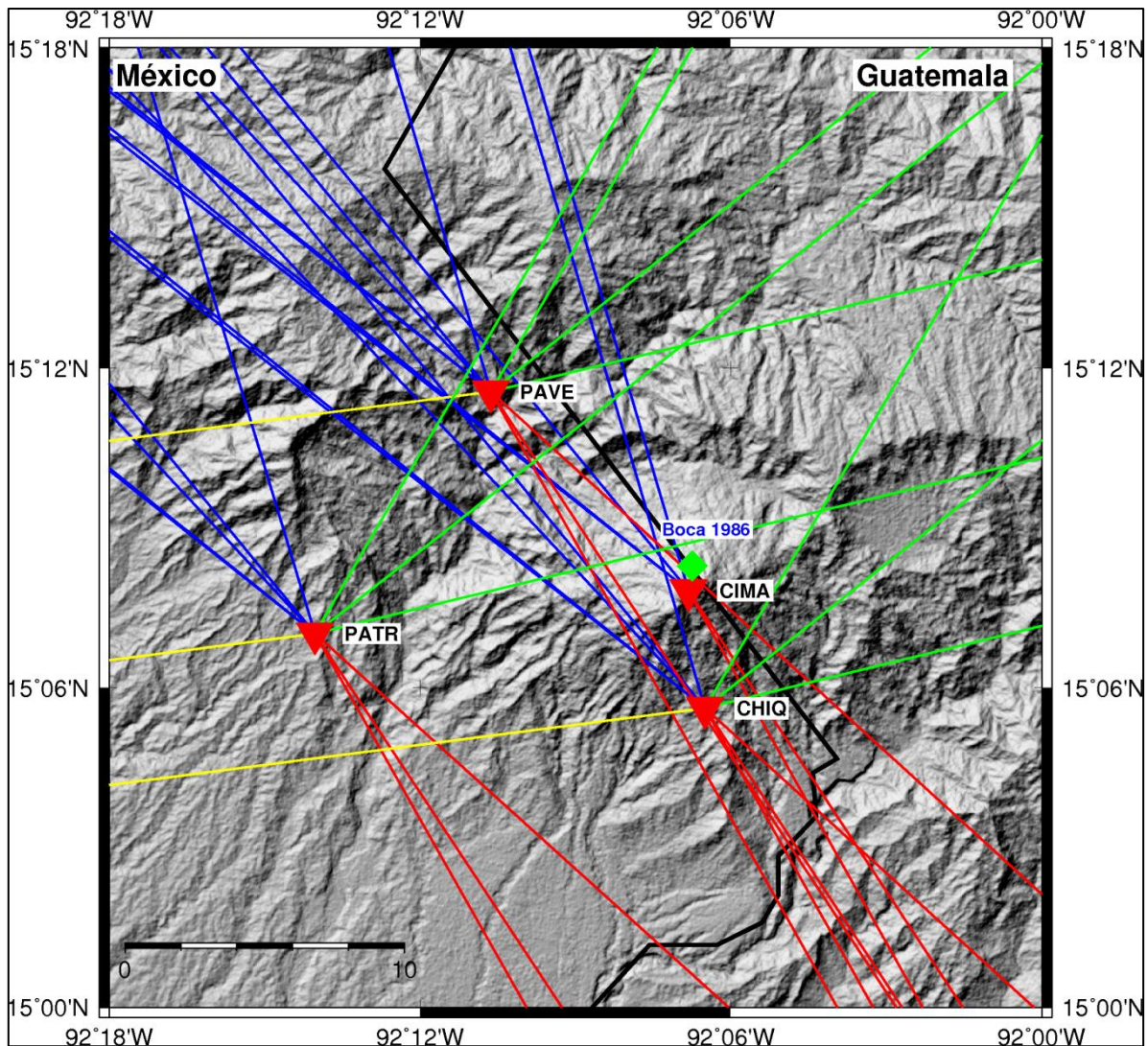


Figura 16. Proyección de las trayectorias de los sismos registrados por la red del Tacaná, los colores representan el azimut de arribo cada evento: azul-azimut NW, verde-azimut NE, rojo-azimut SE y amarillo-azimut SW.

En la Figura 17 se muestra un ejemplo de los espectros de amplitud para la onda P en la componente vertical (Z) del sismo registrado el 10 de enero de 2012 con epicentro al Noroeste de Indonesia y magnitud  $M_w=7.2$ .

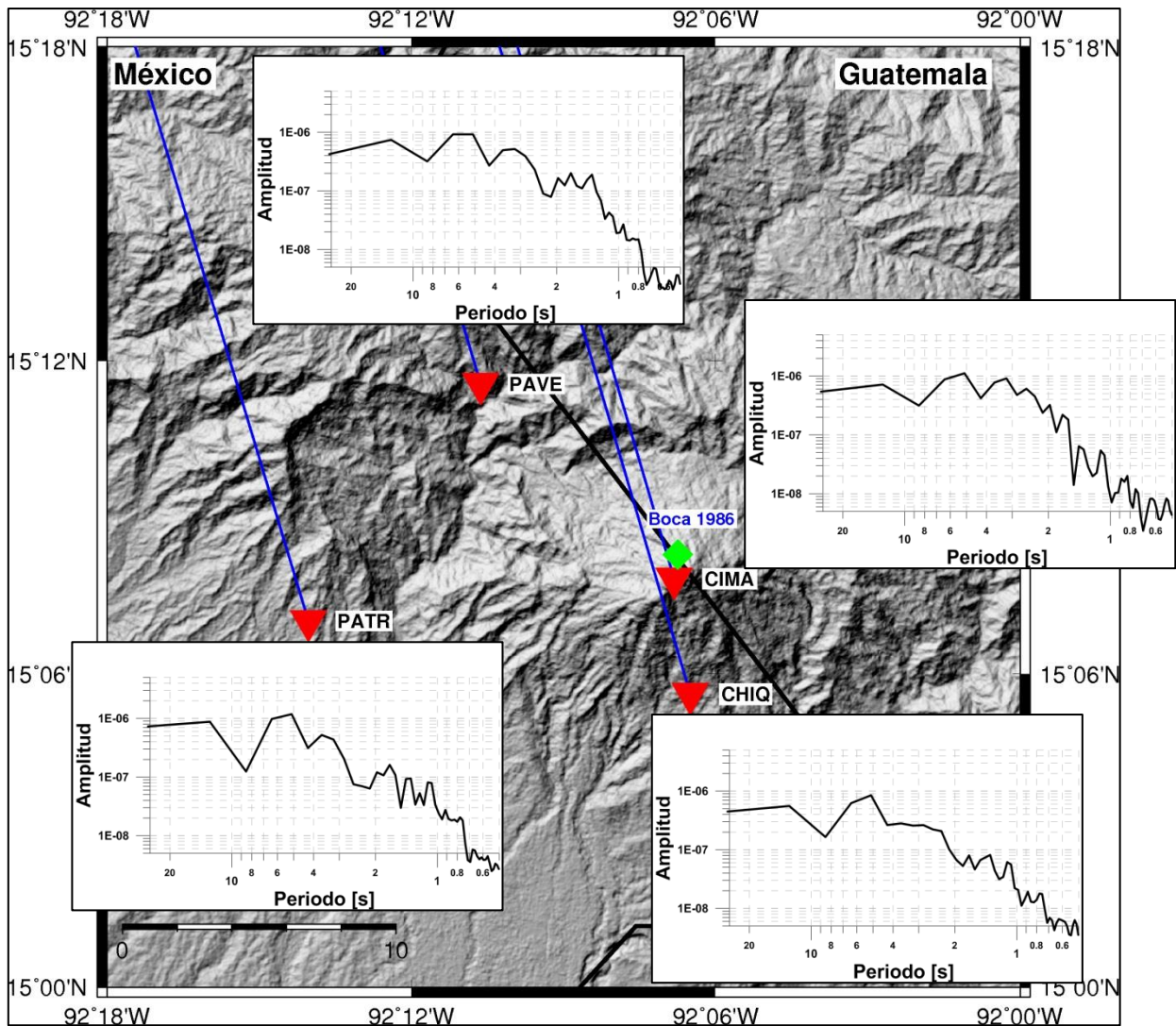


Figura 17. Ejemplo de los espectros de amplitud para la componente vertical del sismo con epicentro al Noroeste de Indonesia, registrado el 10 de enero de 2012 con  $M_w=7.2$ .

#### IV.1 Resultados

Se graficaron los cocientes espectrales por evento, estación y componente para cada una de las fases P y S. Las gráficas indican la amplitud en función del periodo ( $\frac{1}{f}$ ).

En la Figura 18 se grafican los cocientes espectrales para la onda P en la componente vertical del evento número 1, registrado el 10 de enero del 2012 con magnitud  $M_w=7.2$  y profundidad de 19 km a una distancia de  $161.6^\circ$  (17955 km),

respecto del volcán Tacaná y con epicentro al Noroeste de Indonesia. En el caso de la componente vertical se observa una baja amplitud en las tres estaciones entre 1 y 2 segundos, sin embargo la estación CIMA presenta mayor amplitud en el periodo de 2.36 s; para las tres estaciones la menor amplitud observada es menor a un ciclo logarítmico (Figuras 18 y 21).

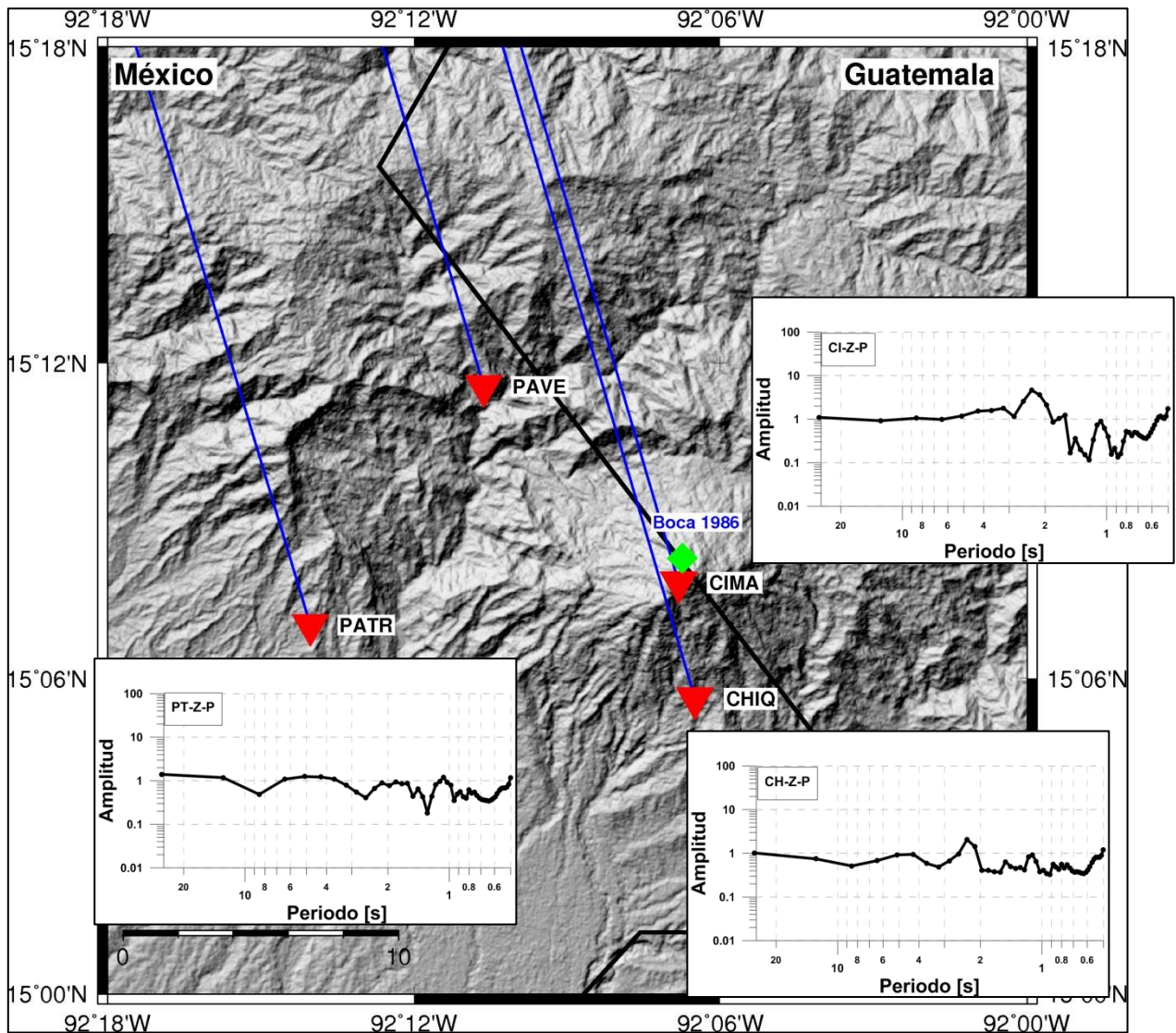


Figura 18. Cocientes espectrales para la fase P en la componente vertical del sismo registrado el 10 de enero del 2012 con epicentro al noroeste de Indonesia. La estación de referencia es PAVE las líneas azules representan la proyección de la trayectoria del rayo sísmico, los triángulos rojos representan las estaciones y el rombo verde representa la boca que se generó por la explosión de 1986

En la componentes N-S, para la misma fase P, se observa menor amplitud en  $T=1.51$  s y en  $T=0.98$  s para la estación CHIQ; en CIMA y PATR se observan



bajas amplitudes en  $T=2.56$  s (Figura 19). Para la componente E-W, en las estaciones CHIQ y PATR se presentan bajas amplitudes entre 0.5 y 2 s, con picos máximos en los periodos de 0.71, 1.60 y 2.13 s en CHIQ; y en PATR se observan picos máximos de amplitud en 0.91 y 1.16 s (Figura 21).

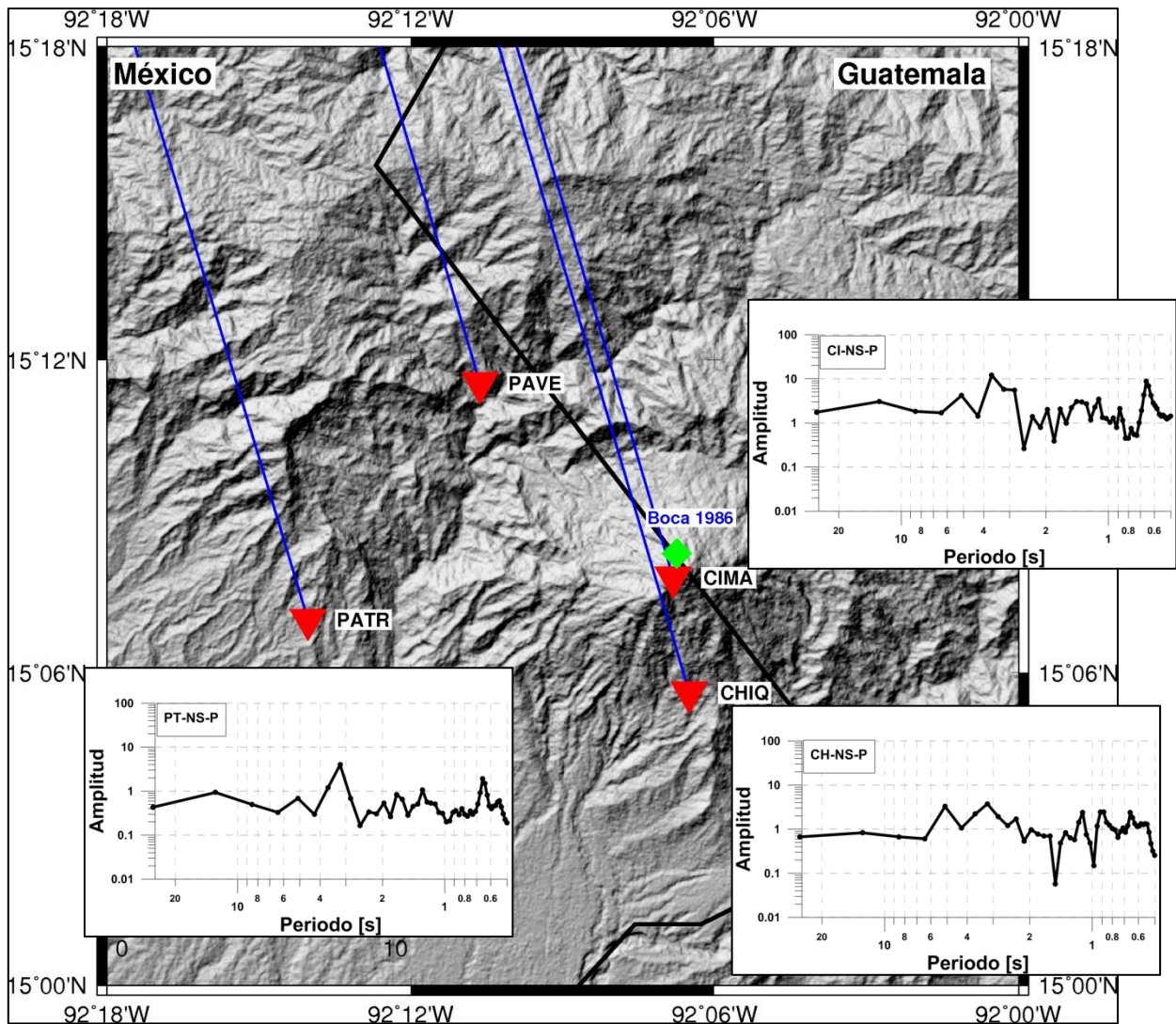


Figura 19. Cocientes espectrales para la fase P en la componente N-S, del sismo registrado el 10 de enero del 2012 con epicentro al noroeste de Indonesia. La estación de referencia es PAVE.

Para el caso de la fase S, en la componente vertical la mayor atenuación se observa para la estación CHIQ en los periodos 1.11 y 1.51 s; para CIMA la atenuación se observa en  $T=1.83$  s (Figura 21). En la componente N-S para CHIQ se tiene atenuación en los periodos 0.57, 1.02 y 8.53 s; en CIMA la atenuación se

observa en 0.57 y 2.13 s; finalmente para PATR presenta dos picos de atenuación importantes en 2.13 y 3.20 s (Figura 20). Para la componente E-W CHIQ y PATR presentan las amplitudes más bajas, en el caso de CHIQ en los periodos 0.71, 1.51, 2.13 y 3.20 s y en PATR en los periodos 1.28, 1.51 y 3.66 s. En CIMA se observa atenuación en  $T=8.53$  s (Figura 20 y Figura 21).

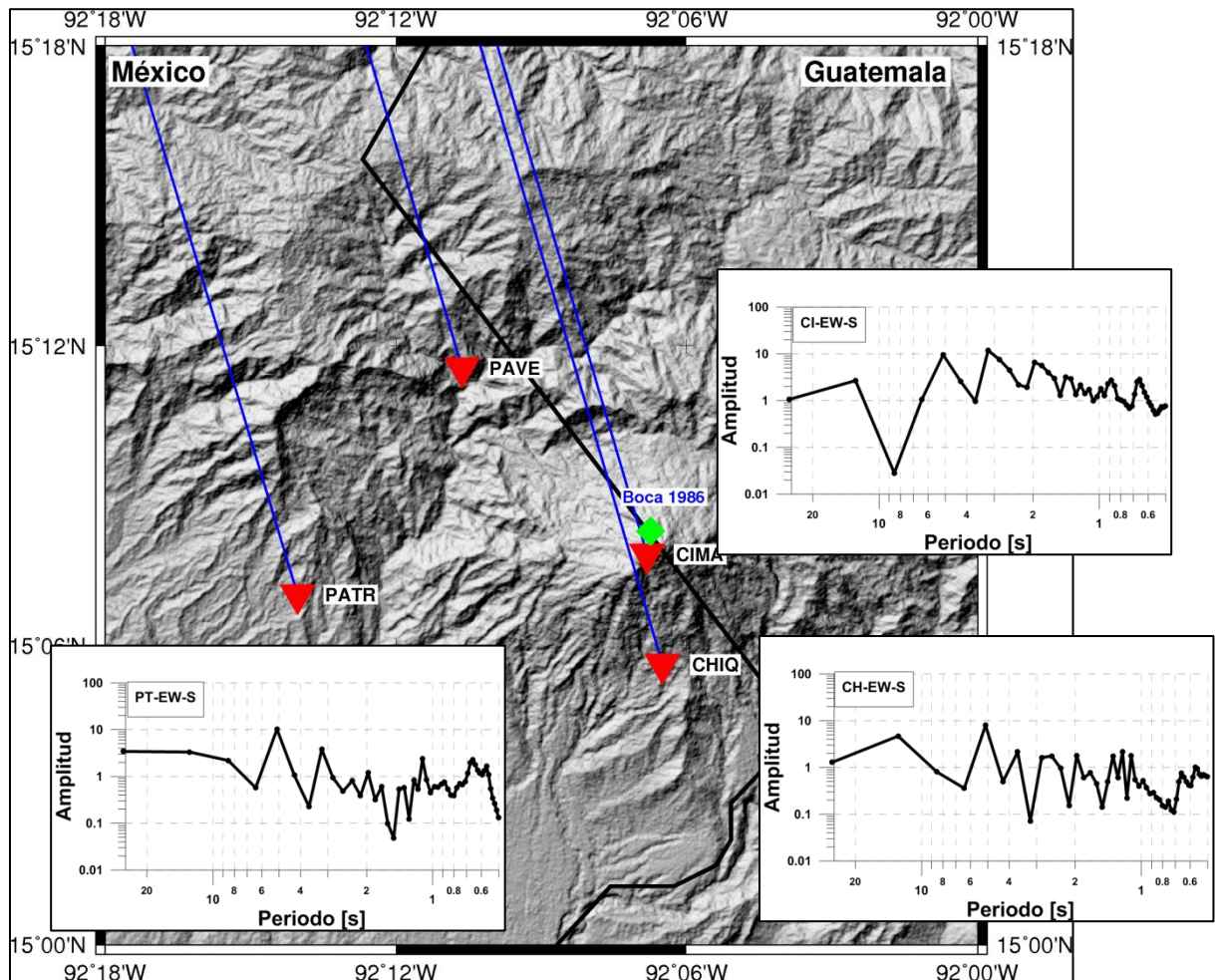


Figura 20. Cocientes espectrales para la fase S en la componente E-W, del sismo registrado el 10 de enero del 2012 con epicentro al noroeste de Indonesia. La estación de referencia es PAVE.

En la Figura 21 se grafican los cocientes espectrales juntos, tanto para la fase P como para la fase S, en las tres componentes vertical (Z), norte-sur (N-S) y este-oeste (E-W).

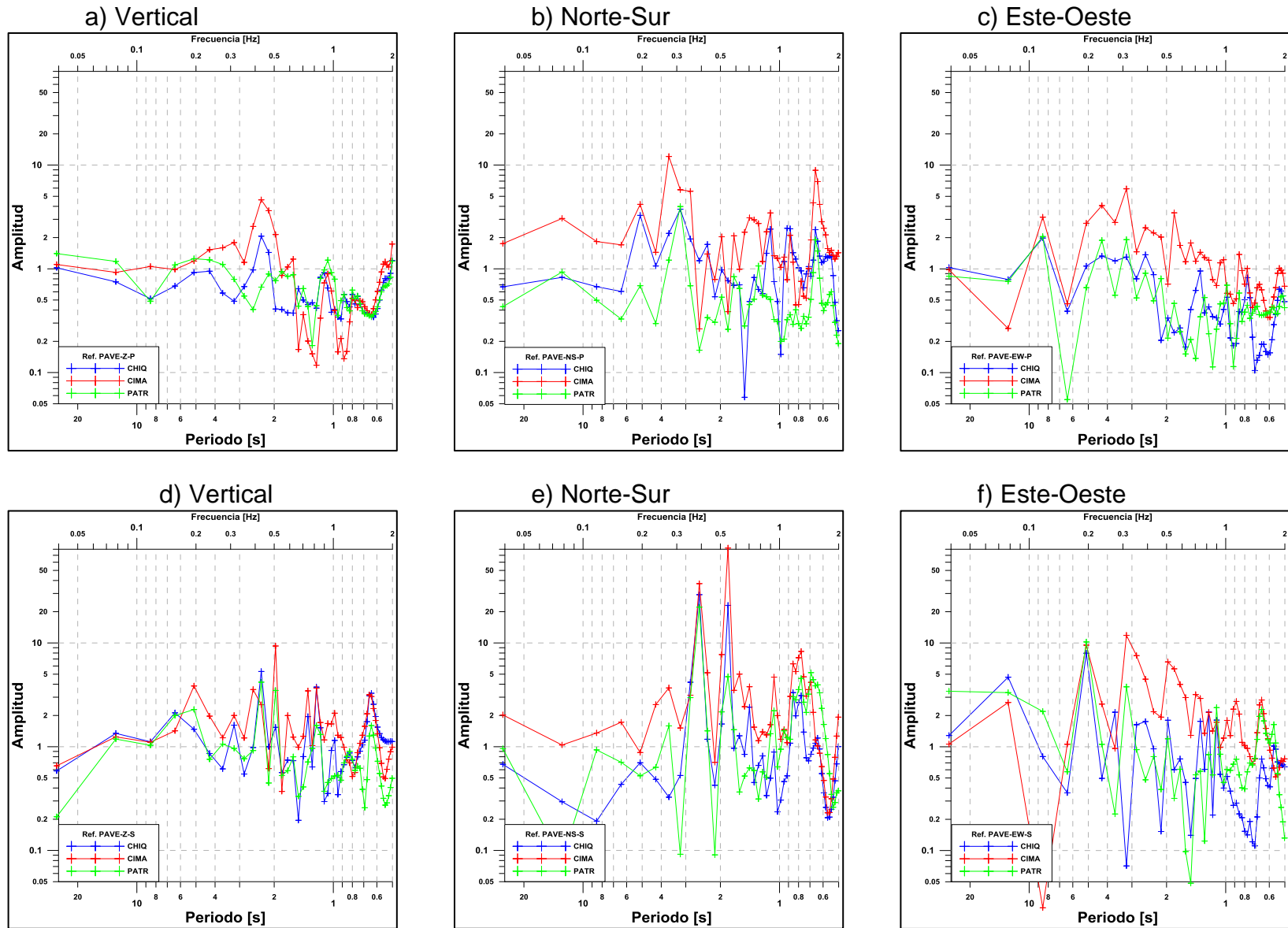


Figura 21. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 10 de enero del 2012 con epicentro al noroeste de Indonesia y MW=7.2. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

Para el segundo evento con azimut de arribo SE y CHIQ como estación de referencia, registrado el 30 de enero de 2012 con  $M_w=6.4$ , profundidad de 43 km, proveniente de Perú; para la fase P en la componente vertical la menor amplitud se observa en la estación CIMA para  $T=3.20$  s y para PATR en 1.02 y 1.51 s. En la componente N-S, la estación PAVE presenta menor amplitud en 2.84, 5.42 y 8.53 s, la estación CIMA en 0.98 y 1.71 s y finalmente para la estación PATR, la menor amplitud se observa entre 0.5 y 1.51 s. En la dirección E-W, en PATR se observa una baja amplitud de 0.5 a 2 s; CIMA en  $T=0.98$  y 1.16 s, y PAVE en los periodos de 1.51 a 2.13 s, así como en 3.66 y 8.33 s. Para este evento en las tres componentes de la estación PAVE se observa baja amplitud en  $T=8.53$  s (Figura 22 y Figura 23).

En el caso de la onda S, para la componente vertical se observan picos de atenuación en las tres estaciones (CIMA, PAVE y PATR) en  $T=1.83$  y 0.54 s, en  $T=0.98$  sólo para PAVE y PATR. En la dirección N-S, para las tres estaciones se observan picos de baja amplitud cercanos a  $T=0.9$  s y en  $T=1.42$  s. Sólo para las estaciones PAVE y PATR se observa baja amplitud en 0.6 a 0.8 s. Finalmente en la componente E-W, se observan baja amplitudes entre 0.5 y 1 s para las tres estaciones y en 1.11 y 1.71 s, solo para PAVE y PATR (Figura 23).

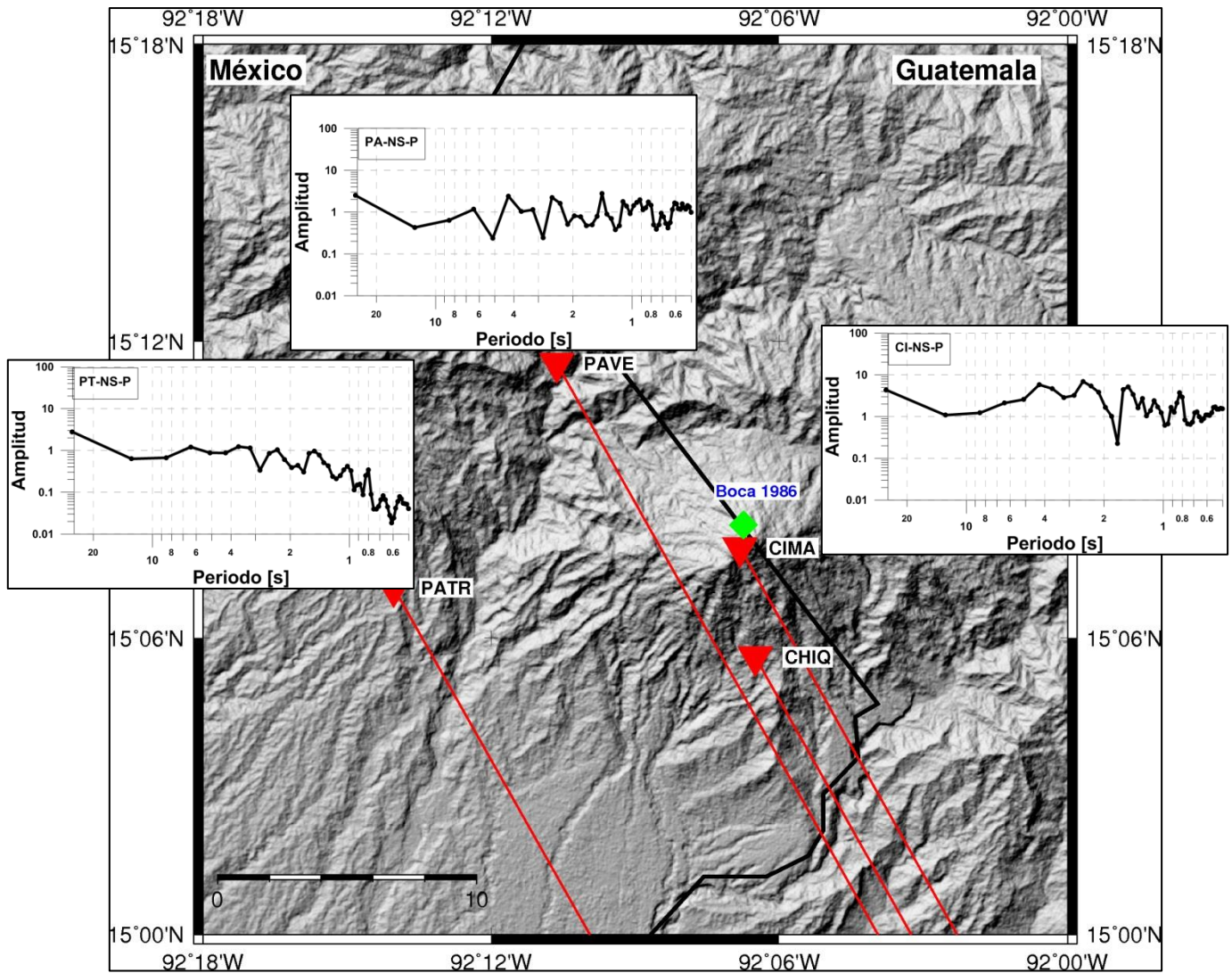


Figura 22. Cocientes espectrales para la fase P en la componente N-S, del sismo registrado el 31 de enero del 2012 con epicentro en Perú. La estación de referencia es CHIQ.

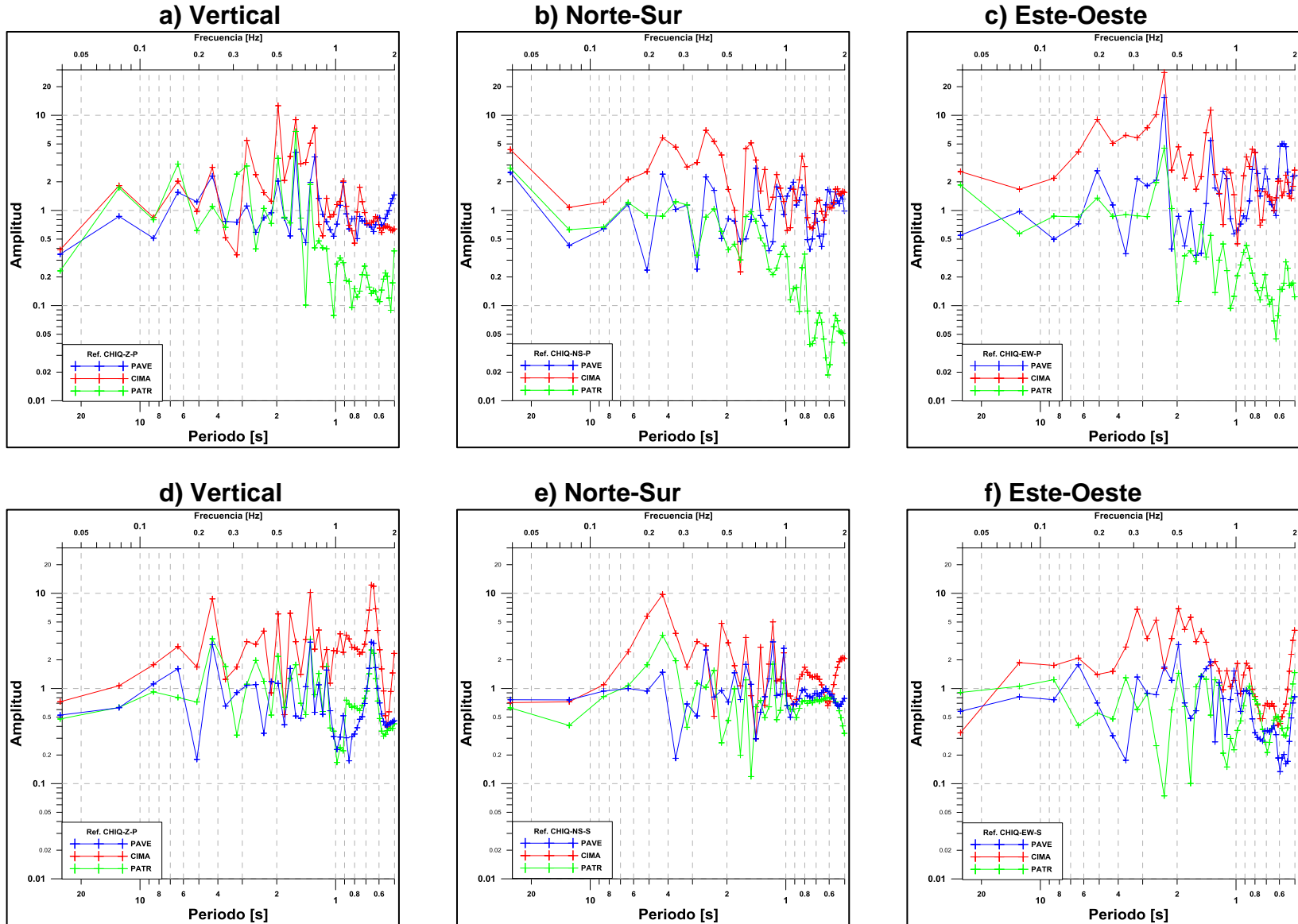


Figura 23. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 31 de enero del 2012 con epicentro cerca de las costas de Perú y MW=6.4. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es CHIQ y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

El tercer evento, con  $M_w=5.8$ , profundidad de 11 km, distancia de 4611 km, proviene de Oregón, California; tiene azimut de arribo NW y como estación de referencia a PAVE (Pavencul) (Figura 24). Para la fase P, la amplitud más baja se observó en la estación Chiquihuites (CHIQ), en las tres componentes Z, N-S y E-W entre 1 y 4 s; en CIMA en las componentes Z en 1.22 s y en la componente E-W en 1.16 s, finalmente en PATR la amplitud baja se observa en las componentes Z y E-W entre 0.8 y 2 s. En cuanto a la fase S, CHIQ presenta baja amplitud en 6.40 s para las tres componentes; CIMA presenta baja amplitud en 4.27 s en la componente Z y en 6.40 s para la componente E-W; en PATR se observa baja amplitud en 4.27 s en las componentes Z y E-W, así como en 2.13 s en las componentes N-S y E-W (Figura 25)

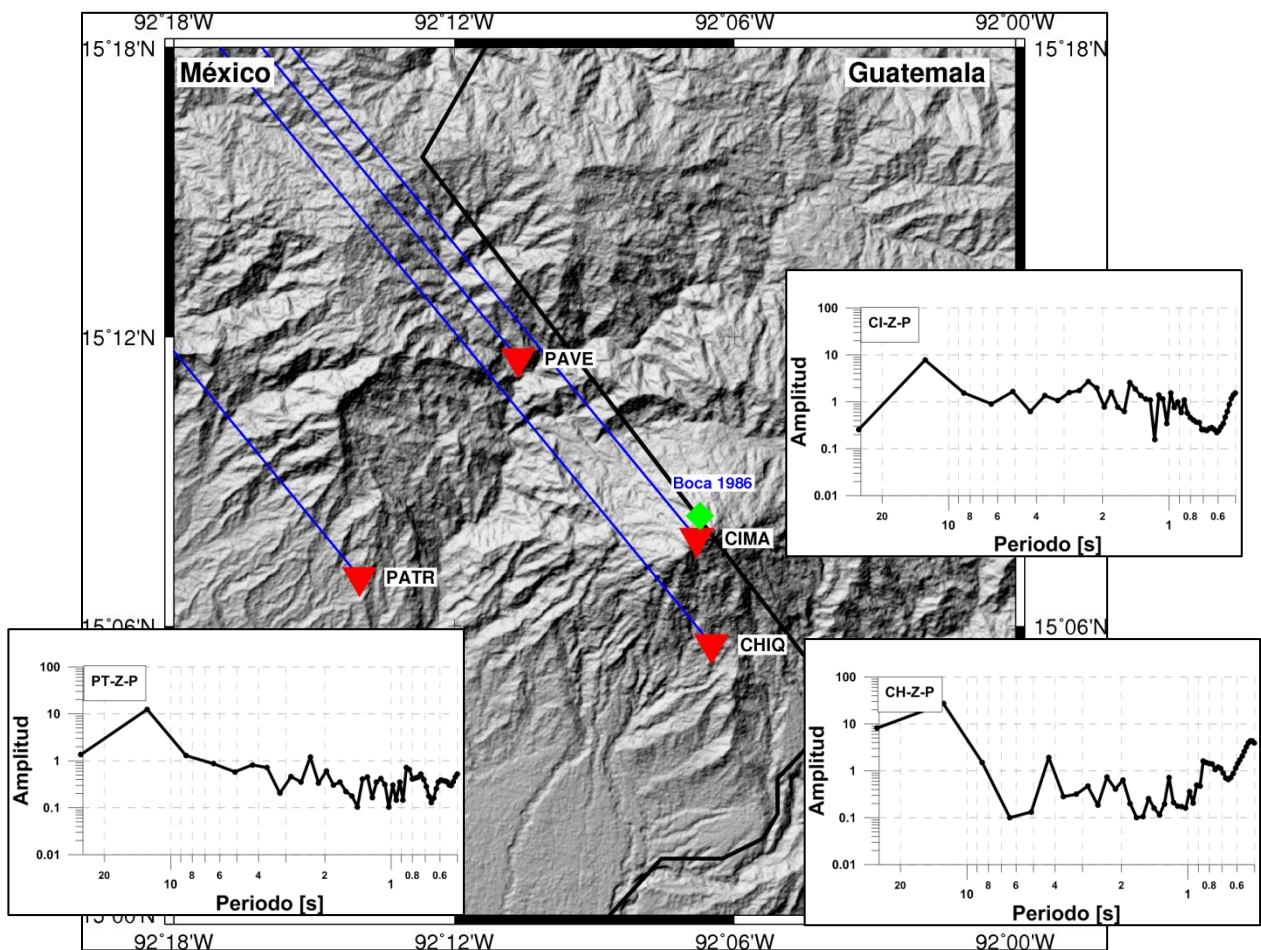


Figura 24. Cocientes espectrales para la fase P en la componente N-S, del sismo registrado el 15 de febrero del 2012 con epicentro en fuera de las costas de Oregón. La estación de referencia es PAVE.

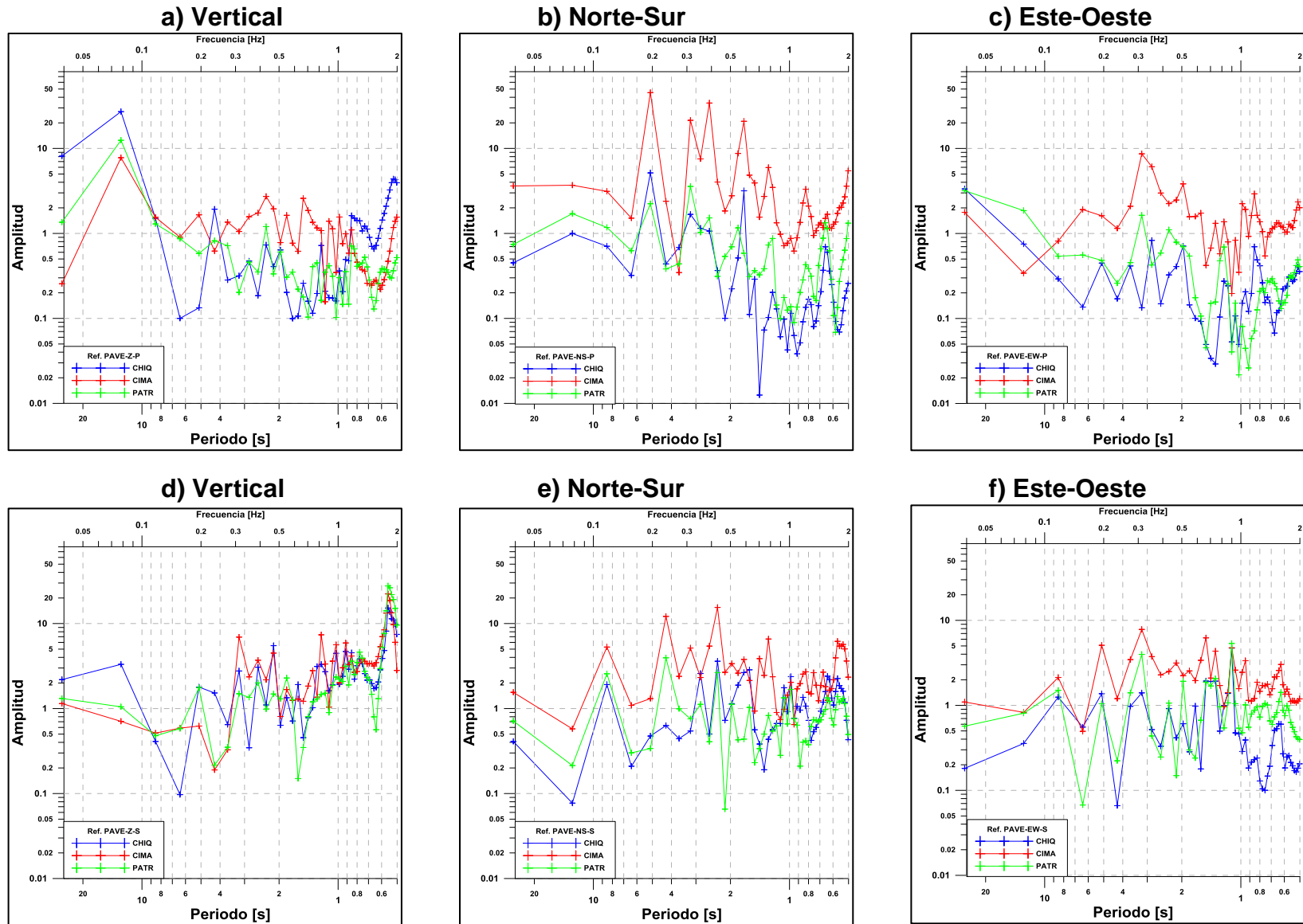


Figura 25. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 15 de febrero del 2012 con epicentro fuera de las costas de Oregon y  $M_w=5.9$ . Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.



El cuarto evento registrado el 12 de abril del 2012, con  $M_w=6.0$ , profundidad de 9 km, a una distancia de 2600 km y con epicentro en el Golfo de California; trayectoria con un azimut NW y estación de referencia PAVE (Figura 26).

En la componente vertical para la onda P se tiene baja amplitud en las tres estaciones (CHIQ, CIMA y PATR) alrededor de 0.6 y 0.9 s, además entre 1.16 y 1.42 s. Para la dirección N-S, la baja amplitud está entre 1 y 2.33 s, para las estaciones CHIQ y PATR, mientras que en la estación CIMA solo se observa baja amplitud en  $T=1.97$  s. En la componente E-W, se tiene baja amplitud entre 0.5 y 2 s, con picos máximos en 1.83 s para la estación PATR, así como en 1.12 y 1.16 s para la estación CHIQ (Figura 27).

Para la fase S, en la componente vertical, se tiene un pico de baja amplitud en  $T=2.84$  s para la estación CHIQ; para la estación CIMA solo se observa baja amplitud en  $T=1.71$  y 1.97 s, y para la estación PATR la baja amplitud se presenta entre 2.13 y 4.27 s. En la dirección N-S, la baja amplitud se tiene entre 0.7 y 1.6 s para la estación CHIQ; entre 0.6 y 1.71 s para la estación PATR y en la estación CIMA se observan tres picos de baja amplitud en 0.83, 1.02 y 1.22 s. Las tres estaciones presentan un pico de baja amplitud en  $T=2.33$  s. En la componente E-W se observa un pico de baja amplitud en  $T=0.64$  s, para las estaciones CIMA y CHIQ; en CIMA se aprecian tres picos más en 1.51, 2.56 y 4.27 s, finalmente en la estación PATR en 1.60 y 1.97 s (Figura 27).

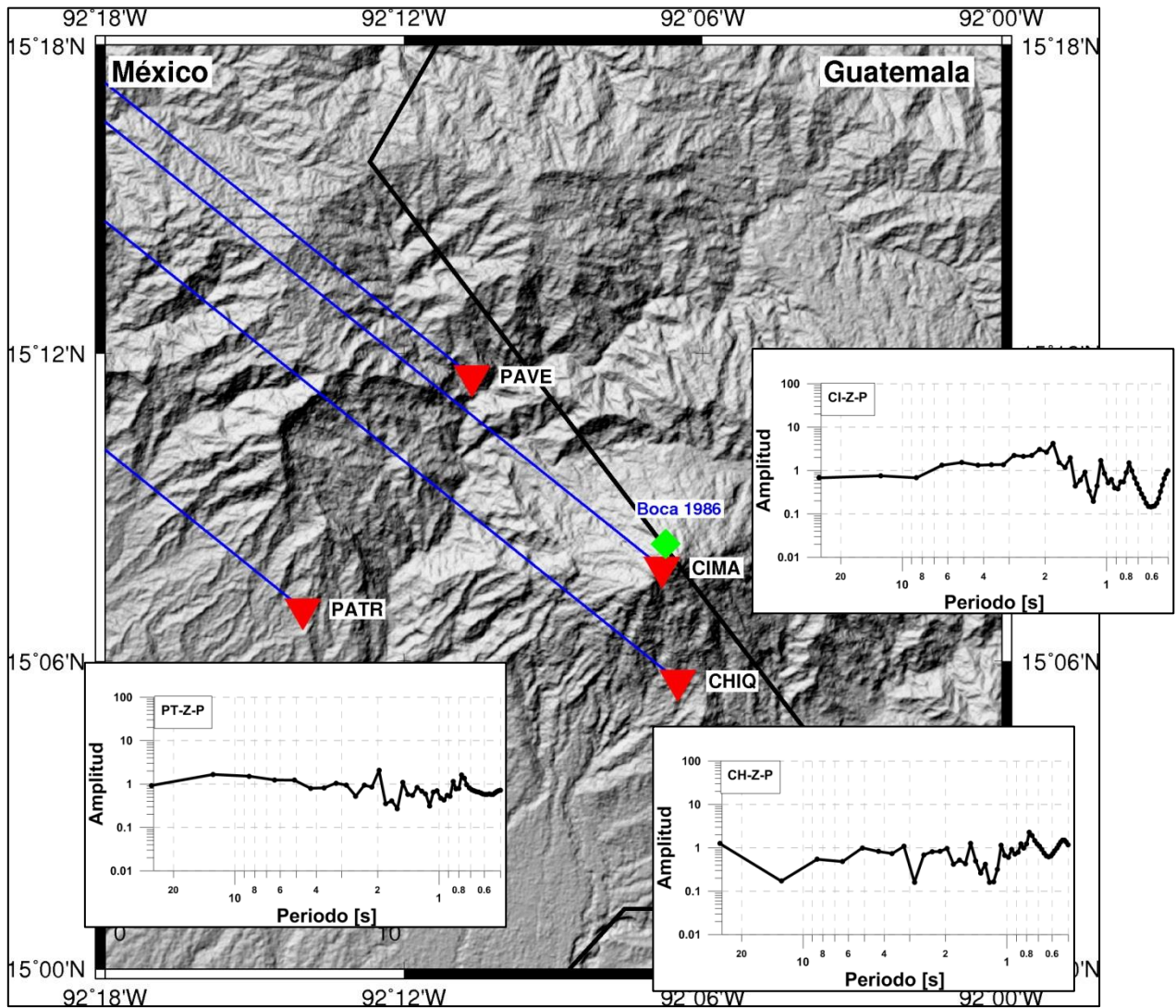


Figura 26. Cocientes espectrales para la fase P en la componente vertical, del sismo registrado el 12 de abril del 2012 con epicentro en el Golfo de California, México con Mw=6.0. La estación de referencia es PAVE.

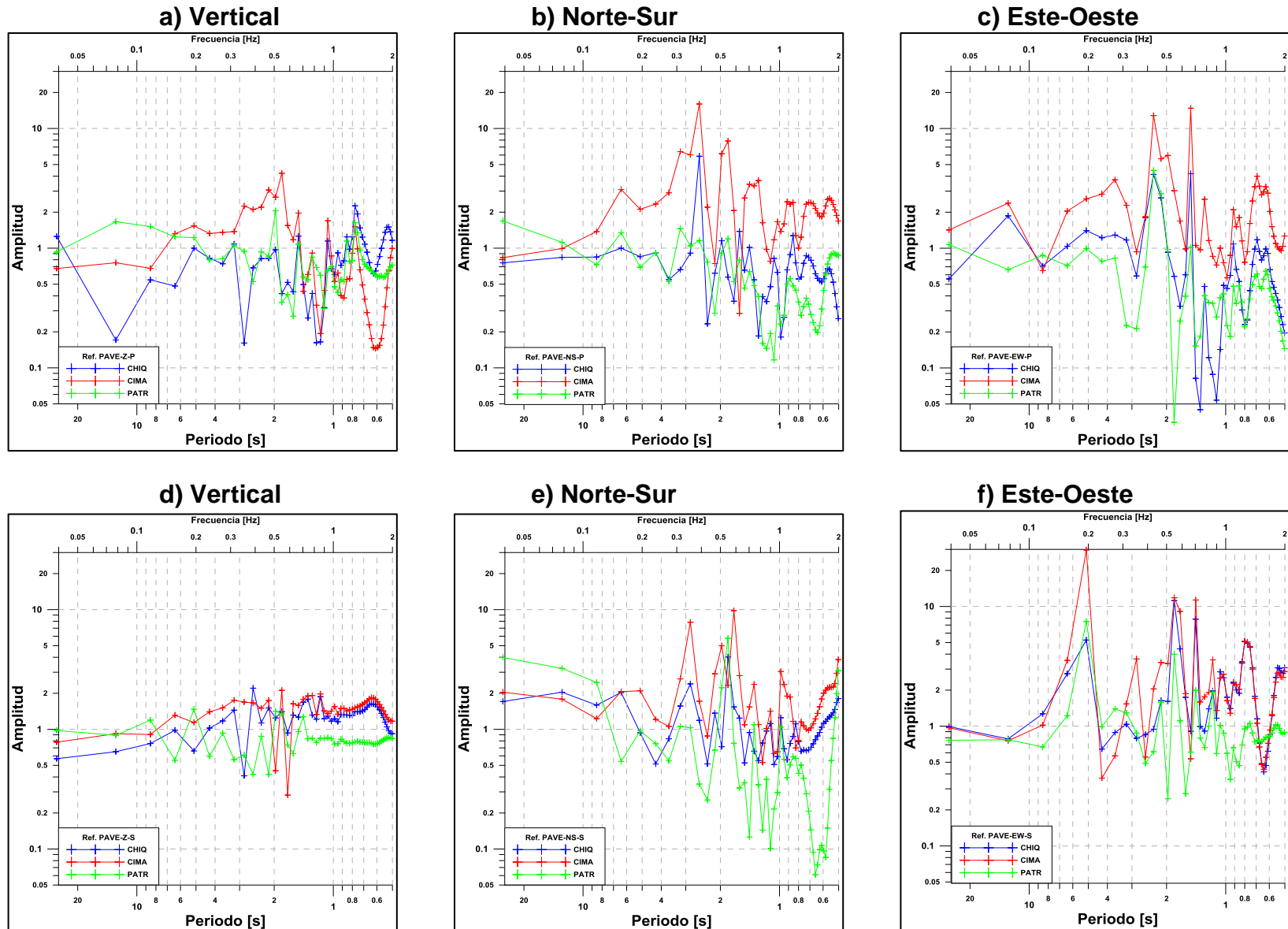


Figura 27. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 12 de abril del 2012 con epicentro en el Golfo de California y  $M_w=6.0$ . Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e, y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

El quinto evento con epicentro en Golfo de California, México,  $M_w=7.0$ , profundidad de 16 km y distancia epicentral de 2600 km. Al igual que el evento 4 tuvo una trayectoria con azimut NW y estación de referencia PAVE (Figura 28).

Para la onda P en la componente vertical, se observa baja amplitud de 0.6 a 2 s en la estación CHIQ, así como en la estación PAVE de 0.85 a 2 s; en la estación CIMA solo se observan dos picos de baja amplitud en 1.11 y 1.35 s. Para la componente N-S, en las estaciones CHIQ y PATR, la baja amplitud se presenta entre 0.5 y 2.56 s, con un pico mínimo en 1.97 s en CHIQ. En la dirección E-W, las estaciones tienen un comportamiento similar al de la dirección N-S, con baja amplitud entre 0.7 y 2 s para las estaciones CHIQ y PATR; en la estación CIMA se observa un pico en  $T=1.28$  s (Figura 29).

En el caso de la fase S en la componente vertical, las tres estaciones presentan un comportamiento parecido, tienen pocos picos de baja amplitud en diferentes periodos; CIMA en 1.60 s, PATR en 3.66 s y CHIQ en 6.40 s. En la componente N-S, CIMA tiene un pico de baja amplitud en 0.64 y 2.33 s; la estación CHIQ en 0.64 y 3.66 s, finalmente PATR en 1.71 s. En la componente E-W, solo se tienen dos picos de baja amplitud en la estación PATR para los periodos de 1.28 y 6.40 s (Figura 29)

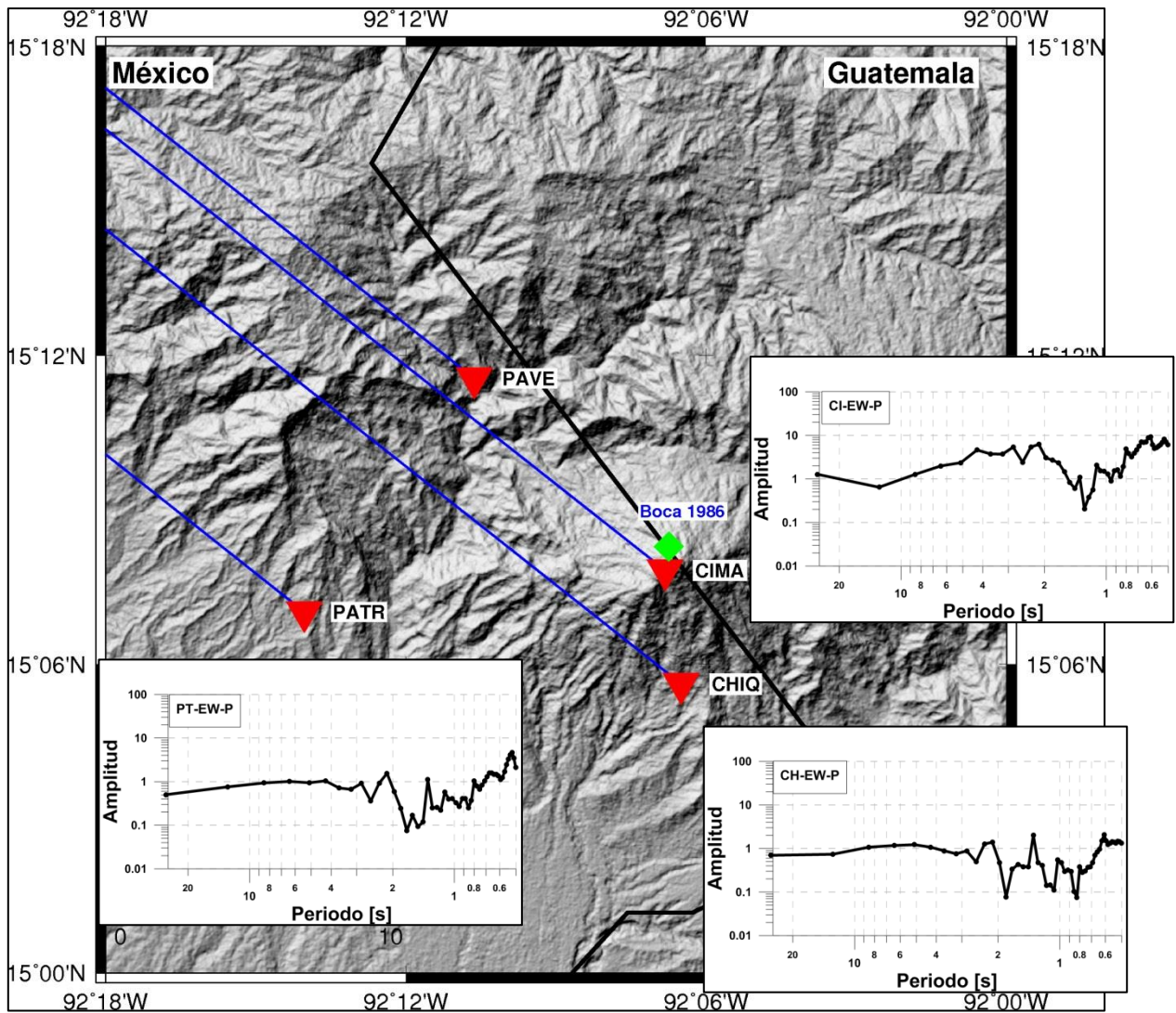


Figura 28. Cocientes espectrales para la fase P en la componente E-W, del sismo registrado el 12 de abril del 2012 con epicentro en el Golfo de California, México con  $M_w=7.0$ . La estación de referencia es PAVE.

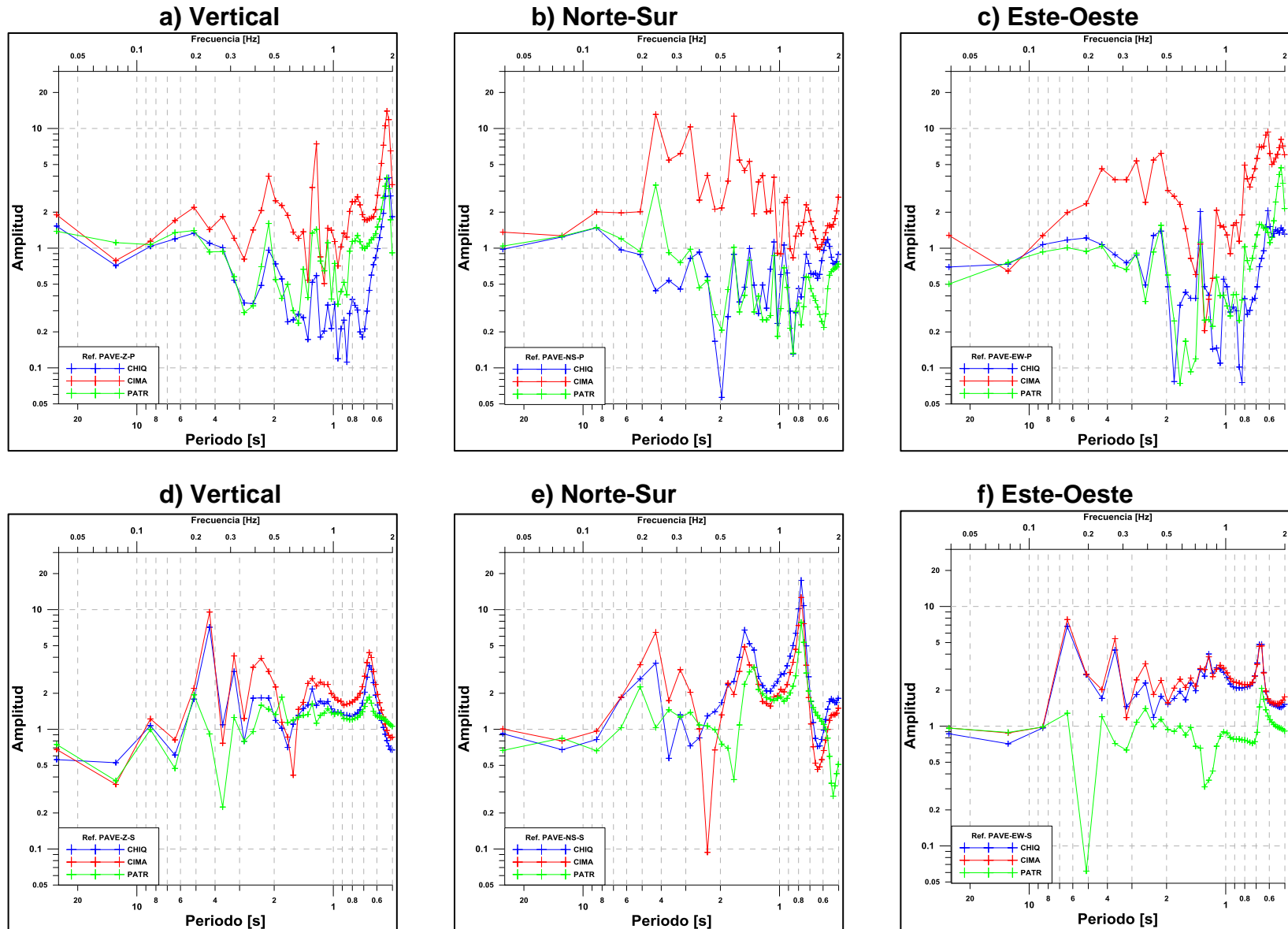


Figura 29. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 12 de abril del 2012 con epicentro en el Golfo de California y  $M_w=7.0$ . Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e, y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

El sexto evento con epicentro en Santiago del Estero, Argentina, registrado el 28 de mayo del 2012,  $M_w=6.7$ , profundidad de 587 km y distancia epicentral de 5744 km. Este evento tiene azimut de arribo SE y la estación de referencia es CHIQ (Figura 30).

Con el resultado de los cocientes espectrales para la onda P en la componente vertical, se observa un pico de baja amplitud en las tres estaciones (CIMA, PAVE y PATR) en los periodos  $T=0.83$  y  $1.71$  s. En la dirección N-S, el pico de baja amplitud se tiene en  $T=1.97$  s, sobretodo en la estación CIMA. Y solo para las estaciones PAVE y PATR se observa baja amplitud entre 0.6 y 1 s. Para la componente E-W, la amplitud más baja se observa en la estación PATR entre 0.5 y 1.51 s y para la estación PAVE en 2.56 y 5.12 s (Figura 31).

Para la onda S en la componente vertical se observan picos baja amplitud en la estación PAVE para los periodos  $T=1.83$  y  $T=5.12$  s. Para la componente N-S, también PAVE presenta baja amplitud en  $T=3.66$  s y PATR en  $T=1.28$  y  $T=1.71$  s. En la componente E-W, se observa baja amplitud de 1.71 a 1.97 s, en CIMA entre  $T=0.6$  y  $T=0.8$  s, finalmente en PATR los periodos en los que se observa baja amplitud están entre 1 y 2 s (Figura 30 y Figura 31).

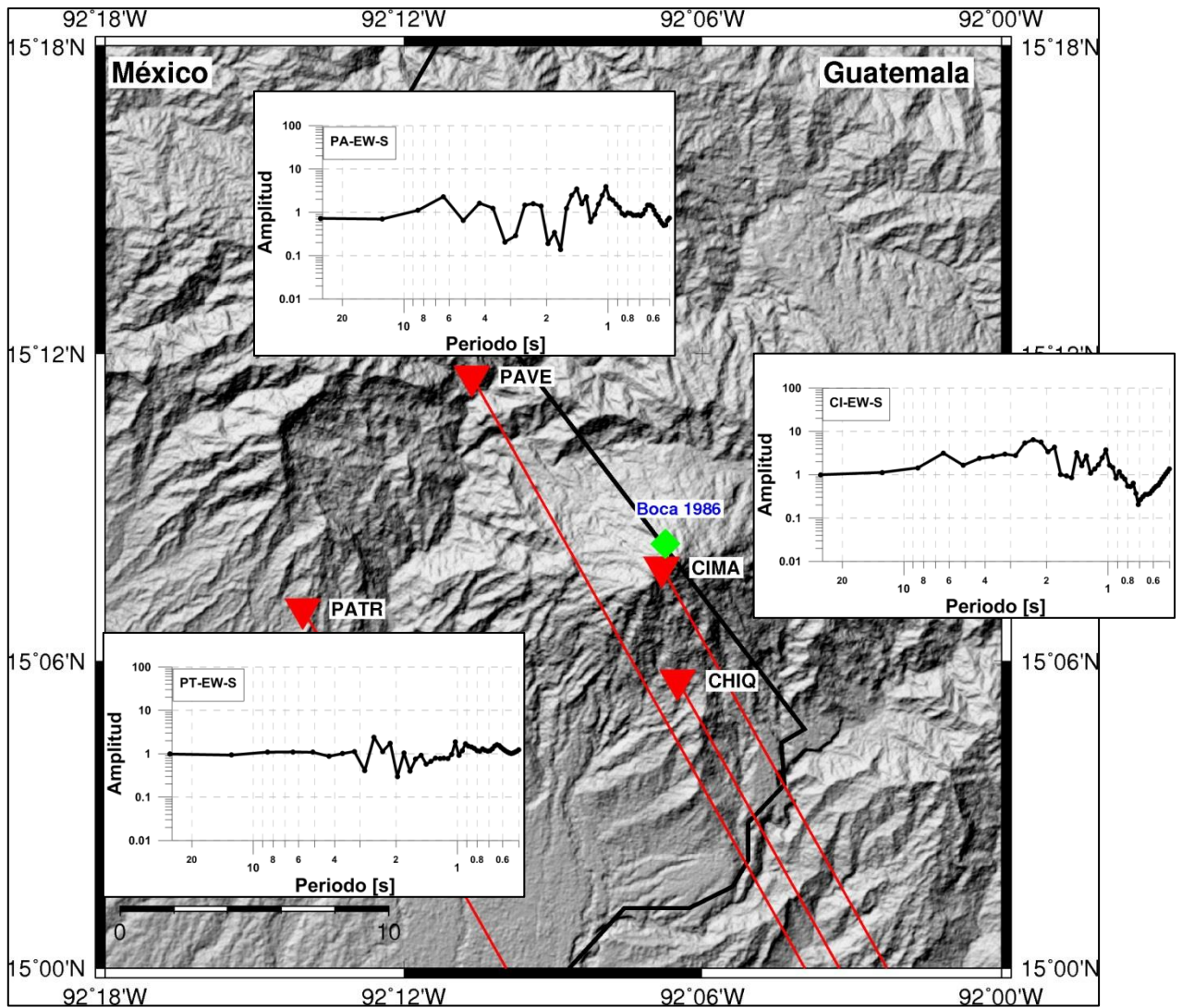


Figura 30. Cocientes espectrales para la fase S en la componente E-W, del sismo registrado el 28 de mayo del 2012 con epicentro en Santiago del Estero, Argentina, con  $M_w=6.7$ . La estación de referencia es CHIQ.



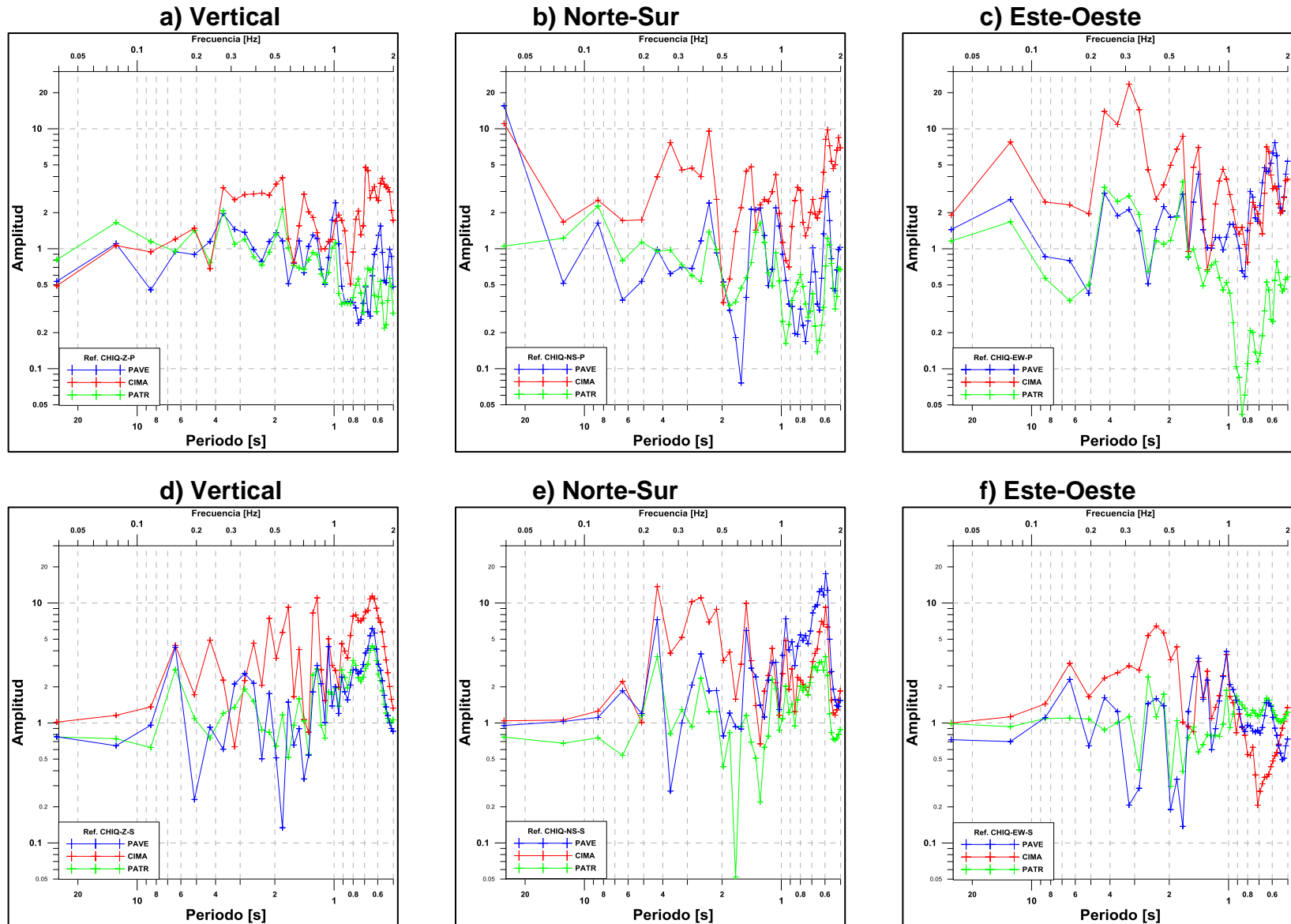


Figura 31. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 28 de mayo del 2012 con epicentro en Santiago del Estero, Argentina, Mw=6.7. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es CHIQ y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

El evento número siete proveniente de Honshu, Japón; registrado el 7 de diciembre de 2012, con magnitud  $M_w=7.3$ , profundidad de 31 km y distancia epicentral de 11,689 km. Arribo de azimut NW y estación de referencia PAVE (Figura 32). A partir de este evento ya no se cuenta con la estación CIMA, debido a que la estación fue vandalizada en Julio de 2012.

Para la onda P en la dirección vertical se tienen bajas amplitudes de 1 a 3 s en ambas estaciones (CHIQ y PATR). En la dirección N-S, para CHIQ entre 0.54 y 2.56 s; en el caso de la estación PATR la baja amplitud se observa entre 0.9 y 1.60 s (Figura 33). En la dirección E-W, para la estación PATR la baja amplitud se observa entre 0.8 y 1.35 s, para CHIQ entre 1 y 1.28 s, así como 1.71, 2.56 y 3.66 s.

Para la onda S, en la componente E-W, los picos de baja amplitud se observan alrededor de  $T=1$  s, para ambas estaciones (Figura 34), y en la estación CHIQ, además se tienen picos de baja amplitud en  $T=0.56$ ,  $T=1.71$  y  $T=3.66$  s. Para la componente N-S, en la estación PATR, la baja amplitud se observa de  $T=0.7$  a  $T=1.71$  s y en el caso de la estación CHIQ solo en  $T=1.71$  y  $T=1.98$  s (Figura 33).

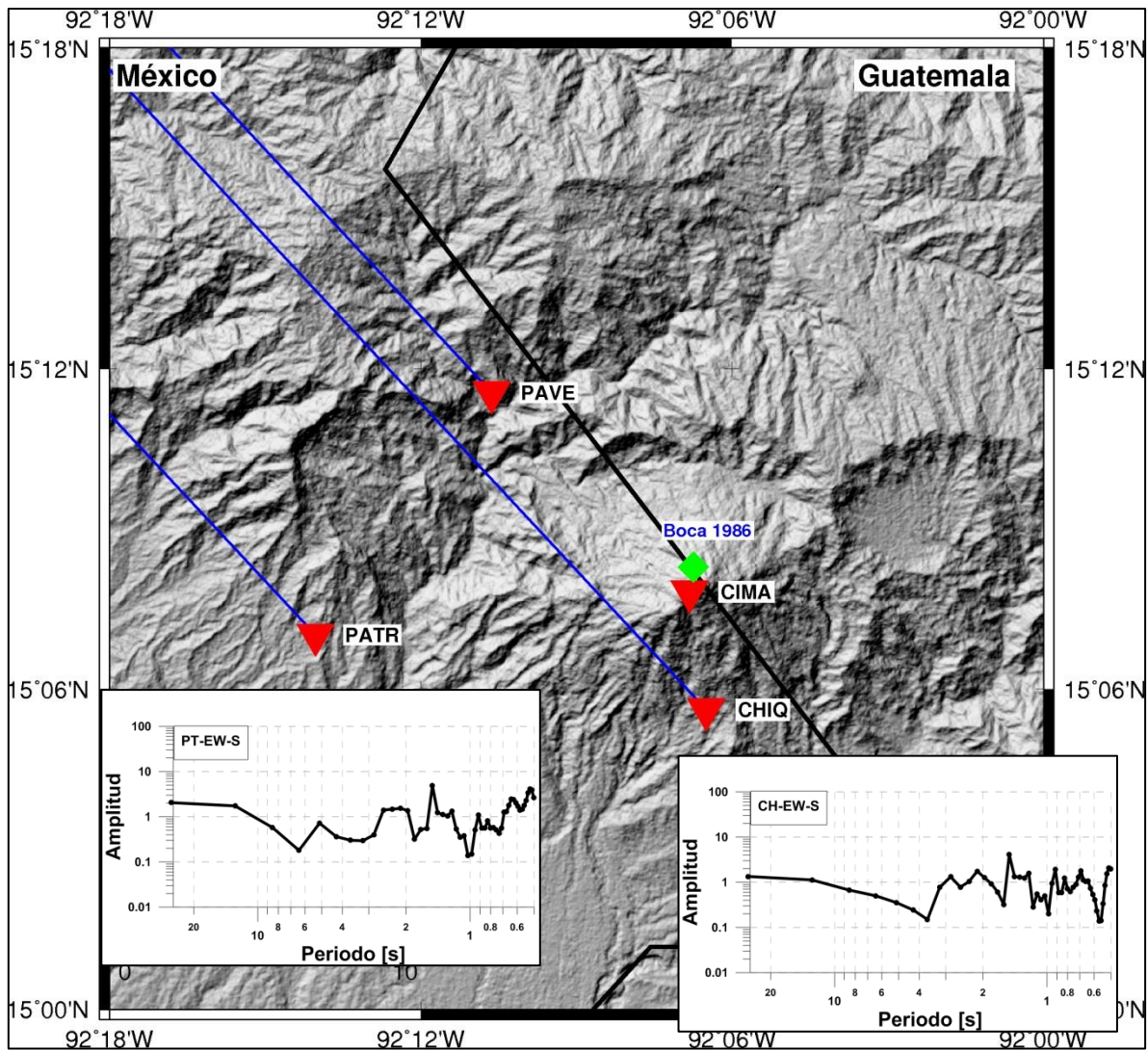


Figura 32. Cocientes espectrales para la fase S en la componente E-W, del sismo registrado el 7 de diciembre del 2012 con epicentro al este de Honshu, Japón con  $M_w=7.3$ . La estación de referencia es PAVE.

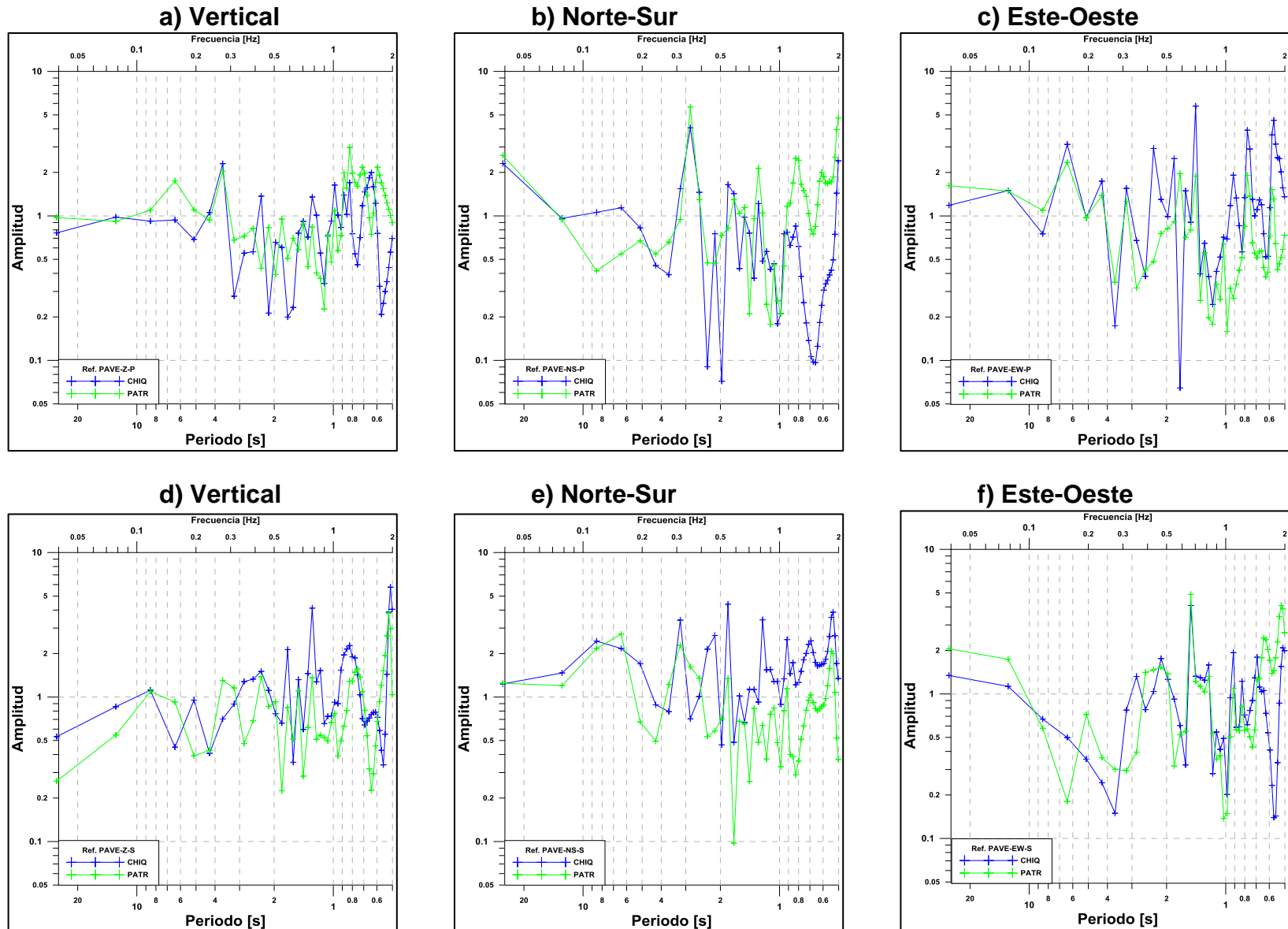


Figura 33. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 7 de diciembre del 2012 con epicentro al este de Honshu, Japón,  $M_w=7.3$ . Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e, y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

El evento número ocho registrado el 6 de febrero del 2013 proveniente de las Islas Salomón, magnitud  $M_w=8.0$ , profundidad de 24 km y a una distancia epicentral de 11,666 km (Figura 34). Su azimut de arribo SW y la estación de referencia es PATR, cabe señalar que es el único evento con este azimut.

Para la onda P en la componente vertical se observa baja amplitud entre 2 y 4 s en ambas estaciones (CHIQ y PAVE). En la componente N-S, entre  $T=0.5$  y 2 s se tiene baja amplitud. En la dirección E-W se observa un pico de baja amplitud en 2.13 s y de 3 a 4 s. Para la onda S en la componente E-W se observa baja amplitud de 1.5 a 3 s en la estación PAVE y de 1.5 a 2 s en CHIQ solo se observa un pico de baja amplitud, para ambas estaciones, en 2.13 s; en la componente vertical se tienen picos de baja amplitud entre 3 y 5 s (Figura 35).

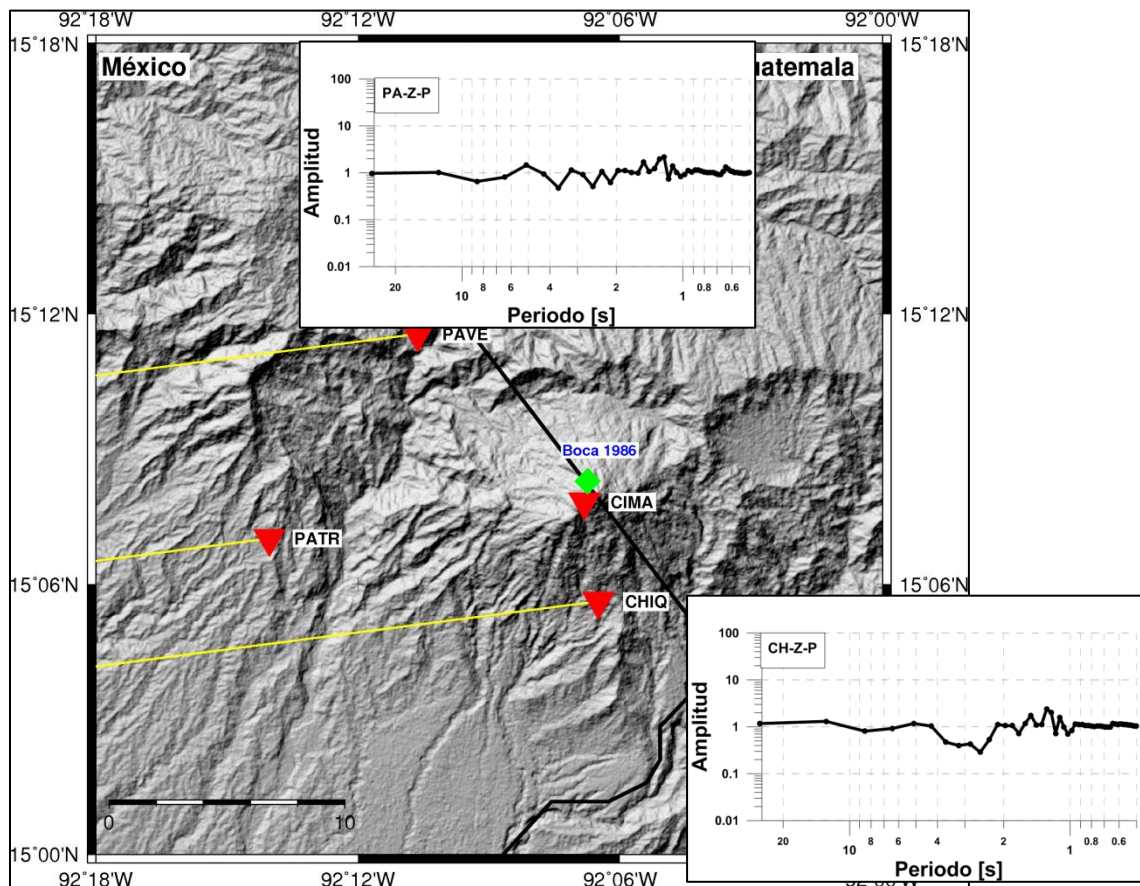


Figura 34. Cocientes espectrales para la fase P en la componente Z, del sismo registrado el 6 de febrero del 2013 con epicentro al oeste de las Islas Salomón y  $M_w=8.0$ . La estación de referencia es PATR.

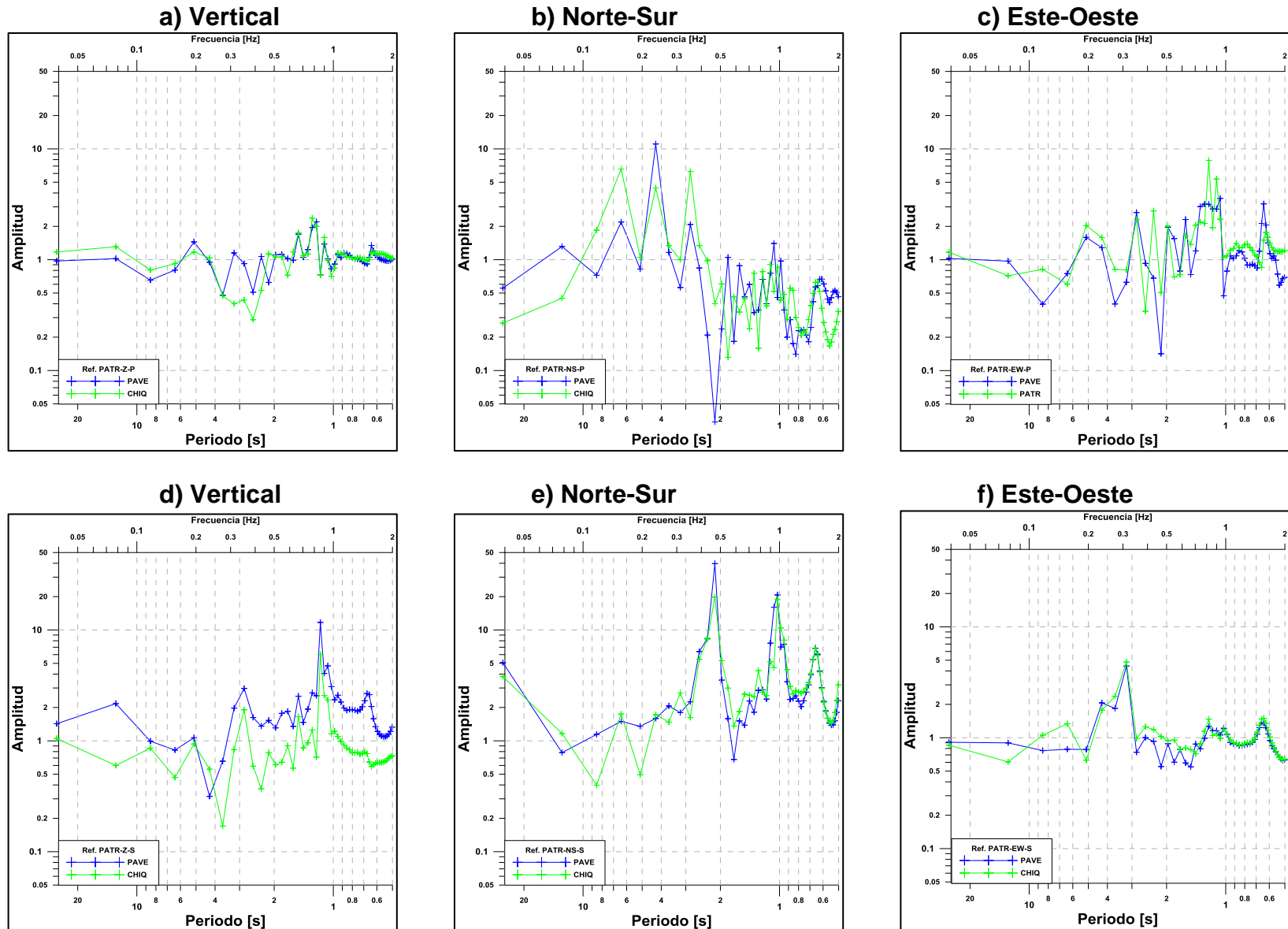


Figura 35. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 6 de febrero del 2013 con epicentro al oeste de las Islas Salomón, Mw=8.0. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e, y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PATR y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

El evento número nueve con epicentro al norte de Yacuanquer, Colombia, magnitud  $M_w=6.9$ , profundidad de 145 km y distancia epicentral de 2244 km. Su azimut de arribo es SE y la estación de referencia es CHIQ (Figura 36).

Para la fase P, en la componente vertical, se observan bajas amplitudes de  $T=0.5$  a  $T=2$  s en la estación PATR y de  $T=1$  a  $T=2$  s en CHIQ, además de un pico de baja amplitud en  $T=3.56$  s. En la componente N-S, de  $T=0.5$  a  $T=3$  s se observa baja amplitud en la estación PATR, excepto para el periodo de 1.25 s. En cambio, en la estación PAVE se tienen picos de baja amplitud en 0.5, 0.9, 2 y 5.12 s. En la componente E-W, PATR presenta el mismo comportamiento que en la componente N-S y PAVE presenta picos de baja amplitud en 1.60 y 6.40 s (Figura 37).

Para la fase S se observa que el resultado de la división espectral, para la componente vertical, se tienen picos de baja amplitud entre 1 y 5 s en la estación PATR; en 0.67 y 5.12 s en PAVE. Para la componente N-S, presenta picos entre 2 y 3 s, en ambas estaciones y en 5.12 solo para PAVE. En la dirección E-W, en PATR se presentan bajas amplitudes entre 0.5 y 2 s, así como entre 3 y 4 s. Para PAVE se tienen picos en 0.6, 2.33 y alrededor de los 3 s (Figura 37).

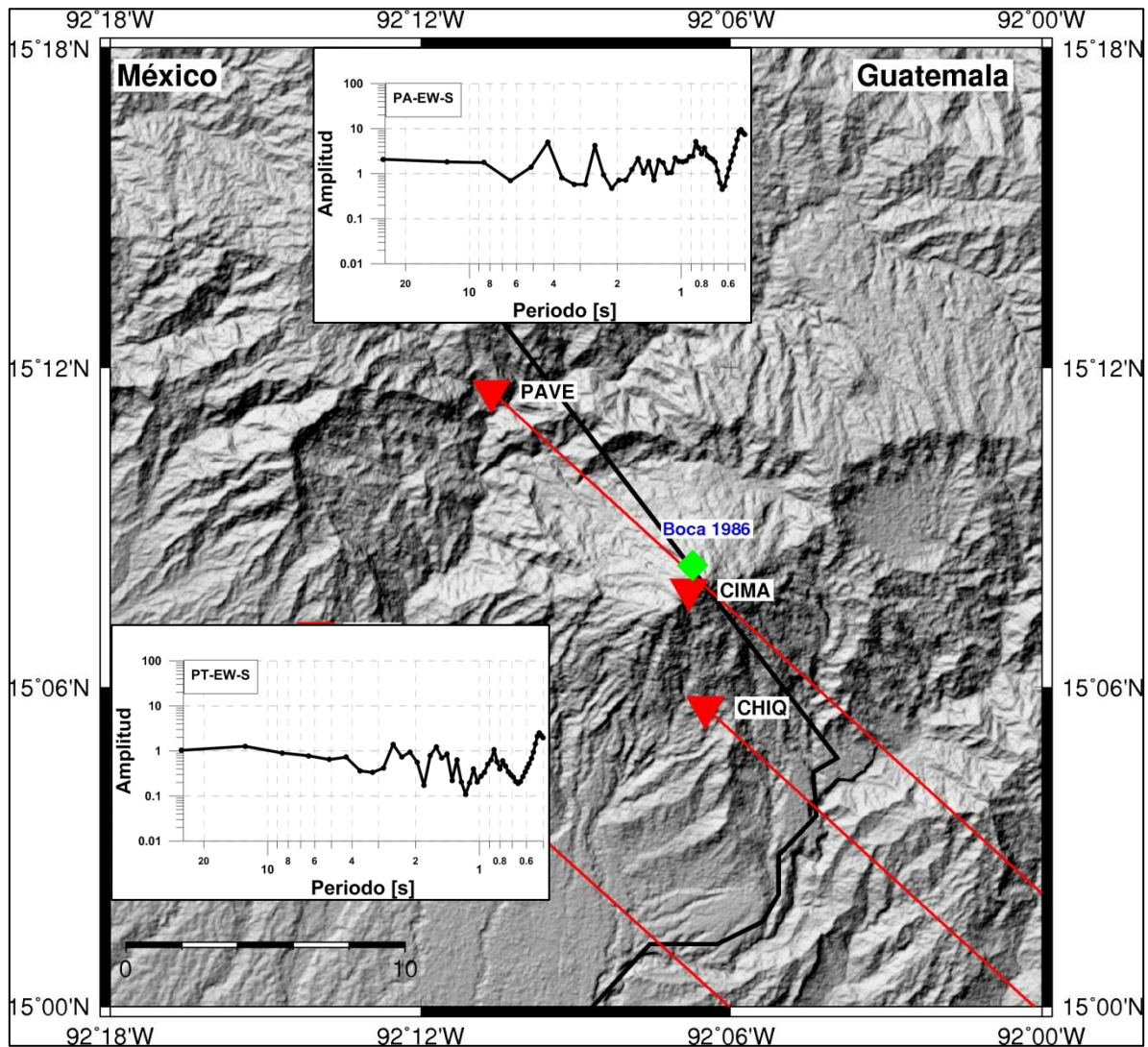


Figura 36. Cocientes espectrales para la fase S en la componente E-W, del sismo registrado el 9 de febrero del 2013 con epicentro al norte de Yancuaquer, Colombia y  $M_w=6.9$ . La estación de referencia es CHIQ.



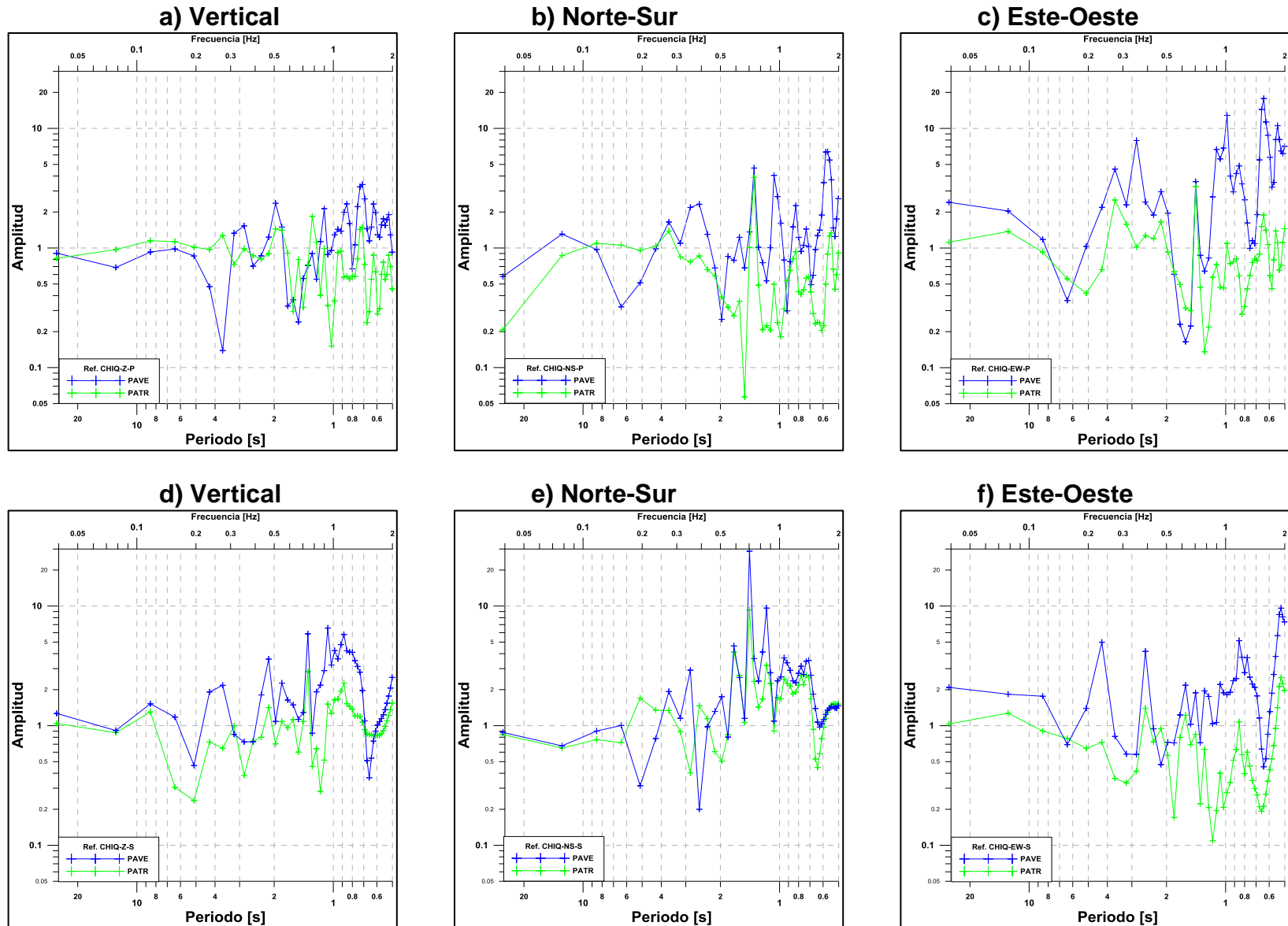


Figura 37. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 9 de febrero del 2013 con epicentro al norte de Yancuaquer, Colombia,  $M_w=6.9$ . Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es CHIQ y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

El evento número 10 registrado el 16 de abril del 2013 con epicentro en al este de Khash, Irán; magnitud  $M_w=7.7$ , profundidad de 80 km y distancia epicentral de 14,447 km; azimut de arribo NE y estación de referencia PAVE (Figura 38).

Para la fase P en la componente vertical se observa un pico de baja amplitud, para ambas estaciones (CHIQ y PATR), alrededor de  $T=1$  s, así como en 1.16, 2.13 y 3.66 para CHIQ; para PATR entre 0.65 y 1.51 s se observa baja amplitud. En la componente N-S, se tiene que hay baja amplitud entre 1 y 2 s, en ambas estaciones y PATR también presenta baja amplitud entre 0.5 y 1 s. Para la componente E-W, se tiene baja amplitud entre 0.8 y 2.56 s, excepto en  $T=1.51$  s (Figura 39).

En el caso de la onda S, para la componente vertical PATR presenta baja amplitud desde los 0.5 s hasta los 20 s y CHIQ a partir de 1.6 s hasta 10 s. En la componente N-S, se tiene baja amplitud de 0.6 a 1.6 s y de 2 a 10 s para la estación PATR. En cuanto a la estación CHIQ tiene picos de baja amplitud en 1.16, 1.6 y alrededor de los 2 s. Para la dirección E-W, se observa baja amplitud, en ambas estaciones, alrededor de 0.8, 1.28, 2.33 y de 3 a 5 s (Figura 39).

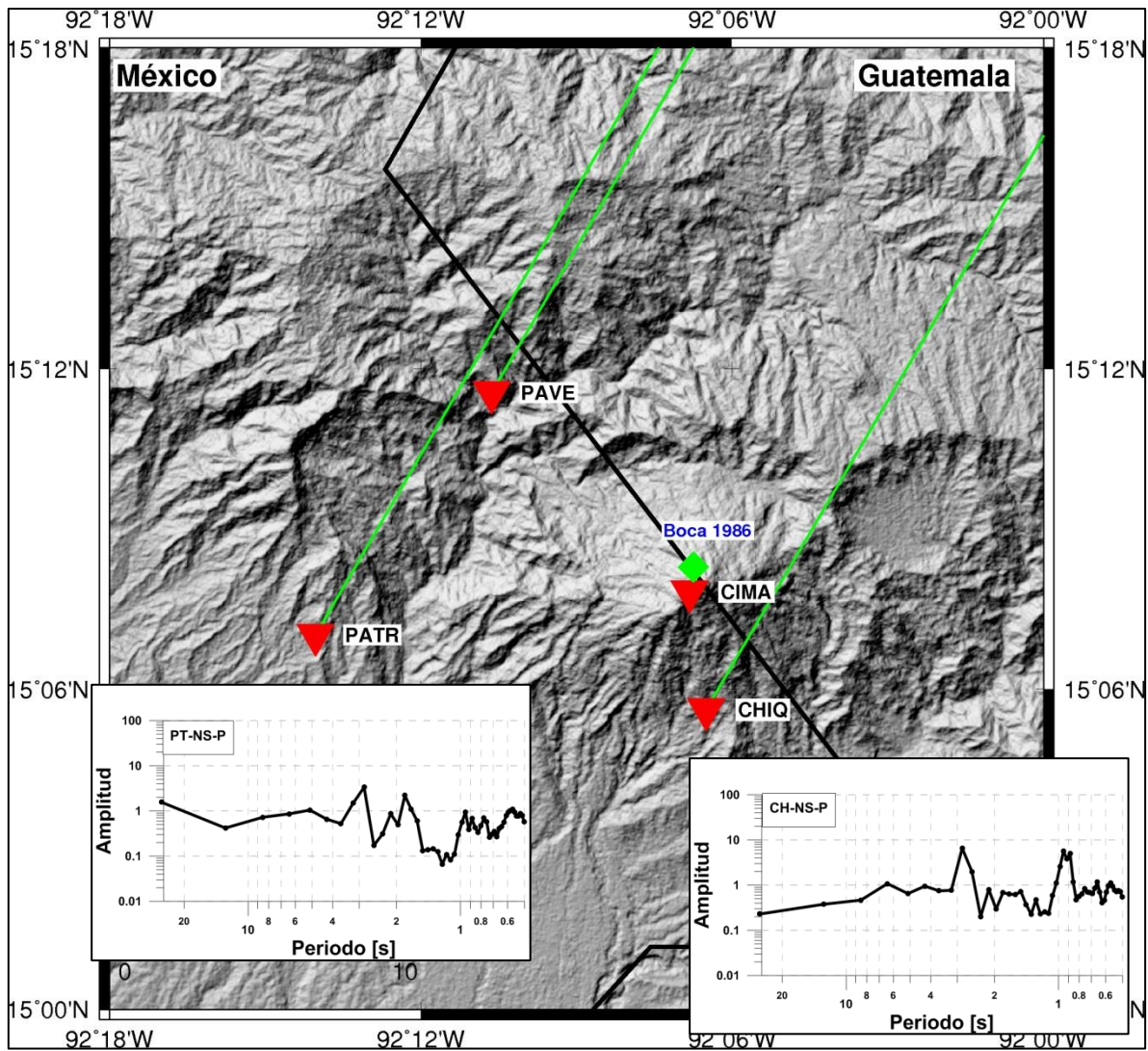


Figura 38. Cocientes espectrales para la fase P en la componente N-S, del sismo registrado el 16 de abril del 2013 con epicentro al este de Khash, Irán,  $M_w=7.3$ . La estación de referencia es PAVE.

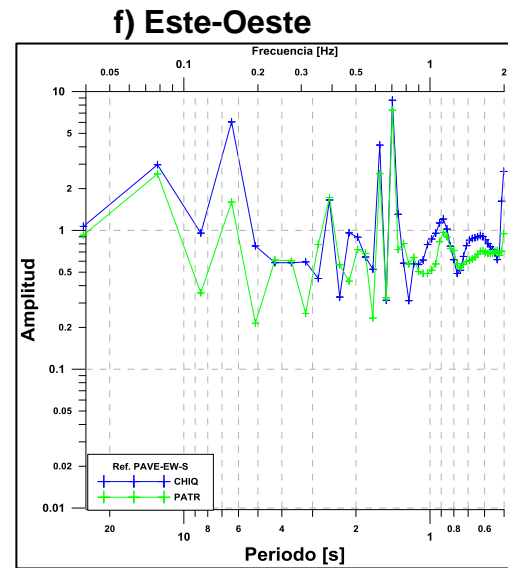
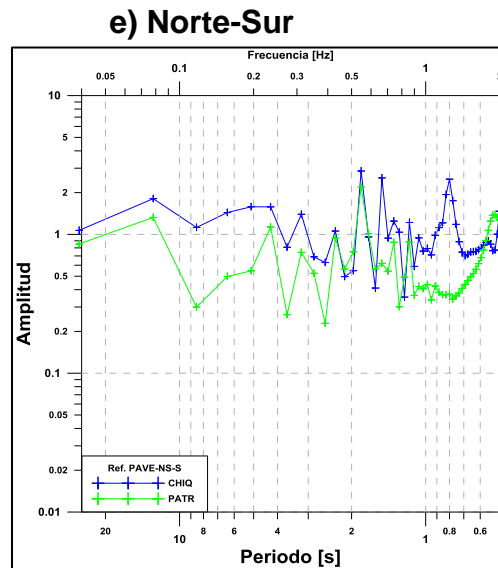
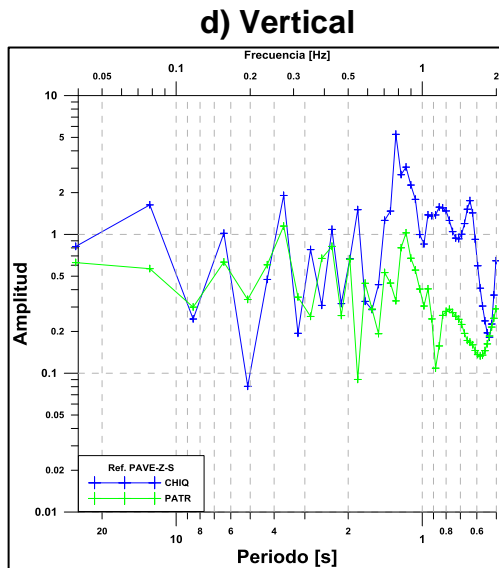
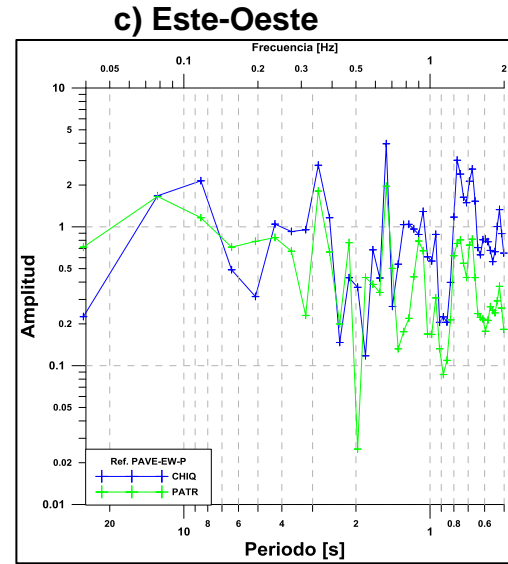
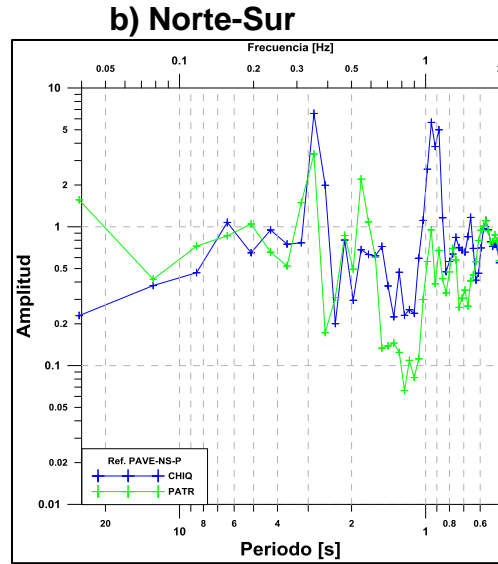
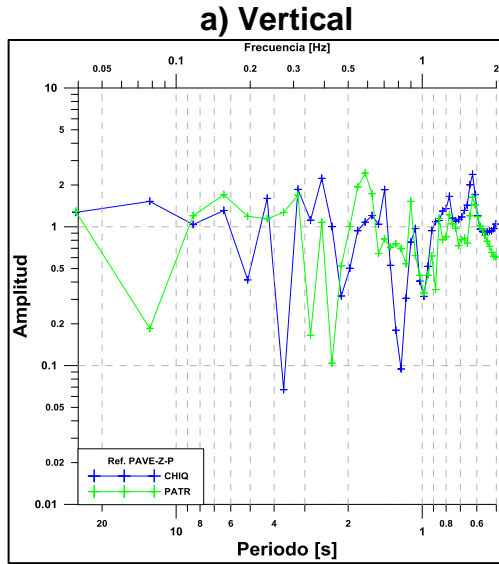


Figura 39. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 16 de abril del 2013 con epicentro al este de Khash, Irán, Mw=7.7. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

El evento número 11, registrado el 9 de enero del 2014 con epicentro al noroeste de Corralillo, Cuba,  $M_w=5.0$ , profundidad de 10 km y distancia epicentral de 1,511 km. Azimut de arribo NE y estación de referencia PAVE (Figura 40).

Para la fase P en la componente vertical, la estación PATR presenta baja amplitud desde los 0.6 s hasta los 2 s, CHIQ de 0.9 a los 2 s, además entre 2 y 5 s. En la componente N-S, para ambas estaciones se observa baja amplitud entre 0.5 y 1.71 s, y en CHIQ también en 2.13, 4.27 y 8.33 s. Finalmente en la componente E-W, se tienen baja amplitud de 0.5 a 2.13 s, en ambas estaciones, y de 3 a 5 s, solo para PATR (Figura 40).

Para fase S en la componente vertical, se observan picos de baja amplitud en 1, 1.60, 2.33, 3.66 y 5.12 s para la estación CHIQ, y de 0.75 a 1.22 s y de 3 a 6 s para la estación PATR. En la componente N-S, PATR presenta baja amplitud entre 0.5 y 2 s, y CHIQ entre 0.6 y 1.22 s. Para la componente E-W, la baja amplitud se observa desde 0.5 hasta los 4 s en la estación PATR; para la estación CHIQ se tienen bajas amplitudes entre 0.5 y 1 s, además en 3.66, 5.12 y 8.33 s (Figura 41).

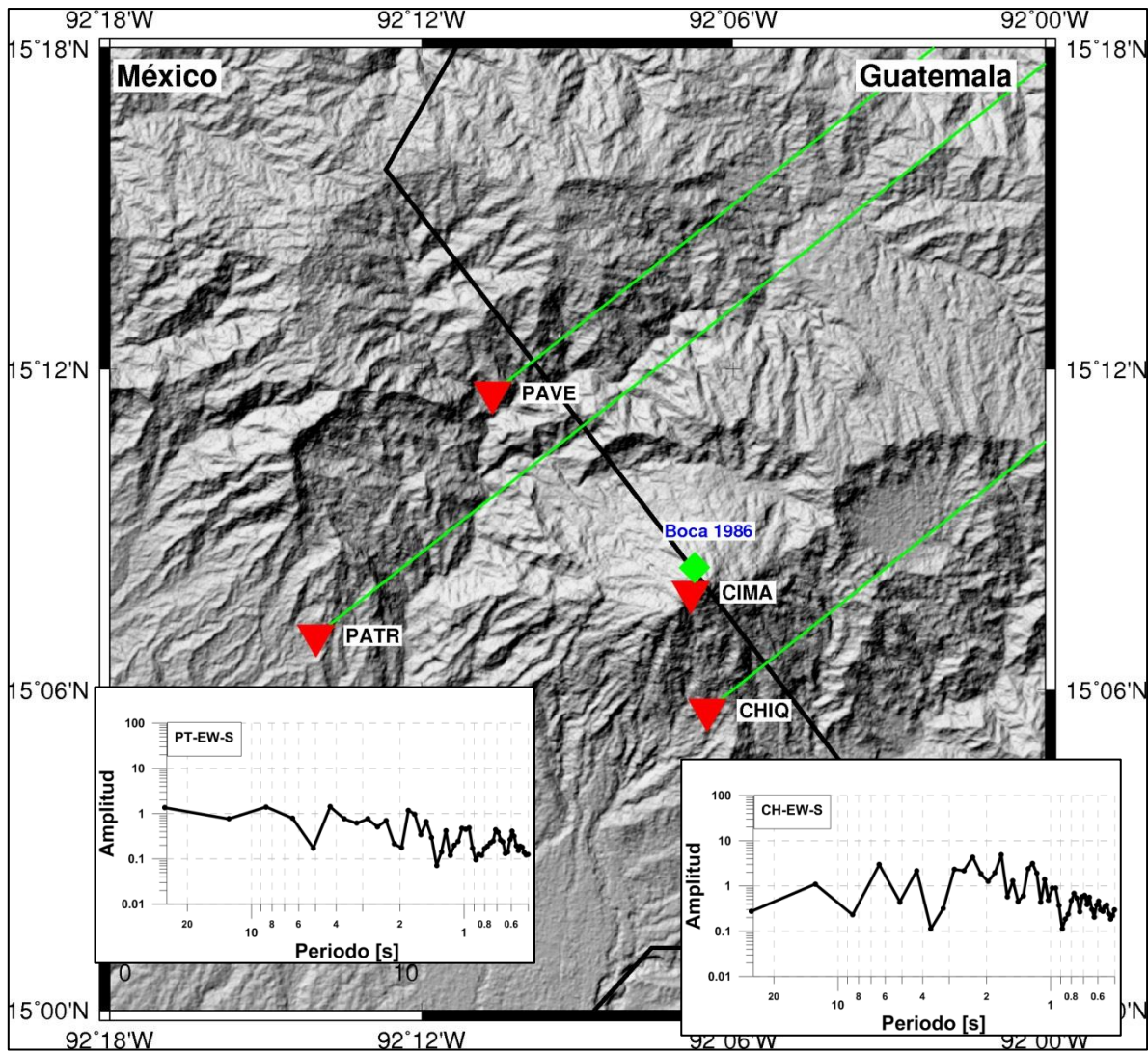


Figura 40. Cocientes espectrales para la fase S en la componente E-W, del sismo registrado el 09 de enero del 2014 con epicentro al noroeste de Corralillo, Cuba,  $M_w=5.0$ . La estación de referencia es PAVE.

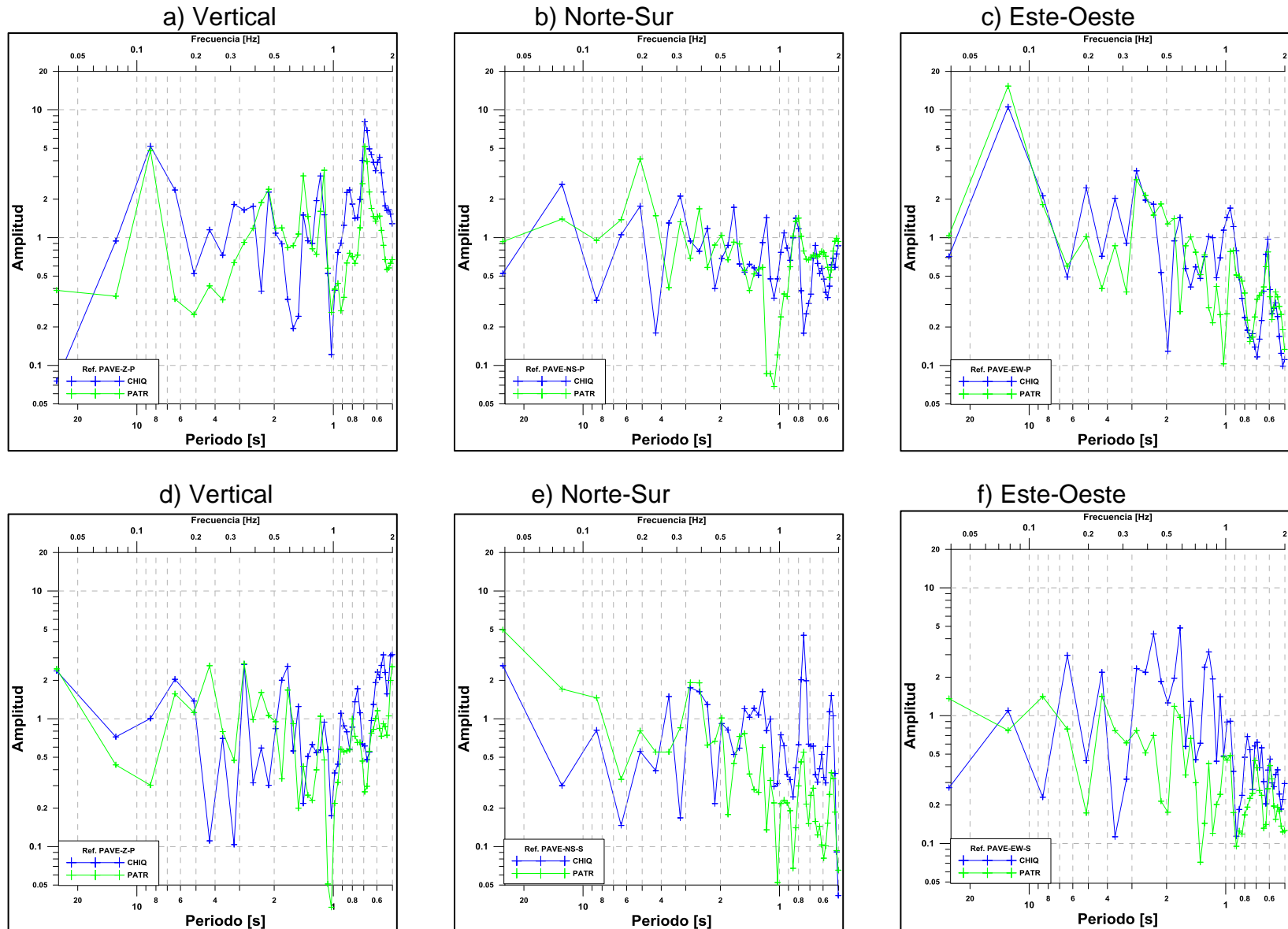


Figura 41. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 9 de enero del 2014 con epicentro al noroeste de Corralillo, Cuba,  $M_w=5.0$ . Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e, y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es PAVE y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

Y finalmente el evento número 12 registrado el 13 de enero de 2014, con epicentro al norte de Hatillo, Puerto Rico, magnitud  $M_w=6.4$ , profundidad de 20 km y distancia epicentral de 2,722 km. Azimut de arribo NE y estación de referencia CHIQ (Figura 42).

Para la fase P en la componente vertical se observan picos de baja amplitud alrededor de 0.8 y 2.13 s para la estación PATR. En la dirección N-S, presenta baja amplitud de 0.5 a 1 s, además picos de baja amplitud entre 1.11 y 1.60 s, en ambas estaciones, así como entre 4 y 6.40 s. Para la componente E-W en PATR se observa baja amplitud de 0.5 a 4 s, excepto para  $T=1.35$  s; PAVE presenta picos de baja amplitud en 1.28, 1.51, 1.60, 2.56, 2.84, 5.12 y 6.40 s (Figura 43).

Para la fase S, en la componente N-S, se observa baja amplitud entre 1 y 3 s, así como en 0.7 y 5.12 s de la estación PATR y para la estación PAVE los picos de baja amplitud se presentan alrededor de 0.6, 1, 1.71, 2.56 y 5.12 s (Figura 42 y Figura 43).



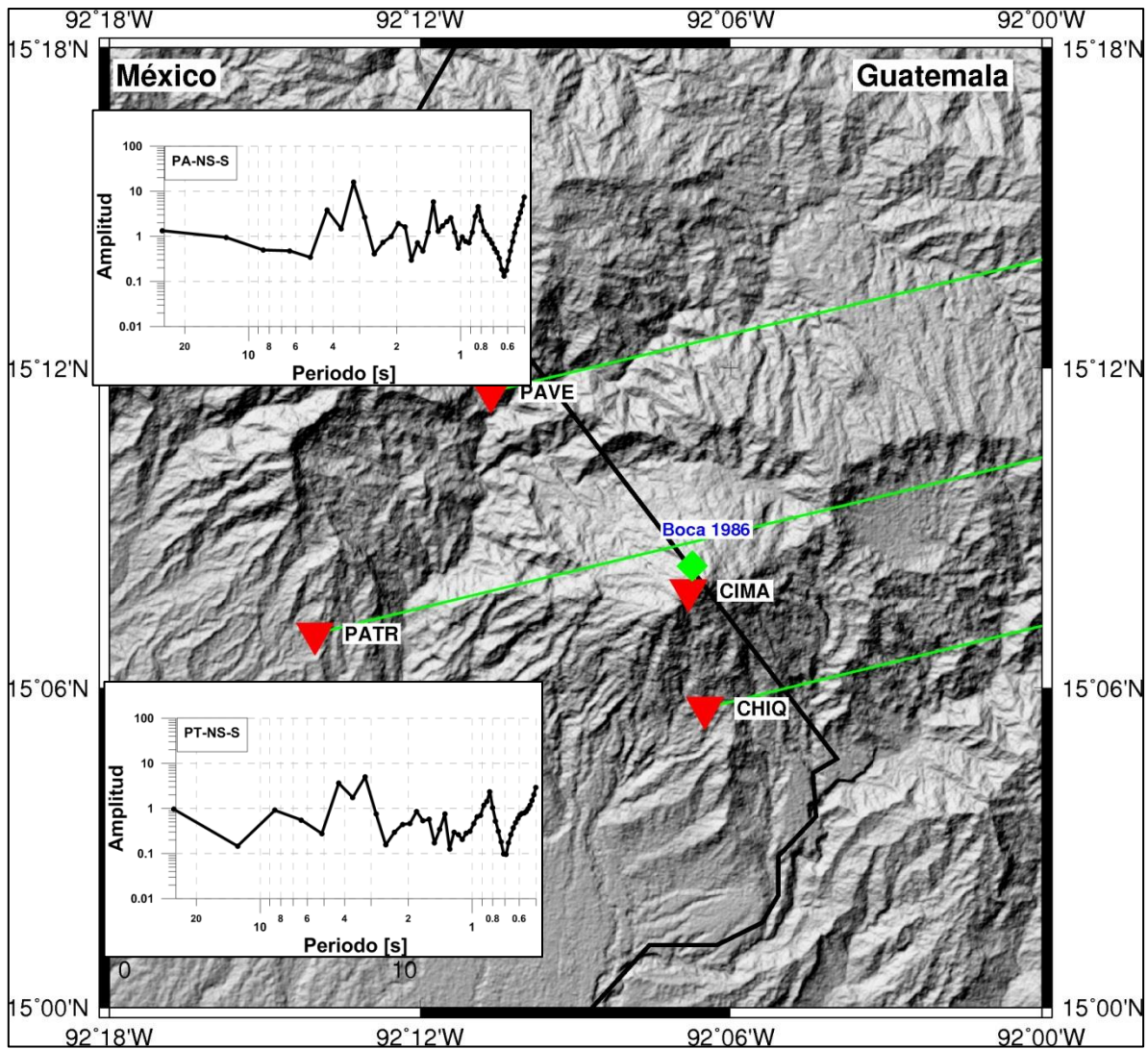


Figura 42. Cocientes espectrales para la fase S en la componente N-S, del sismo registrado el 13 de enero del 2014 con epicentro al norte de Hatillo, Puerto Rico,  $M_w=6.4$ . La estación de referencia es CHIQ.

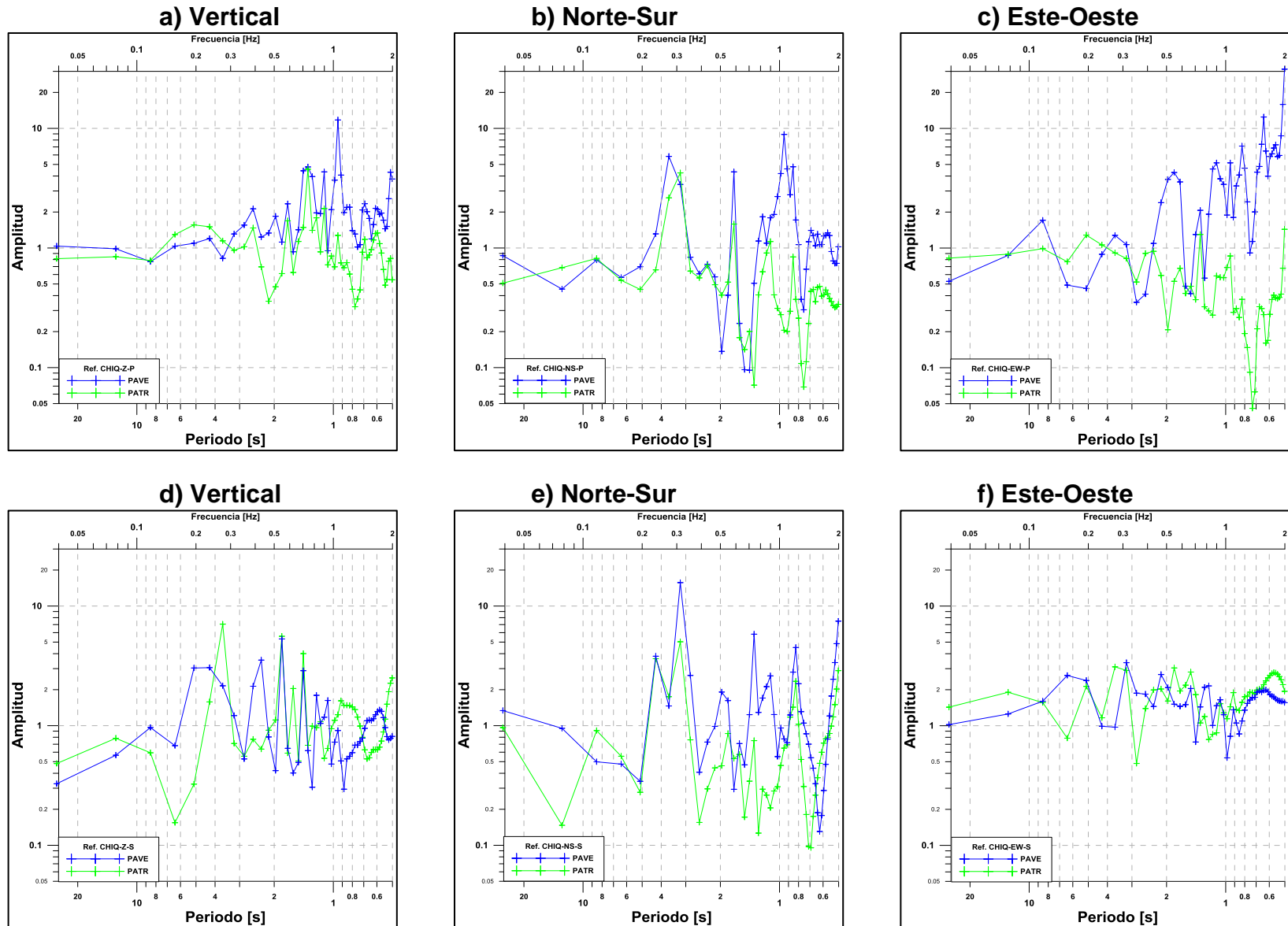


Figura 43. Cocientes espectrales para el sismo registrado el 13 de enero del 2014 con epicentro al norte de Hatillo, Puerto Rico,  $M_w=6.4$ . Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes para la fase P; las figuras d, e, y f, son los cocientes espectrales para la fase S. La estación de referencia es CHIQ y los colores corresponden con la estación que divide a la estación de referencia.

## IV.2 Discusión

La técnica de cocientes espectrales ha sido empleada para definir zonas de atenuación en diferentes volcanes; Sudo (1991) aplica este método para la Caldera Aso y encuentra zonas de atenuación entre los 6 y 15 km de profundidad; Ryall & Ryall (1981) utilizan la técnica para definir la atenuación de las ondas P y S en Long Valley Caldera en California; González-Pomposo (2004) utilizó esta técnica y encontró una zona de atenuación en el flanco noreste del volcán Popocatepetl; el cual fue corroborado por Berger, usando tomografía sísmica (2010).

Se analizaron las gráficas de los cocientes espectrales de los 12 eventos telesísmicos por estación y componente para determinar las trayectorias que presentan amplitudes bajas o la mayor atenuación; tomado en cuenta que 1 representa 0% de atenuación y 0 corresponde al 100% de atenuación. Para calcular el porcentaje de atenuación se tomó en consideración que si tenemos un valor de amplitud de 5 o 20 unidades, el porcentaje de amplificación correspondiente sería del 5% o 20 %; por el contrario, en el caso de valores entre 1 y 0, por cada décima del valor de amplitud se tiene una décima del porcentaje de atenuación, es decir, para un valor de amplitud de 0.99 unidades, el porcentaje de atenuación es de 0.1, para una amplitud de 0.51 unidades, el porcentaje de atenuación correspondiente es 4.9, y así sucesivamente.

Se consideraron como trayectorias atenuantes sólo aquellas cuyos cocientes tuvieran una amplitud por debajo 0.5 unidades, es decir con una atenuación de más del 5%. Además se calculó la media y desviación estándar, por evento y trayectoria de arribo, con la finalidad de determinar el valor promedio máximo de atenuación para cada trayectoria y fase (P y S).

De las trayectorias registradas por la estación CHIQ, la trayectoria NW presenta las mayores atenuaciones (Figura 44). Para la onda P en la componente Z, el valor máximo de atenuación es de 7%, entre los periodos de 0.5 a 4.27 s; en el caso de la onda S, la mayor atenuación se observa en la componente E-W, para 2 de los

sismos, Indonesia y Oregón (Figura 44), el promedio de atenuación es de 6.7% entre los periodos de 0.5 a 4.27 s.

En el caso de la trayectoria NE, para la fase P en la componente Z, entre los periodos de 1 a 2.33 s se tienen, en promedio, 6% de atenuación para el sismo proveniente de Cuba. En cuanto a las onda S en la componente E-W, se tiene en promedio 6.5% de atenuación entre los periodos de 0.5 a 2 s (Figura 45).

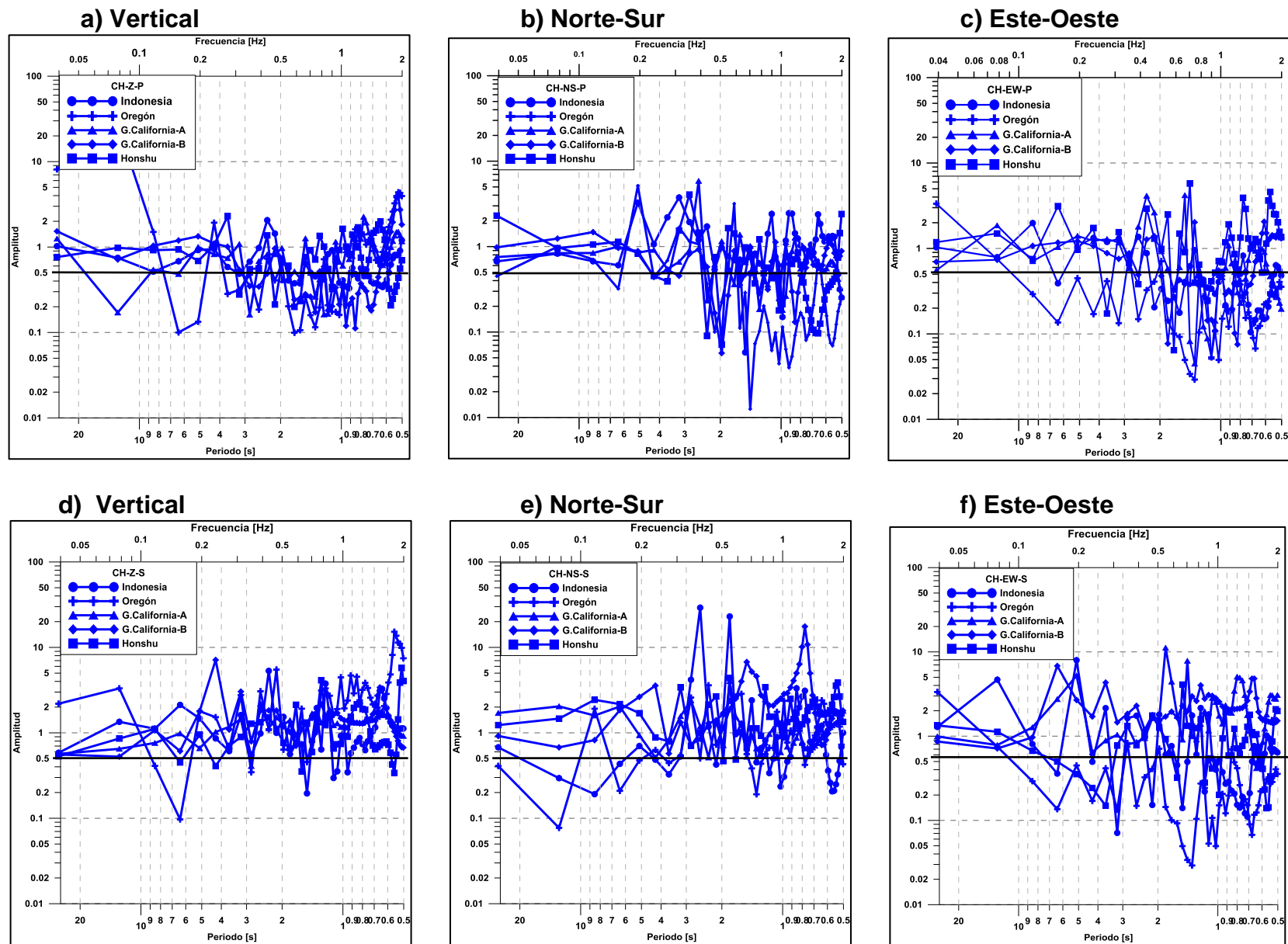


Figura 44. Cocientes espectrales en la estación CHIQ para los eventos con trayectoria de arribo NW. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes espectrales para la onda P; las figuras d, e y f son los cocientes espectrales para la onda S. Los símbolos representan la región epicentral de acuerdo al azimut. La línea negra se toma como referencia para determinar los eventos con más del 5 % de atenuación

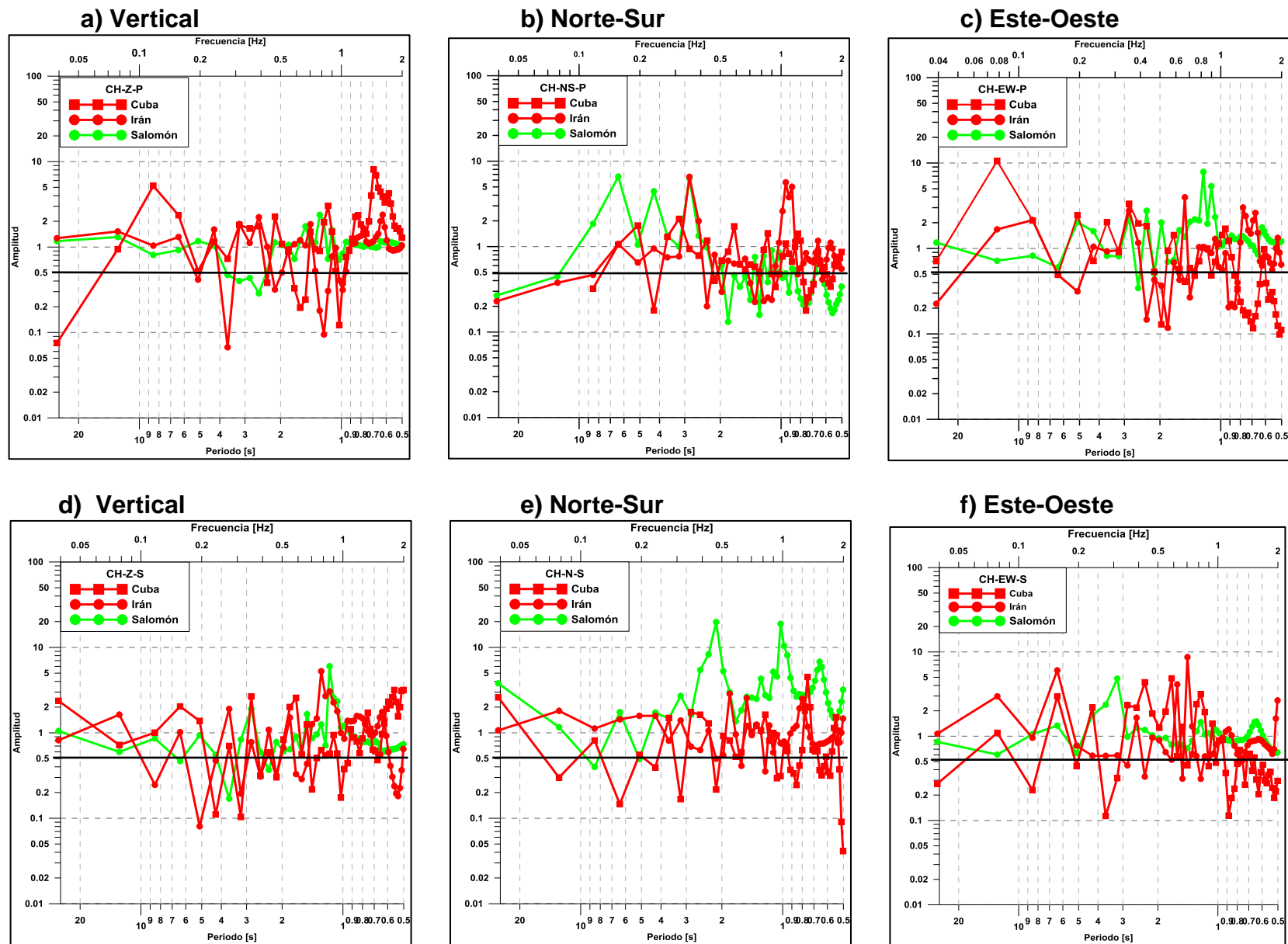


Figura 45. Cocientes espectrales en la estación CHIQ para los eventos con trayectoria de arribo NE (rojo) y SW (verde). Las figuras a, b y c, son los cocientes espectrales para la onda P y las figuras d, e y f son los cocientes para la onda S. Los símbolos representan la región epicentral de acuerdo al azimuth. La línea negra se toma como referencia para determinar los eventos con más del 5 % de atenuación.

En la estación PATR las trayectorias que presentan mayor atenuación son las que tienen azimut de arribo NW y SE. Para la onda P, en la componente vertical y trayectoria de arribo NW se tiene en promedio 3% de atenuación entre los periodos de  $T=0.5$  a  $T=2.33$  s (Figura 46). En el caso de la onda S y con la misma trayectoria, en la componente N-S se tiene atenuación promedio del 6% entre 0.7 y 2.84 s (Figura 46).

Para la trayectoria SE y fase P, en la componente Z se tiene, en promedio, 6.3% de atenuación para los periodos de 0.5 a 2.13 s (Figura 47). En lo que respecta a la fase S, la trayectoria NE, presentó mayor atenuación con respecto a la trayectoria SE, en la componente N-S se tiene en promedio 5.4% para los periodos de 0.5 a 1.71 s (Figura 47).

La estación CIMA presenta atenuación para la onda P en la componente Z, para los eventos con azimut NW y es del 6.6% entre los periodos de 0.51 a 1.71 s, excepto para el sismo proveniente del Golfo de California con magnitud 7. Para la fase S, no se observa atenuación en ninguna de las trayectorias, de acuerdo a los criterios antes mencionados (Figura 48).

Las amplificaciones observadas en la estación CIMA, para los cocientes espectrales con respecto de la estación CHIQ, se deben a que las amplitudes de los espectros de la estación CHIQ son menores con respecto a los espectros de CIMA, por lo que al momento de hacer la división espectral se obtiene un valor de amplificación.

De acuerdo a este análisis la mayor atenuación se encuentra en las estaciones Chiquihuites (CHIQU) y La Patria (PATR) mismas que se localizan en la parte S-SW del volcán y para las trayectorias NW y SE, en promedio se tiene atenuación de un 5.78% para la fase P y de 6.15% para la fase S.

También se obtuvieron trayectorias que no pasaban por la estructura del volcán y al momento de hacer la división espectral arrojaban valores de atenuación, en general los valores de atenuación no pasaban del 5%, en comparación con aquellas trayectorias que atravesaron el volcán y se obtuvieron valores de atenuación mayor al 5%. Las trayectorias que atravesaron la estructura volcánica y en las que se observó la mayor atenuación, fueron las de azimut SE y NW.

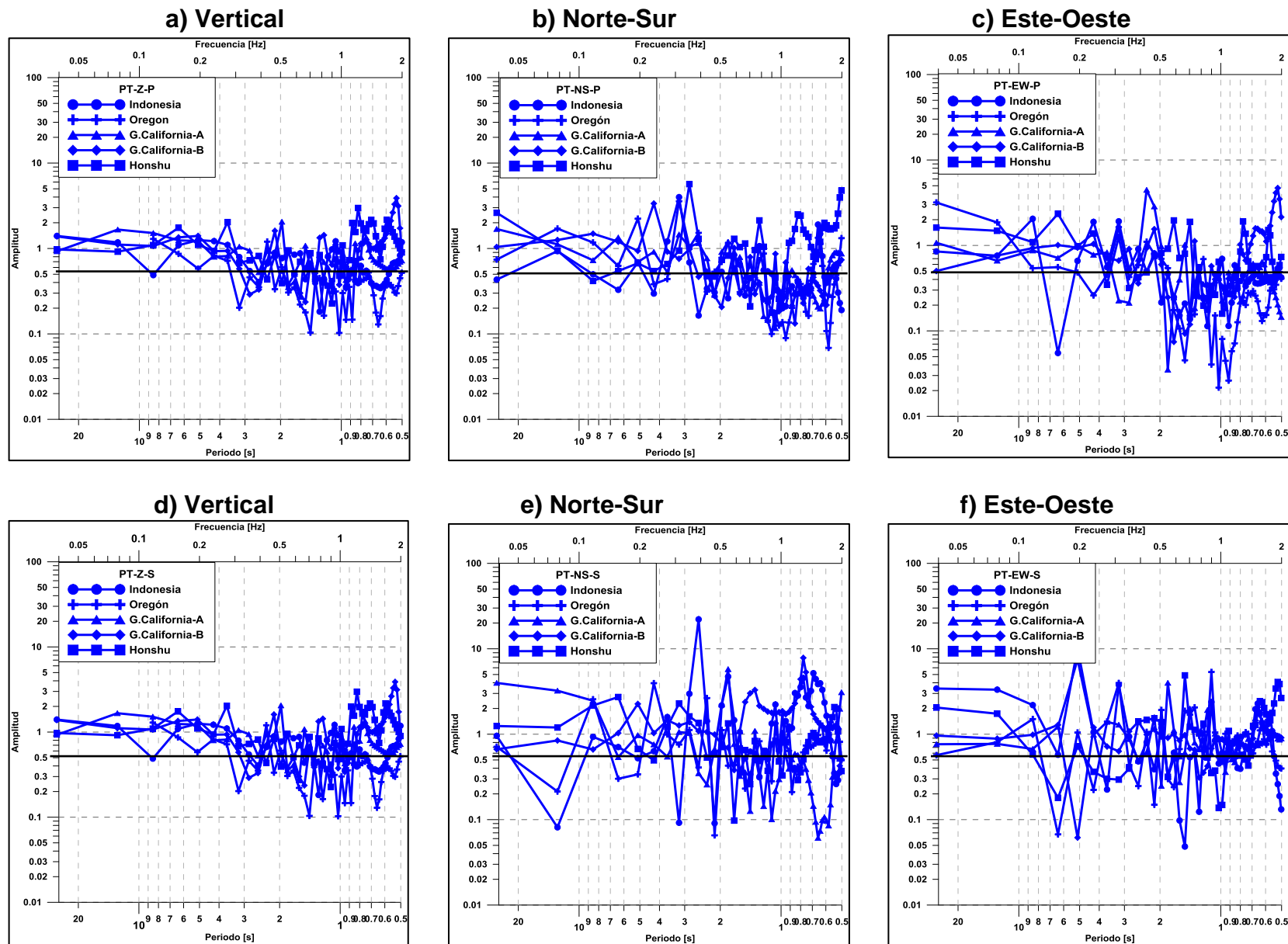


Figura 46. Cocientes espectrales en la estación PATR para los eventos con azimut NW. Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes espectrales para la onda P; las figuras d, e y f son los cocientes espectrales para la onda S; los símbolos representan la región epicentral de acuerdo al azimut. La línea negra se toma como referencia para determinar los eventos con más del 5% de atenuación



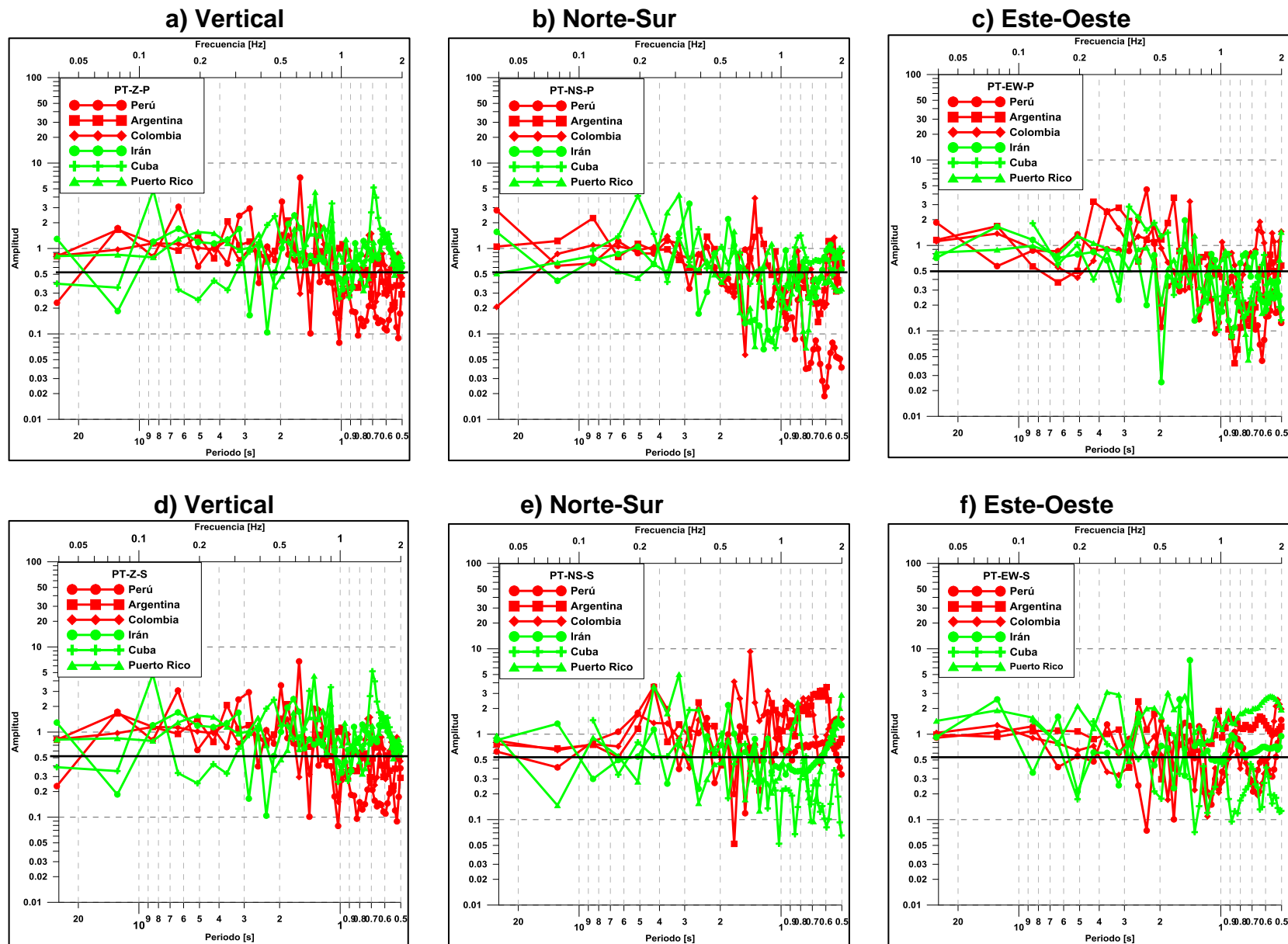


Figura 47. Cocientes espectrales en la estación PART para los eventos con trayectoria de arribo NE (verdes) y SE (rojos). Las figuras a, b y c, son los cocientes espectrales para la onda P y las figuras d, e y f son los cocientes para la onda S. Los símbolos representan la región epicentral de acuerdo al azimut. La línea negra se toma como referencia para determinar los eventos con más del 5% de atenuación

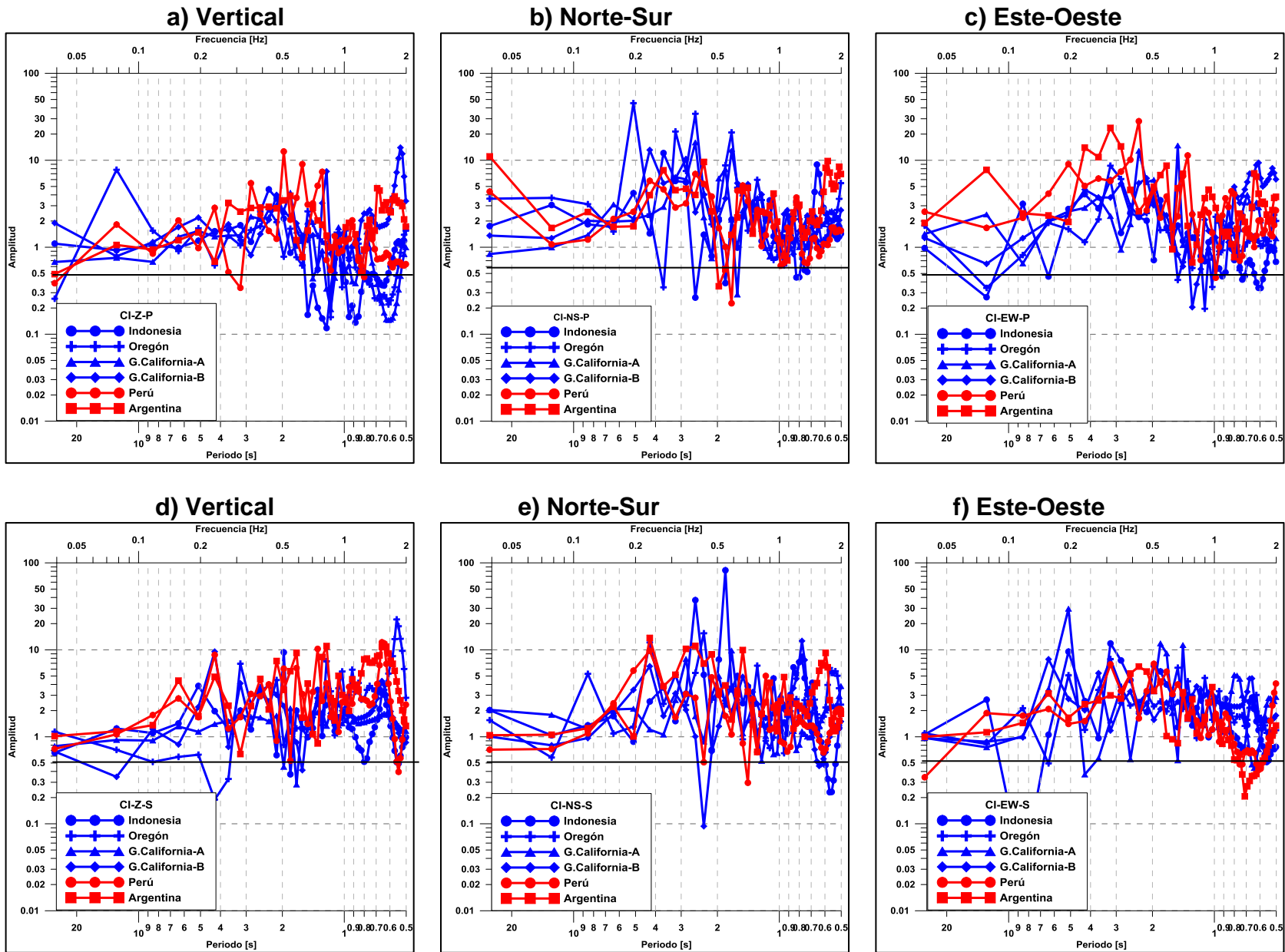


Figura 48. Cocientes espectrales en la estación CIMA para los eventos con trayectorias de arribo NW (azul) y SE (rojo). Las figuras a, b y c, corresponden a los cocientes espectrales para la onda P; las figuras d, e y f son los cocientes espectrales para la onda S; los símbolos representan la región epicentral de acuerdo al azimut. La línea negra se toma como referencia para determinar los eventos con más del 5 % de atenuación

#### **IV.2.1 Sismicidad local**

Los sismos volcanotectónicos (VTs) son eventos que se presentan con frecuencia en volcanes activos y en reposo. Este tipo de eventos suelen ser precursores de erupciones volcánicas importantes debido a que el estado de esfuerzos es modificado por intrusiones magmáticas. Este comportamiento se ha observado en volcanes como el volcán Chichonal en Chiapas (De La Cruz-Reyna et al., 1989), el Popocatepetl (CENAPRED, 2012), y volcán Fuego de Colima (Zobin et al., 2007). En el volcán Tacaná, como se mencionó en el capítulo I, los sismos volcanotectónicos precedieron a las explosiones freáticas de 1949 y 1986.

La sismicidad volcanotectónica generalmente ocurre en los alrededores de los conductos magmáticos (Nishimura & Iguchi, 2011; Iguchi, 1994) por lo que consideramos que las zonas con ausencia de sismicidad, podrían consistir en zonas de mayor temperatura debido a la presencia de material magmático.

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), a partir de 2015 revisa y analiza la sismicidad registrada por la red de estaciones y ésta se reporta en un informe anual. Así mismo, la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) en noviembre de 2013 emitió un reporte sobre la actividad sísmica del volcán que básicamente consistió de 59 sismos volcanotectónicos con magnitudes entre 1.5 y 3.6 (Figura 49). Para el 2015, el CENAPRED, localizó 156 eventos con magnitudes entre 0.7 y 2.2 ubicados al noreste y sur del volcán y en 2016 localizó 96 eventos con magnitud entre 0.5 y 1.7, ubicados al sur-suroeste del volcán con profundidades que van desde los 2 hasta los 16 km de profundidad (Figura 50).

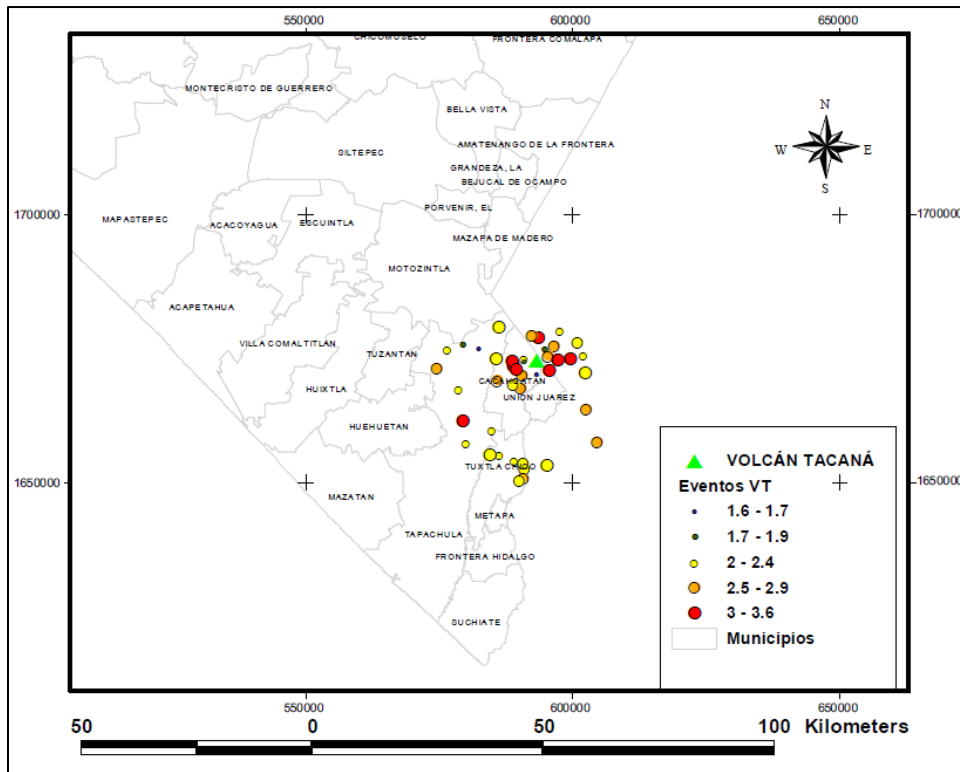


Figura 49. Localización de los sismos volcanotectónicos registrados por la red del Tacaná y reportados por la UNICACH durante el 2013 (enero a octubre) (Tomado de UNICACH- Centro de Investigación en Gestión de Riesgos y Cambio Climático).

En la Figura 51 y Figura 52 se presentan los perfiles N-S y E-W, respectivamente, correspondientes a la sismicidad reportada por el CENAPRED durante 2015 y 2016. El perfil N-S muestra una tendencia de hipocentros hacia la parte sur del volcán y en el perfil E-W la concentración de hipocentros es hacia el este. Los sismos localizados al noreste del volcán semejan un enjambre y no hay grandes distancias entre sus epicentros, menos de 5 km, a diferencia de los sismos localizados al sur-suroeste que se observan más dispersos, con distancia epicentral de hasta 20 km Figura 49 y Figura 50.

Se ha demostrado que en volcanes inactivos, por más de dos décadas, pueden registrarse enjambres de VTs (desde días hasta varios años) previo al inicio de una erupción y estos suelen localizarse a distancias de 2 a 45 km con respecto del sitio de la erupción (White & McCausland, 2016). Esta sismicidad responde al cambio de esfuerzos en la zona volcánica.

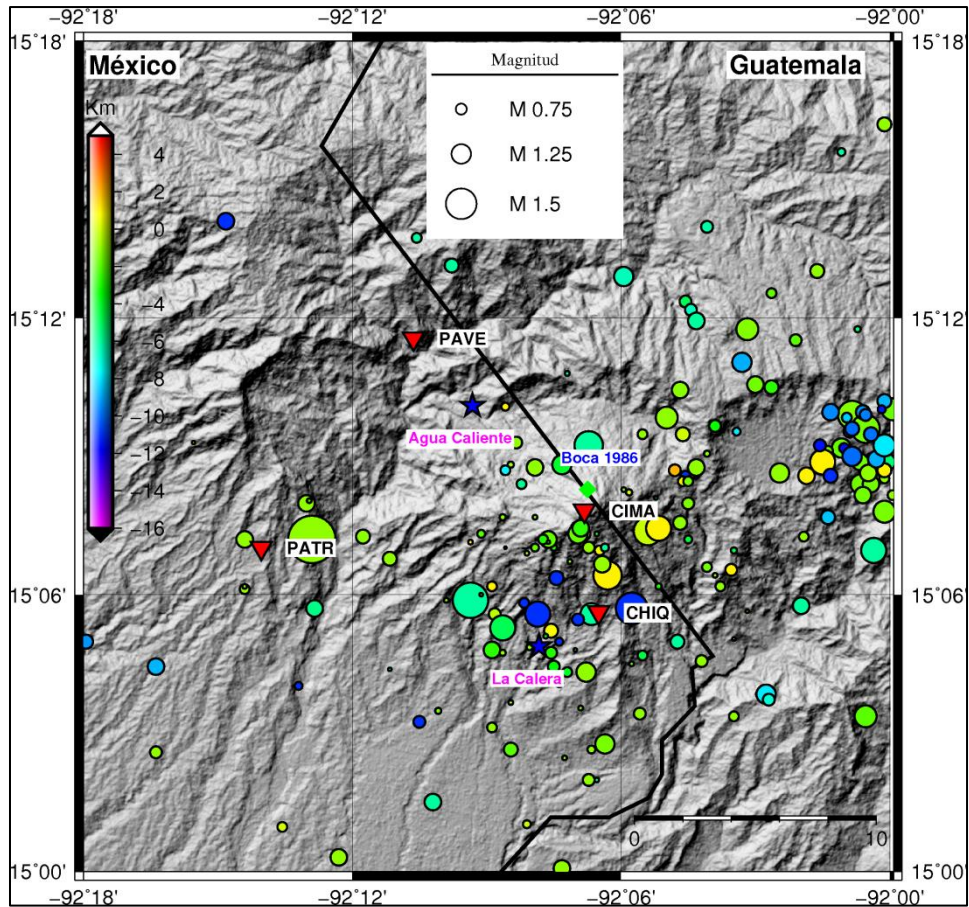


Figura 50. Localización de los sismos volcanotectónicos registrados por la red del Tacaná durante el 2015 y 2016 (Modificado de CENAPRED 2015 y CENAPRED 2016). El color corresponde con la profundidad y el tamaño del círculo a la magnitud calculada.

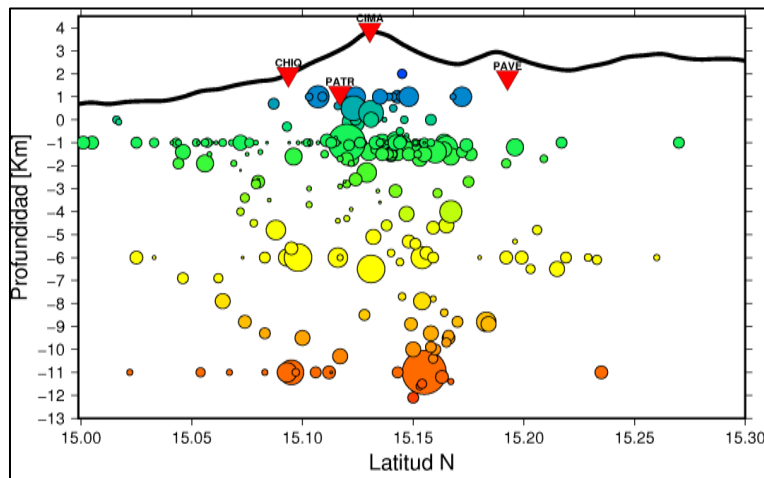


Figura 51. Perfil N-S de los sismos volcanotectónicos registrados por la red del Tacaná durante 2015 y 2016. El color corresponde con la profundidad y el tamaño del círculo a la magnitud calculada

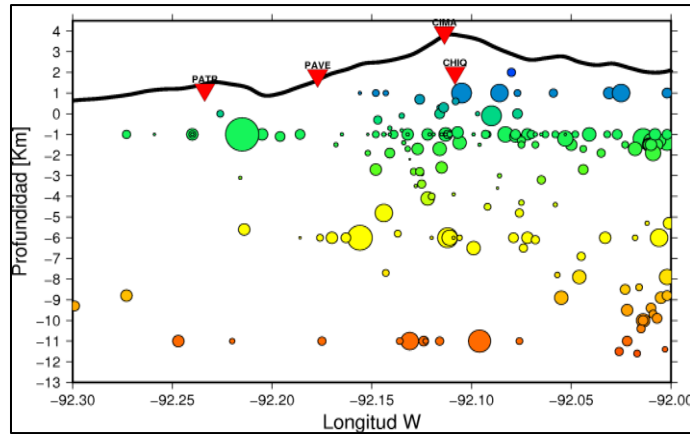


Figura 52. Perfil E-W de los sismos volcanotectónicos registrados por la red del Tacaná durante 2015 y 2016. El color corresponde con la profundidad y el tamaño del círculo a la magnitud calculada.

La agrupación de los de los hipocentros alrededor de los 5 km por debajo del cráter, puede ser un artificio derivado de la localización realizada con una sola estación y por el método de azimut, lo que provoca que la profundidad se concentre en un rango muy estrecho. En la Figura 53 se grafica el error promedio de las localizaciones, así como el modelo de velocidades empleado en la localización de los eventos (Castro, 1980); la alineación de los hipocentros se encuentra aproximadamente a 1 km por arriba de la primera capa del modelo (línea negra continua). De acuerdo a los errores graficados los hipocentros podrían estar ubicados en cualquier parte, por lo que no se podría inferir una zona de atenuación tomando en cuenta la sismicidad volcanotectónica.

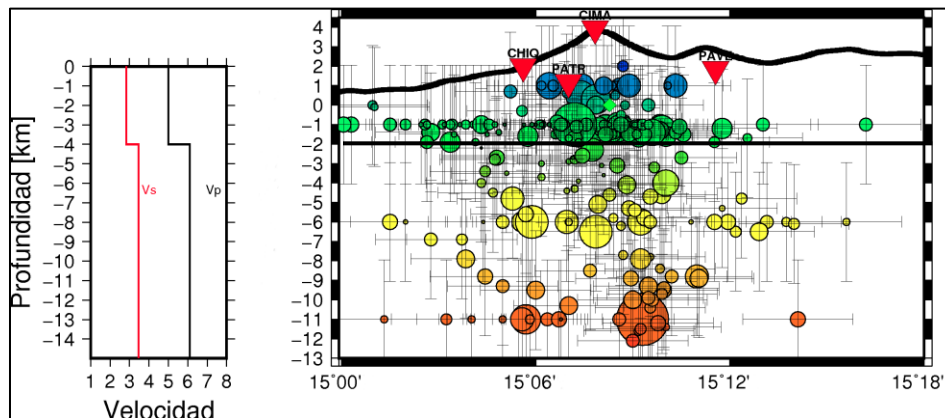


Figura 53. Perfil N-S con la proyección de los hipocentros y el error promedio asociado. De lado derecho el modelo de velocidades empleado para la localización. El color corresponde con la profundidad y el tamaño del círculo a la magnitud calculada. La línea negra corresponde con la primera capa del modelo de velocidades empleado para la localización de los sismos volcanotectónicos.

También se hizo un análisis conjuntando sismicidad volcanotectónica y la proyección de las trayectorias de los eventos telosísmicos, para poder delimitar una probable zona de atenuación, en la Figura 54 se muestra la proyección de los rayos de los eventos telosísmicos así como los epicentros correspondientes a la sismicidad del Tacaná registrada durante 2015 y 2016.

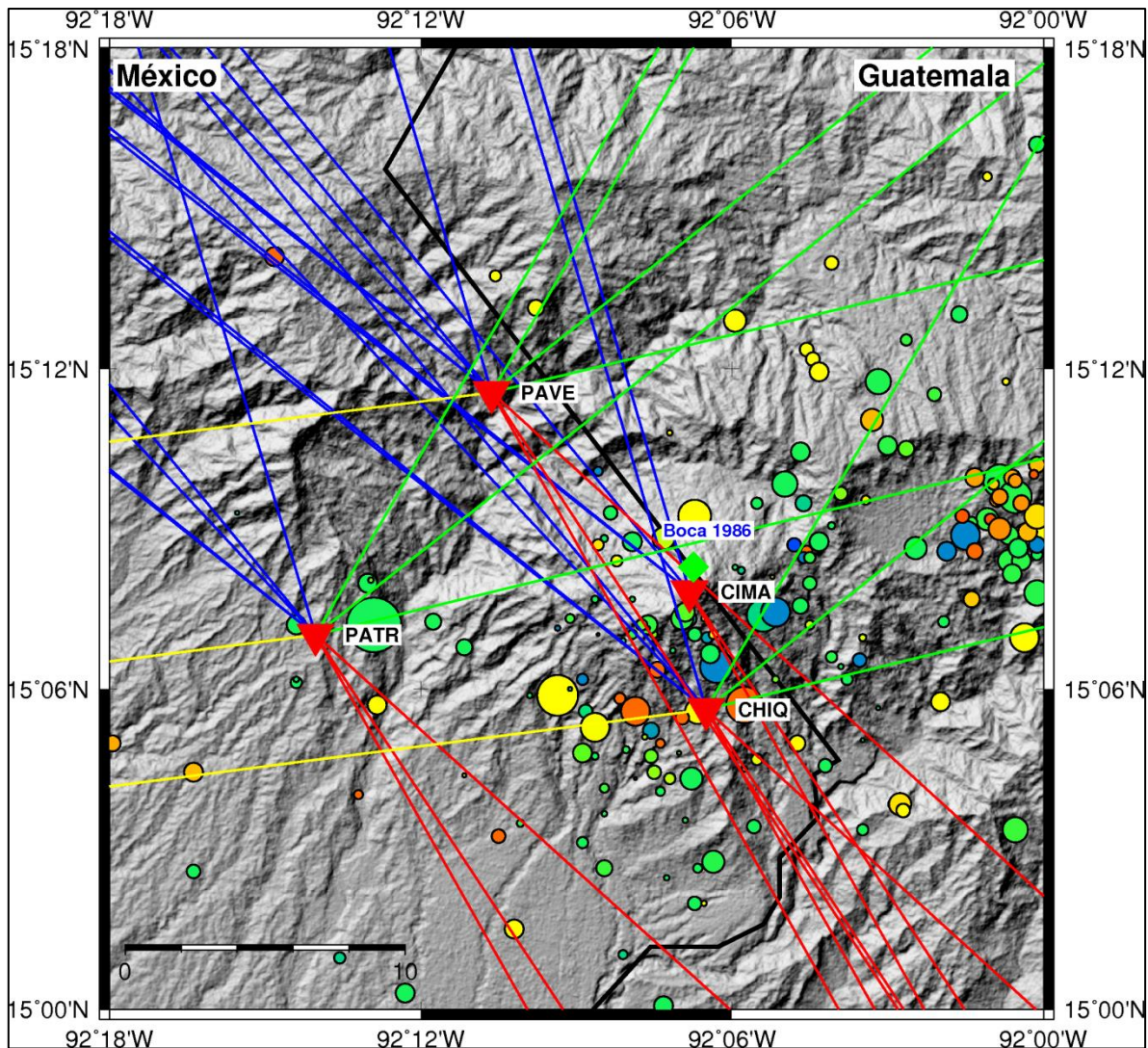


Figura 54. Proyección de las trayectorias de los sismos registrados por la red del Tacaná, los colores representan el azimut de arribo cada evento: azul-azimut NW, verde-azimut NE, rojo-azimut SE y amarillo-azimut SW.

Usando la relación entre la velocidad ( $v$ ), la frecuencia ( $f$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ):

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

se puede estimar la profundidad en que se da el fenómeno de atenuación, considerando que el periodo ( $T$ ) es el inverso de la frecuencia ( $\frac{1}{f}$ ) por lo que al expresar la longitud de onda en función del periodo tenemos:

$$\lambda = vT$$

Asumiendo que las trayectorias son sub-verticales y considerando una velocidad media para la onda P de 5.0 km/s y con la relación  $V_p/V_s=1.71$  tenemos que la velocidad de la onda S es de 2.92 km/s (Castro, 1980) (Rebollar, Espíndola, Uribe, Mendoza, & Pérez-Vertti, 1999) y (Narcía-López, Castro, & Rebollar, 2003), por lo que la profundidad asociada a los periodos en que la división espectral presentó atenuación corresponde a un rango de entre 2.5 y 15 km de profundidad.

En la Figura 55, se pueden observar los perfiles N-S y E-W, en éstos se graficó la sismicidad así como las trayectorias de los rayos que presentaron más del 5% de atenuación como resultado de la división espectral (líneas discontinuas).

De acuerdo al análisis de la sismicidad volcanotectónica, trayectorias y la relación de la velocidad con la longitud de onda ( $\lambda$ ), la profundidad que corresponde a los periodos en que se encontró atenuación es un rango muy grande y no define un área específica (Figura 55), por lo que se consultó información sobre estudios realizados en otros volcanes para encontrar zonas de atenuación que den indicios de la existencia de reservorios magmáticos o material parcialmente fundido.



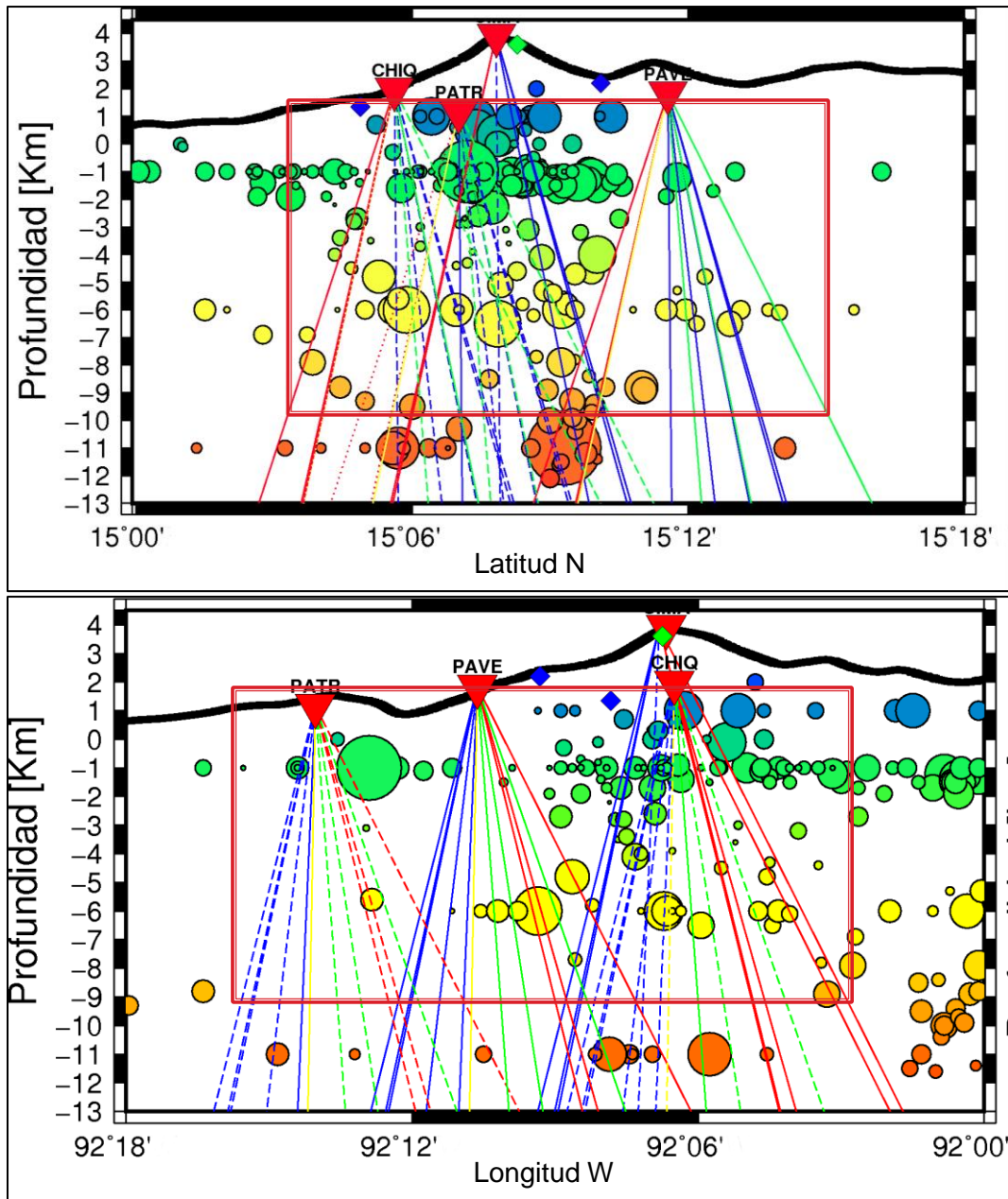


Figura 55 Perfiles N-S y E-W con las proyecciones de los rayos telismicos y los hipocentros de la sismicidad registrada en el volcán Tacaná durante 2015 y 2016.

Los volcanes consultados fueron: el volcán Galeras (Colombia), Redoubt (Alaska), Nevado del Ruiz (Colombia), Tungurahua (Ecuador), St. Helens (EUA) y Kuju (Japón). Todos estos volcanes comparten como característica principal que son estratovolcanes de composición andesítica y a excepción del volcán Kuju, los restantes son parte del continente americano. Todos ellos han tenido actividad eruptiva en los últimos 50 años, al igual que el Tacaná.

En el caso del Nevado del Ruiz (Londoño & Sudo, 2002) se obtuvo un modelo tridimensional de la estructura debajo del volcán invirtiendo los tiempos de arribo de las fases P y S; se utilizaron 1,650 sismos, tanto locales como regionales, para la inversión; los resultados obtenidos fueron tres zonas de baja velocidad debajo del cráter. Para el volcán Redoubt (Benz et al., 1996), también se obtuvo un modelo tridimensional de la estructura, haciendo la inversión de los tiempos de arribo de las fases P y S, en este caso se encontró una zona de baja velocidad entre los 7 y 10 km debajo del cráter. Para el volcán Popocatepetl, Berger (2010), realiza tomografía sísmica de los sismos volcanotectónicos registrados en el volcán, la autora encuentra principalmente dos zonas de baja velocidad, la primera entre los 6.5 y 9.5 km y la segunda debajo de los 11.5 km con respecto del cráter. En tanto que en volcán Galeras (Vargas et al., 2012), se realizó inversión y análisis de la variación espacial de coda-Q ( $Q_c$ ), invirtieron 2855 valores de  $Q_c$  asociados a 435 eventos, registrados por 19 estaciones; los resultados que obtuvieron fueron dos zonas de atenuación asociadas a cuerpos de roca parcialmente fundida, localizadas, la primera, alrededor de los 6 km y la segunda a una profundidad mayor que 13.3 km desde la cima. En el volcán Tungurahua (Molina et al., 2005), se realizó inversión tomográfica para estimar un modelo tridimensional de la estructura de velocidad de la onda P, encontrándose zonas de alta y baja velocidad. Para Mt. Helens (Lees & Crosson, 1989), se llevó a cabo tomografía sísmica para obtener un modelo tridimensional de la estructura, encontrándose dos zonas de baja velocidad, la primera de 6 a 9 km y la segunda de 9 a 16 km con respecto a la cima. Finalmente en el volcán Kuju (Sudo & Matsumoto, 1998), encontraron tres zonas de baja velocidad de material parcialmente fundido por medio de la obtención de un modelo tridimensional de la estructura de velocidad de la onda P. En la Tabla 4 se presenta un breve resumen del estudio que se realizó en cada uno de estos volcanes así como los resultados obtenidos.

**Tabla 4. Estudios realizados en otros volcanes y resultados encontrados**

<b>Volcán</b>	<b>Características</b>	<b>Estudio realizado</b>	<b>Resultados</b>
<b>Nevado del Ruiz (Colombia)</b>	Estratovolcán 5,311 m Andesítico	Tomografía sísmica de sismos locales y regionales	3 zonas de baja velocidad debajo del cráter: 1. 2-4 km 2. 5-10 km 3. 10-12 km
<b>Redoubt (Alaska)</b>	Estratovolcán 3,108 m Andesítico, con periodos de andesitas basálticas y dacitas	Tomografía de fases P y S (inversión del tiempo de arribo)	Zona de baja velocidad en forma de tubo de 7 -10 km bajo del cráter.
<b>Popocatepetl (México)</b>	Estratovolcán 5,452 m Andesítico-Dacítico	Tomografía sísmica (inversión de tiempos de arribo de onda P)	De 6.5-9.5 km debajo del cráter, volúmenes de baja velocidad rodeado de volúmenes de alta velocidad. Reservorio grande está por debajo de los 11.5 km debajo del cráter. Almacenamiento, transporte y ascenso se realiza por un sistema de diques y conductos.
<b>Galeras (Colombia)</b>	Estratovolcán 4,200 m Andesítico	Análisis de Coda Q	Anomalía de baja velocidad: 1. 6 km debajo del cráter 2. 13 km debajo del cráter.
<b>Tungurahua (Ecuador)</b>	Estratovolcán 5,023 m Andesítico	Tomografía sísmica (inversión de tiempos de arribo de onda P)	Anomalía de baja velocidad 3 km debajo del cráter
<b>St. Helens (EUA)</b>	Estratovolcán 2,550 m Dacítico	Tomografía sísmica (inversión de tiempos de arribo de onda P)	Anomalía de baja velocidad (0.6%) de 6 a 9 km debajo del cráter. 9-16 Km fuerte anomalía de baja velocidad, sugiere acumulación de magma.
<b>Kuju (Japón)</b>	Estratovolcán 1,791 m Andesítico-Dacítico	Tomografía sísmica (inversión de tiempos de arribo de onda P)	Anomalía de baja velocidad 4.8 km debajo del cráter, asociada a material parcialmente fundido.

En la (Figura 56) se representa de manera esquemática las zonas de atenuación encontradas a través de los estudios realizados en los diferentes volcanes antes mencionados, los bloques anaranjados representan estas zonas, encontradas mediante tomografía sísmica, de los tiempo de arribo de las fases P y S, así como de Coda Q, descritos en la Tabla 4; se puede observar que en 2 de los 7 volcanes

se encontraron zonas de baja velocidad entre los 2 y 4.8 km de profundidad con respecto al cráter; de igual manera en 2 de 7 se encontraron zonas de baja velocidad a partir de los 5 km de profundidad con respecto al cráter. Por otro lado, se puede observar que hay una profundidad en que las zonas de atenuación coinciden, para 6 de los 7 volcanes, entre los 6 y 9.5 km de profundidad con respecto a la cima de cráter.

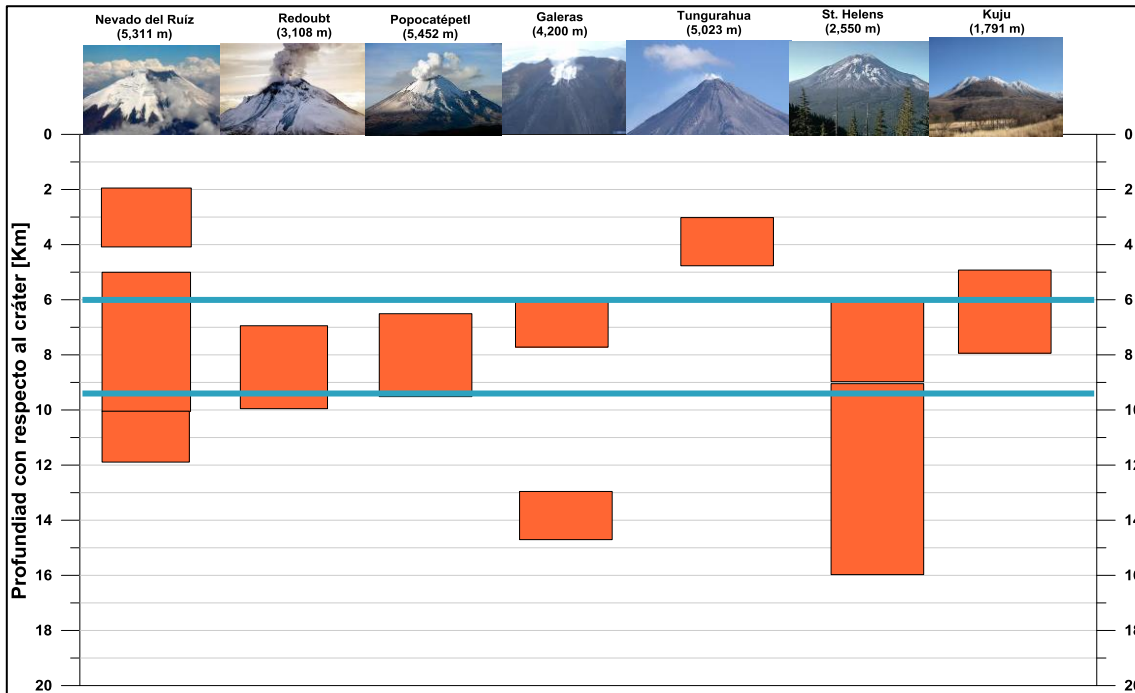


Figura 56. Comparación de las zonas de atenuación encontradas en otros volcanes.

Tomado en cuenta los resultados obtenidos en el presente trabajo y los estudios realizados para los volcanes antes mencionados, podemos acotar la zona de atenuación a una profundidad de 6 a 9 km por debajo del cráter. En la Figura 57 se pueden ver los perfiles N-S y E-W, los cuales incluyen las proyecciones de los rayos telesísmicos, en línea continua se representan los eventos que al realizar la división espectral presentaron menos del 5% de atenuación y en línea discontinua los eventos en los que se observó más del 5% de atenuación; también se grafican las proyecciones de los hipocentros de la sismicidad volcanotectónica reportada por el CENAPRED y finalmente se representa, mediante elipses, la zona de atenuación propuesta.

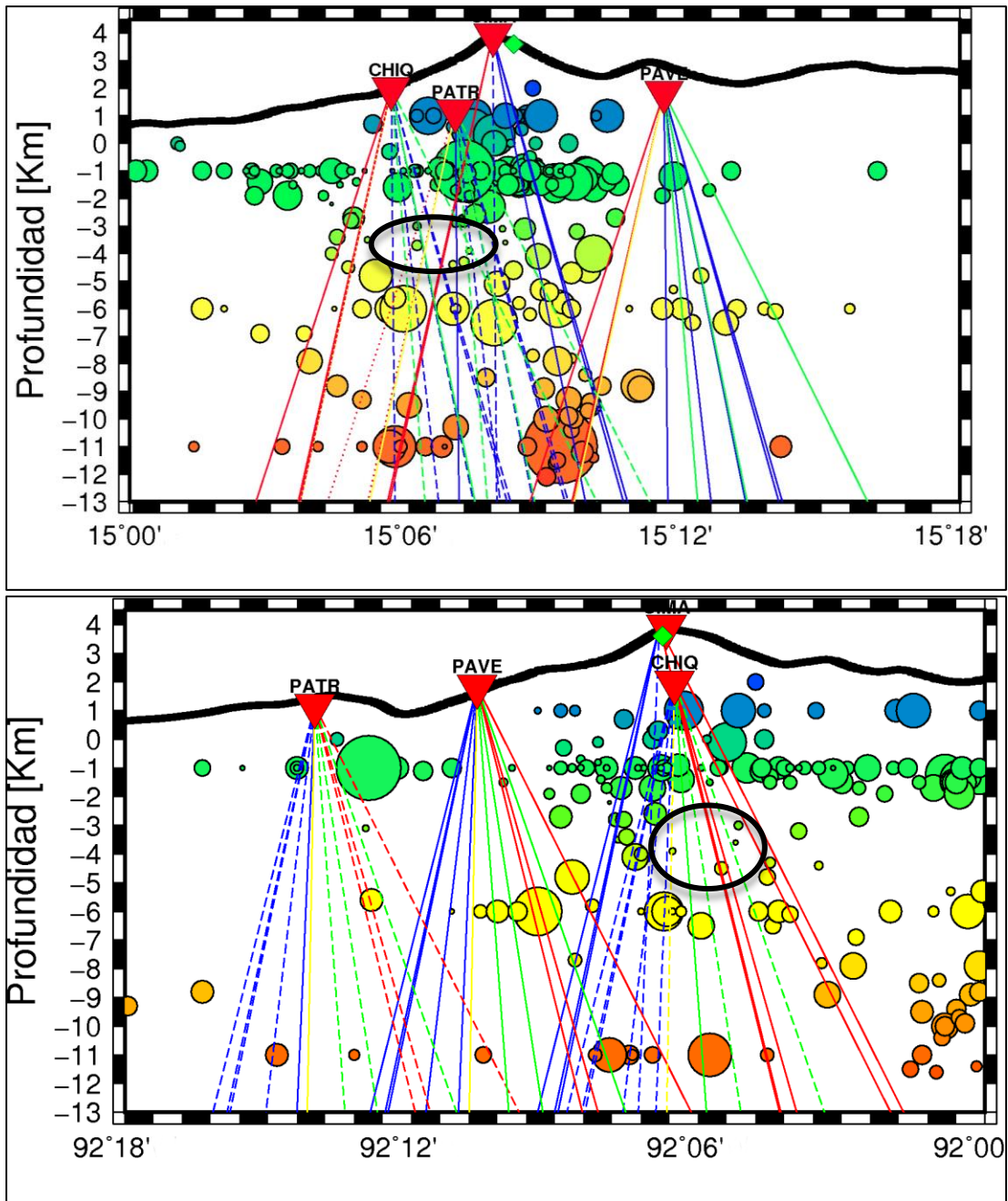


Figura 57. Perfiles N-S y E-W con las proyecciones de los rayos telosísmicos, los hipocentros de la sismicidad registrada en el volcán Tacaná durante 2015 – 2016 y la zona de atenuación propuesta en el presente trabajo (elipses).

Con estas consideraciones, se delimitó una probable región de atenuación ubicada entre los dos y cinco kilómetros debajo del nivel del mar (6 y 9 km debajo del nivel del cráter), y localizada alrededor de los 92.1° Long W y 15.11° Lat N (Figuras 57 y 58), quedando esta región epicentralmente cercana al pequeño cráter (~20 m de diámetro) que dejó la erupción freática de 1986, por lo que muy probablemente el material que calentó el agua de los sistemas hidrotermales y generó la erupción, se encuentra en esta zona.

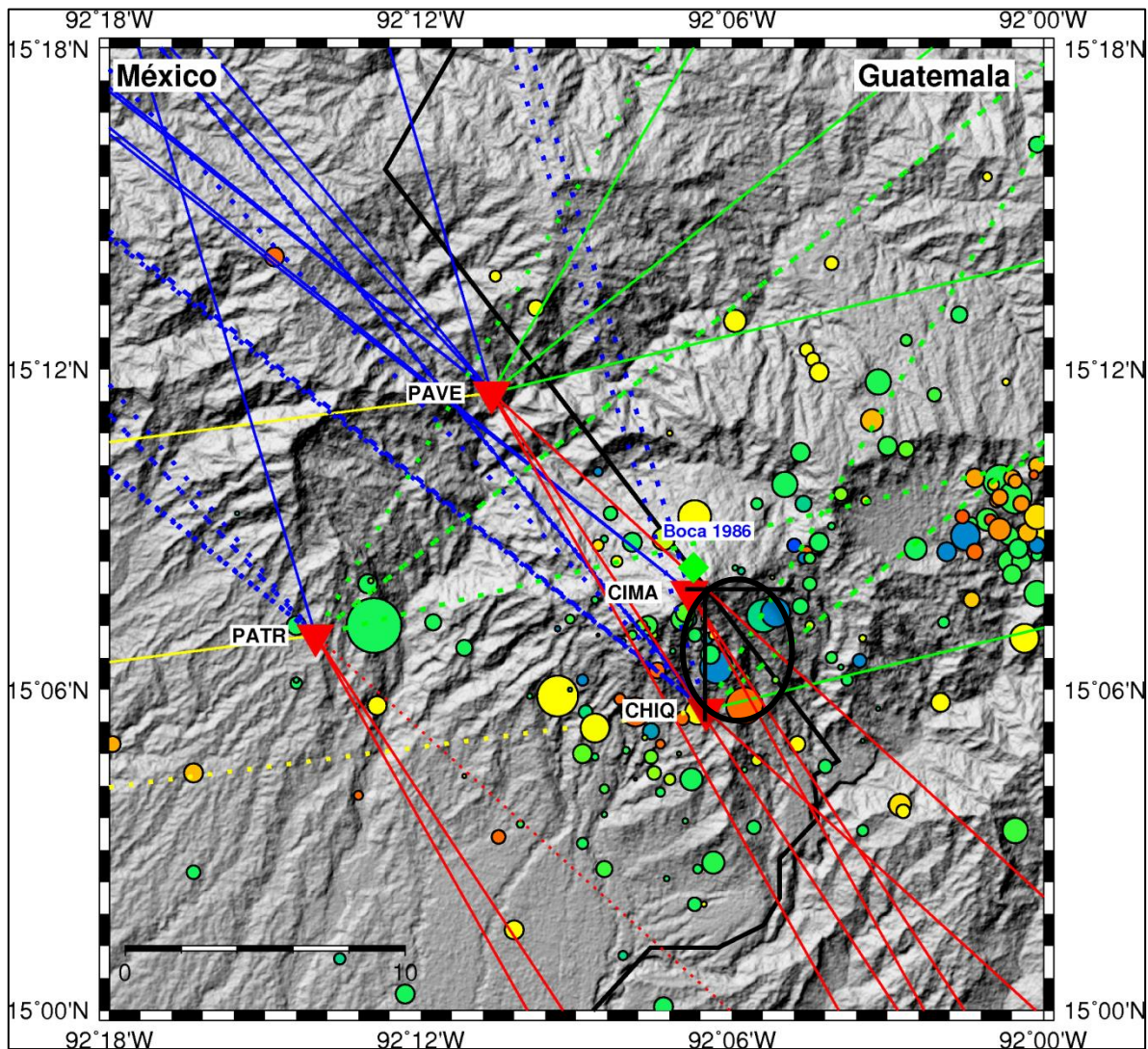


Figura 58. Proyección en planta de la zona de atenuación propuesta, la sismicidad y las trayectorias de los telesismos.

De acuerdo con las consideraciones antes mencionadas se obtuvo el volumen para un elipsoide con las siguientes dimensiones 3.78 x 4.86 x 3.5 km, lo que da un total de 33.66 km<sup>3</sup> y se considera que un máximo del 12% (4.04 km<sup>3</sup>) corresponde con material parcialmente fundido (Stephen et al., 2017; Hammond & Kendall, 2016; Magee et al., 2018), dando como resultado una zona sísmicamente atenuada que se traduce en un cociente espectral atenuado.

# **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **V.1 Conclusiones**

El volcán Tacaná es un estratovolcán ubicado en los límites entre México y Guatemala, formado por cuatro estructuras: Chichuj, Tacaná, Plan de las Ardillas y San Antonio; estas estructuras presentan una orientación NE-SW, y en un radio de 35 km del territorio mexicano vive una población de más de 465 mil habitantes; existen 36,730 viviendas, 150 unidades médicas, 1,580 escuelas, 3 presas, además de bancos, gasolineras, supermercados y hoteles, entre otros, por lo que una erupción volcánica pone en riesgo la vida de miles de personas, así como la infraestructura de la zona.

La importancia de este estudio radica en que mediante el análisis de cocientes espectrales de telesismos y asumiendo que la fuente, el trayecto, la instrumentación y el efecto de sitio son similares, la propagación de las ondas sísmicas por medios donde el material se encuentra en estado semisólido y con alta temperatura generan un espectro atenuado y con esto se podrían identificar las zonas donde este fenómeno se presenta. Además, mientras más conocimiento se tenga sobre el interior y los alrededores del edificio volcánico podremos conocer mejor la estructura y su comportamiento, permitiendo tomar medidas preventivas en caso de una posible reactivación y erupción volcánica.

La red sísmica del volcán Tacaná en un principio contaba con 4 estaciones de banda ancha; después de 2012 y hasta la fecha, quedan 3 estaciones. Esta red permitió obtener los registros sísmicos de 12 eventos telesísmicos, con un total de 126 trazas sísmicas; la magnitud de los eventos fue de 5.0 a 8.0 y a una distancia epicentral entre 1,500 y 18,000 km.

Con base en los resultados presentados mediante el análisis de los cocientes espectrales estándar, realizado para las fases P y S de los 12 eventos telesísmicos, se encontró que en las estaciones de CHIQ y PATR se presentan las



mayores atenuaciones, este fenómeno predomina en los periodos entre 1 y 3 s, y es en promedio de 5.78 % para la fase P y de 6.15% para la fase S, por lo que se propone que existe una zona de atenuación al Sur del volcán.

Se realizó un análisis tomando en cuenta el azimut de arribo de acuerdo a las trayectorias de los telesismos y se obtuvieron cuatro trayectorias preferenciales: NE, NW, SE SW. Este análisis indicó que al realizar la división espectral de CHIQ con respecto de PAVE, para las trayectorias NW y NE, se obtuvo atenuación para ambas fases, en el caso de la trayectoria NW la atenuación observada corresponde al 7% para la fase P y 6.7% para la fase S. En cuanto a la trayectoria NE, la atenuación observada es de 6% para la fase P y 6.5% para la fase S.

Los cocientes espectrales de la estación CIMA con respecto de la estación CHIQ, en la trayectoria SE, presentan un efecto de amplificación, lo que implica que el espectro de la estación CHIQ está atenuado con respecto de CIMA, por lo tanto, el resultado de la división espectral es la amplificación.

Finalmente en la división espectral en la estación PATR con respecto de CHIQ se observa atenuación en promedio del 6.3% para la fase P en la trayectoria SE; y de 5.4% para la trayectoria NE. Derivado de lo anterior, las trayectorias en las que se observa mayor atenuación son NW y SE, por lo que se considera la existencia de material en estado semisólido, hacia la parte S del volcán.

Los valores de atenuación obtenidos en las estaciones de La Patria (PATR) y Pavencul (PAVE) fueron menores al 5%, en comparación con los valores de atenuación obtenidos para aquellas trayectorias que atravesaron la estructura volcánica, por lo que el efecto de atenuación por efecto de la estación no es crítico.

Haciendo un análisis comparativo de estudios realizados en otros volcanes para encontrar zonas de atenuación o reservorios magmáticos y con base en nuestros resultados se puede delimitar una zona de atenuación entre los 6 y 9.5 km por debajo del cráter y al sur del mismo, ubicada en las coordenadas geográficas

92.1° Long W y 15.11° Lat N. En la zona propuesta pasan las trayectorias de los rayos que presentaron más de 5% atenuación, la sismicidad es mínima (menos de 5 eventos) o nula y el cráter de la erupción freática registrada en 1986 se ubica por arriba de la zona de atenuación propuesta. Se estimó un volumen de 33.66 km<sup>3</sup>, de los cuales se considera que existe un máximo del 12%, que correspondería con material parcialmente fundido, lo que representaría un volumen de 4.03 km<sup>3</sup>.

Esta última consideración, hace al volcán Tacaná un volcán potencialmente peligroso, que debe ser monitoreado constantemente y la población que vive en sus alrededores debe conocer el riesgo ante una posible erupción del volcán.

## **V.2 Recomendaciones**

En caso de una reactivación del sistema magmático, los precursores que se podrían esperar son principalmente enjambres de sismos volcanotectónicos, asociados al fracturamiento de la roca debido a intrusiones magmáticas, así como eventos de periodo largo, asociados al movimiento de fluido dentro de los conductos magmáticos, por lo que se recomienda la instalación de estaciones sísmicas en los sectores NE y SE del volcán (región Guatemalteca), con la finalidad de tener una mejor cobertura y poder registrar el mayor número de eventos. Las estaciones deberán estar instrumentadas con sensores de banda ancha y tener transmisión de datos en tiempo real. La instrumentación propuesta en estos sectores coadyuvará en el análisis del potencial de peligro en el territorio de Guatemala.

No se descarta la posibilidad de una reactivación del sistema magmático, sobre todo porque es un volcán que ha registrado actividad freática reciente (1949 y 1986), además de seguir presentando sismicidad volcanotectónica. Por esta razón es importante continuar con el buen funcionamiento la red sísmica así como llevar el seguimiento de la sismicidad asociada a la actividad volcánica, dado que el monitoreo continuo y en tiempo real del volcán proporcionará información de vital importancia para los tomadores de decisiones.

## Referencias

- Bäth, M. (1974). *Spectral analysis en Geophysic*. Elsevier Scientific Publishing Compañy.
- Benz, H. M., Chouet, B. A., Dawson, P. B., Lahr, J. C., Page, R. A., & Hole, J. A. (1996). Three-dimensional P and S wave velocity structure of Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Geophysical Research*, 101(B4), 8111-8128.
- Berger, P. (2010). *Relocalización hipocentral y tomografía sísmica en el volcán Popocatépetl, México*. Mexico: Tesis Doctoral, UNAM.
- Borcherdt, R. D. (1970). Effects on local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of Seismological Society of America*, 60(1), 29-61.
- Bormann, P. (2012). *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*. Potsdam: IASPEI, GZF German Research Center for Geosciences.
- Böse, E. (1902). Breve noticia sobre el estado actual del Volcán Tacaná, Chiapas. *Memorias y Recista de la Sociedad Científica Antonio Alzate*, 266-270.
- Böse, E. (1903). Estado actual del volcán Tacaná. *Prergones 1*.
- Brigham, E. (1974). *The fast Fourier Transform*. New Jersey: Prentice Hall.
- Castro, R. (1980). *Un modelo de corteza terrestre para el sur de México mediante el uso de sismos profundos*. D.F., México: Bachelor Thesis, UNAM.
- CENAPRED. (2012). *Historia de la actividad del VOLCÁN POPOCATÉPETL 17 años de erupciones*. MEXICO: CENAPRED.
- Collard, N., Taran, Y., Peiffer, L., Campion, R., & P. Jacome Paz, M. (2014). Solute fluxes and geothermal potencial of Tacaná Volcano-hydrothermal system, Mexico-Guatemala. *Jornal of Volcanology and Geothermal Research*, 123-131.
- Crotwell, H. P., Owens, T. J., & Ritsema, J. (1999). The TauP Toolkit: Flexible seismic travel-time and ray-path utilities. *Seismological Research Letters*, 70, 154-160.
- De La Cruz-Reyna, S. d., Armienta, M. A., Zamora, V., & Juárez, F. (1989). Chemical changes in spring waters at Tacaná Volcano, Chiapas, méxico: A possible precursor of the may 1986 seismic crisis and phreatic explosion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 38, 345-253.
- Espíndola, J. M., Macías, J. L., & Sheridan, M. F. (1993). El volcán Tacaná: Un ejemplo de los problemas en la evaluación del Riesgo Volcánico.

*Proceedings, Simposio Internacional sobre Riesgos Naturales e Inducidos en los Grandes Centros Urbanos de América Latina: México, D.F. Centro Nacional de Prevención de Desastres. , 62-71.*

Espíndola, J. M., Medina, F. M., & De los Ríos, M. (1989). A C-14 age determination in the Tacaná volcano (Chiapas, México). *Geofísica Internacional*, 123-128.

García-Palomo, A., Macías, J. L., Arce, J. L., Mora, J. C., Hughes, S., Saucedo, R., . . . Layer, P. (2006). Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex. México-Guatemala. *Geological Society of America*, 39-57.

González-Pomposo, G. (2004). *Análisis de la sismicidad asociada a la actividad del volcán Popocatepetl y determinación de su estructura por medio de tomografía sísmica*. México, D.F.: Tesis Doctoral, UNAM.

Guzmán-Speziale, M., Pennington, W. D., & Matumoto, T. (1989). The triple junction of the North America, Cocos and Caribbean plates: seismicity and tectonics . *Tectonics*, 981-999.

Hammond, J., & Kendall, J.-M. (2016). Constraints on melt distribution from seismology: a case study in Ethiopia. *Geological Society of London*, 127-147.

Havsvov, J., & Lars, O. (2010). *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. Norway: Springer.

Iguchi, M. (1994). *A Vertical Expansion Source Model for the Mechanisms of Earthquakes Originated in the Magma Conduit of Andesitic Volcano: Sakurajima, Japan*. Kyoto: Kyoto University Press.

Lees, J. M., & Crosson, R. S. (1989). Tomographic Inversion for Three-Dimensional Velocity Structure at Mount St. Helens Using Earthquakes Data. *Journal of Geophysical Research*, 94(B5), 5716-5728.

Londoño, J., & Sudo, Y. (2002). Velocity structure and seismic model for Nevado del Ruiz Volcano (Colombia). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 61-87.

Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVII(3), 379-424.

Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos en México. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana. , Volumen conmemorativo del Centenario Temas selectos de la Geología Mexicana. (3)*, 379-424.

- Macías, J. L., Espíndola, J. M., García-Palomo, A., Scott, K. M., Hughes, S., & Mora, J. C. (2000). Late Holocene Peléanstyle eruption at Tacaná Volcano, Mexico-Guatemala: Past, present and future hazards. *Geological Society of America Bulletin*, 112(8):1234-1249.
- Magee, C., Stevenson, C., Ebmeier, S., Keir, D., Hammond, J., Gottsmann, J., . . . Jackson, M. (2018). Magma Plumbing Systems: A geophysical Perspective. *Journal of Petrology*, 1-35.
- Manea, V. C., Manea, M., & Ferrari, L. (2013). A geodynamical perspective on the subduction of Cocos and Rivera plates beneath México and Central America. *Tectonophysics*(609), 56-81.
- Mercado, R., & Rose, W. I. (1992). Reconocimiento geológico y evaluación preliminar de peligrosidad del volcán Tacaná, Guatemala/México. *Geofísica Internacional*, 31(3), 205-237.
- Molina, I., Kumagai, H., Le Pennec, J.-L., & Hall, M. (2005). Three-dimensional P-wave velocity structure of Tugurahua Volcano, Ecuador. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 144-156.
- Mooser, F., Meyer-Abich, H., & Mc Birney, A. (1958). Catalogue of the active volcanoes of the world including Solfatara fields Part VI, Central America. *In* *International Volcanological Association Napoli*, 26'30.
- Mora, J. C., Gardner, J. E., Macías, J. L., Meriggi, L., & Santo, A. P. (2013). Magmatic control on eruption dynamics of the 1950 yr B. P. eruption of San Antonio volcano, Tacana Volcanic Complex, Mexico-Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 262:134-162.
- Mora, J. C., Macías, J. L., Garcia-Palomo, A., Espíndola, J. M., Manetti, P., & Vaselli, O. (2004). Petrology and geochemistry of The Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala: evidence for the last 40,000 year of activity. *Geofísica Internacional*, 43:331-359.
- Mullerried, F. (1951). La reciente actividad del volcán Tacaná, estado de Chiapas, a fines de 1949 y principios de 1950. *Instituto de Geología de la UNAM*, 1-28.
- Narcía-López, C., Castro, R. R., & Rebollar, C. J. (2003). Determination of crustal thickness beneath Chiapas, México using S and Sp waves. *Geophysical Journal International*, 157(1), 215-228.
- Nishimura, T., & Iguchi, M. (2011). *Volcanic Earthquakes and Tremor in Japan*. Kyoto: Kyoto University Press.

- Rebollar, C. J., Espíndola, V. H., Uribe, A., Mendoza, A., & Pérez-Vertti, A. (1999). Distributions of stresses and geometry of the Wadati-Benioff zone under Chiapas, México. *Geofísica Internacional*, 95-106.
- Ryall, F., & Ryall, A. (1981). Attenuation of P and S waves in magma chamber in Long Valley Caldera, California. *Geophysical Research Letters*, 8(6), 557-560.
- Scolamacchia, T., & Macías, J. L. (2015). *Active Volcanoes of Chiapas (Mexico): El Chichón and Tacaná, Active Volcanoes of the World*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Stephen, R., Sparks, J., & Cashman, K. V. (2017). Dynamic Magma Systems: Implications for forecasting Volcanic Activity. *Elements, An international Magazine of Mineralogy, Geochemistry and Petrology*, 35-40.
- Sudo, Y. (1991). An attenuating structure beneath the Aso Caldera determined from the propagation of seismic waves. *Bulletin of Volcanology*, 53, 99-111.
- Sudo, Y., & Matsumoto, Y. (1998). Three-dimensional P-wave velocity structure in the upper crust beneath Kuju Volcano, Central Kyushu, Japan. *Bulletin of Volcanology*, 147-159.
- Vargas, C. A., Pujades, L., & Caneva, A. (2012). Attenuation structure of the Galeras Volcano, Colombia. *Boletín de Geología*, 34(2), 146-161.
- White, R., & McCausland, W. (2016). Volcano-tectonic earthquake: A new tool for estimating intrusive volumes and forecasting eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139-155.
- Zobin, V. M., González, A., Reyes-Davila, G. A., Domínguez, T., Cerda Chacón, J. C., & Chávez Álvarez, J. M. (2007). Comparative characteristics of the 1997-1998 seismic swarms preceding the november 1998 eruption of Volcán de Colima, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39-52.