



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ALERTA ANTE SISMOS PARA LA  
CIUDAD DE GUATEMALA**

**Diego Andrés Castro Rojas**

Asesorado por el Ing. Juan Pablo Oliva Hernandez

Guatemala, marzo de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ALERTA ANTE SISMOS PARA LA  
CIUDAD DE GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**DIEGO ANDRÉS CASTRO ROJAS**

ASESORADO POR EL ING. JUAN PABLO OLIVA HERNANDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERIO CIVIL**

GUATEMALA, MARZO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADORA	Inga. Dilma Yanet Mejicanos Jol
EXAMINADOR	Ing. Andy Williams Alonso Vásquez
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera Lopez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

### **VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ALERTA ANTE SISMOS PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 28 de mayo de 2018.

**Diego Andrés Castro Rojas**

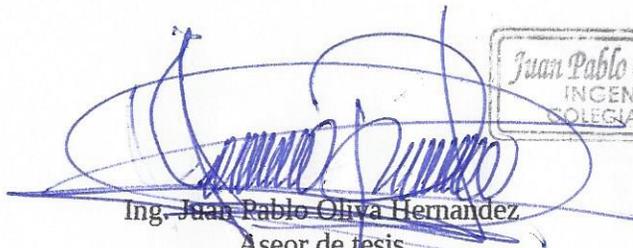
Guatemala, 9 de enero 2020

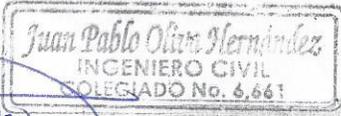
Ingeniero  
Juan Carlos Linares  
Jefe del Departamento de Planeamiento  
Escuela de Ingeniería Civil  
Presente

Atentamente le informo que he revisado el trabajo de graduación del estudiante universitario Diego Andrés Castro Rojas, carné 2009-15397, con título: **“VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ALERTA ANTE SISMOS, PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA”**, habiéndose desarrollado según el protocolo aprobado.

Deseo manifestar que el estudiante ha superado las expectativas de este trabajo, por lo que en mi calidad de asesor doy por aprobado el presente trabajo de graduación, solicitando a su jefatura darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

  
Ing. Juan Pablo Oliva Hernández  
Aseor de tesis  
No. de colegiado 6,661





Guatemala, 28 de enero de 2020  
EIC-JP-001-2020/jcl

Ingeniero  
Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

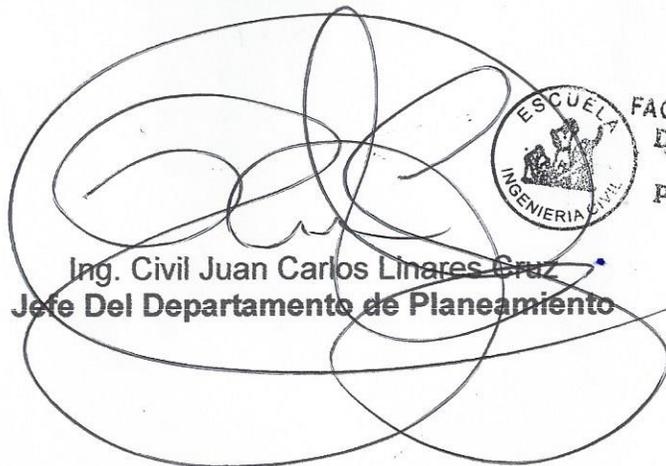
Ingeniero Aguilar:

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ALERTA ANTE SISMOS, PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Diego Andrés Castro Rojas, quien contó con la asesoría del Ing. Juan Pablo Oliva Hernández.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la ingeniería nacional y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**



Ing. Civil Juan Carlos Linares Cruz  
Jefe Del Departamento de Planeamiento



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
PLANEAMIENTO  
U S A C

Cc: Estudiante Diego Andrés Castro Rojas  
Archivo





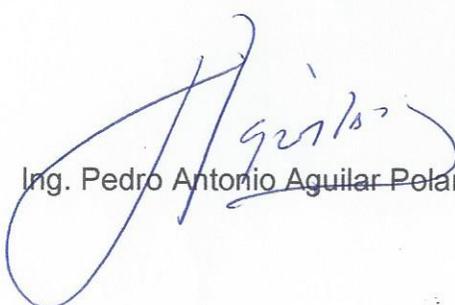
**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Juan Pablo Oliva Hernández y Coordinador del Departamento de Planeamiento Ing. Juan Carlos Linares Cruz al trabajo de graduación del estudiante Diego Andrés Castro Rojas **VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ALERTA ANTE SISMOS PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, marzo 2020

/mrm.



Universidad de San Carlos  
de Guatemala

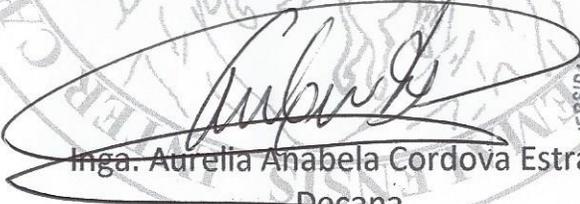


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref.DTG.113.2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **VIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ALERTA ANTE SISMOS PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Diego Andrés Castro Rojas**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada  
Decana



Guatemala, marzo de 2020

AACE/asga

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por darme calma, sabiduría y perseverancia para lograr cada una de las metas que me propongo en la vida y así alcanzar el éxito.
- Mis abuelos** Elida Esperanza Monterroso (q.d.e.p), José Wenseslao Rojas Moscoso (q.d.e.p) y Santiago Castro (q.d.e.p), quienes viven en mi corazón; sus recuerdos y su amor serán siempre mi inspiración.
- Mi abuelita** Belia Haydeé Ruiz de Rojas, la principal fuente de inspiración para seguir adelante en cada día de mi vida.
- Mis padres** Héctor Santiago Castro Monterroso y Astrid Priscila Rojas Ruiz, quienes con su ejemplo me enseñaron a vivir.
- Mi hermana** Astryd Sophia Castro Rojas de Viale, por su alegría y cariño y quien me ha motivado a seguir adelante en mi vida.
- Mi familia** Por ser el pilar que me alienta a dar lo mejor de mí cada día.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

**Licda. Kira Lucrecia  
Liscutín de Abreu**

Por brindarme todos sus conocimientos y ayudarme a encontrar el camino a la excelencia.

**Insivumeh**

Por brindarme todo el apoyo necesario para la realización de este trabajo de graduación.

**Mis amigos**

Kevin Ordoñez, Melinton Navas, Andrés Mazariegos, Ana lucia Tobar, quienes nunca me han dejado solo en los momentos que más lo necesité.

**Maria de los Angeles  
Arana Silva**

Por brindarme su apoyo en todo momento durante mi carrera y nunca dejarme dar por vencido.

**Ing. Juan Pablo Oliva**

Por formar parte del desarrollo de mi vida profesional.

**Lic. Robin Yani**

Quien de forma desinteresada me orientó en los aspectos técnicos de la sismología, fundamentales para este trabajo de graduación.

**Compañeros del Insivumeh** Lic. Rodolfo Alvarado, Lic. Amílcar Roca, Pablo Castellanos, Williams Juárez, Carla Chun, Byron Paiz, Ronald Bailey Walter Pérez Joshua Lemus, Luis Arriola, por su amistad.

## DICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
TABLAS.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. REFERENCIAS HISTÓRICAS.....	1
1.1. La sismología a través del tiempo.....	1
1.2. Reseña histórica del Insivumeh.....	3
2. PLACAS TECTÓNICAS, FALLAS Y ORIGEN DE LOS SISMOS.....	7
2.1. Estructura interna de la Tierra.....	8
2.1.1. Teoría de la tectónica de placas.....	9
2.1.2. Fallas geológicas.....	9
2.2. Movimiento del suelo y propagación de las ondas sísmicas ...	11
2.2.1. Comportamiento de las ondas sísmicas.....	11
2.2.2. Modelo de velocidad.....	12
2.2.3. Tipos de onda.....	14
2.2.3.1. Ondas de cuerpo.....	14
2.2.3.2. Ondas superficiales.....	15
2.2.4. Refracción y reflexión.....	15
2.2.5. Análisis de un sismograma.....	16
2.2.5.1. Localización de un sismo.....	19

2.3.	Gráfica de los tiempos de viaje <i>travel-time</i> .....	20
2.4.	Clasificación de los sismos .....	21
2.4.1.	Tipos de secuencias sísmicas.....	22
2.5.	Magnitud, energía e intensidad sísmica .....	22
2.5.1.	Magnitud de un sismo .....	23
2.5.2.	Energía sísmica.....	25
2.5.3.	Intensidad de un sismo .....	27
2.5.3.1.	Escala de intensidad .....	27
2.6.	Potencial sísmico .....	29
2.7.	Movimiento fuerte strong ground motion .....	30
3.	PLACAS TECTÓNICAS EN GUATEMALA.....	33
3.1.	Límite entre las placas NA-CA .....	34
3.1.1.	Zona de subducción .....	36
3.1.2.	Arco volcánico y fallas locales.....	38
3.2.	Zonificación sismogéncia .....	38
3.2.1.	Cortical o superficial (0 a 25 km) .....	39
3.2.2.	Interfase o intermedia (25 a 60 km).....	41
3.2.3.	Intraplaca <i>inslab</i> o profunda mayor a 60 km.....	42
3.3.	Red sísmica nacional .....	42
4.	REGISTROS SÍSMICOS DE GUATEMALA .....	47
4.1.	Catálogo sísmico.....	47
4.2.	Registros sísmicos del Insivumeh .....	48
4.3.	Sismos relevantes para la Guatemala.....	49
5.	MARCO METODOLÓGICO .....	55
5.1.	Análisis de los sismogramas .....	55
5.2.	Estimación de los tiempos de alerta.....	57

5.2.1.	Tiempos de viaje del catálogo depurado .....	57
5.2.2.	Tiempos de alerta .....	60
6.	ANÁLISIS DE LA AMENAZA SÍSMICA.....	65
6.1.	Intensidades vs distancia hipocentral y tiempos de alerta .....	65
6.2.	Localización de la fuente sismogénica con mayor amenaza ...	67
6.3.	Viabilidad de la alerta ante sismos para la Ciudad de Guatemala.....	70
6.4.	Validación del modelo.....	71
6.5.	Alerta para la zona intraplaca .....	72
6.6.	Alerta para la zona cortical .....	74
6.7.	Alerta para la zona interfase.....	76
6.8.	Propuesta de acciones para implementar en la ciudad de Guatemala.....	78
	CONCLUSIONES .....	81
	RECOMENDACIONES.....	83
	BIBLIOGRAFÍA.....	85
	APÉNDICES .....	89
	ANEXOS.....	103



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Estructura interna de la Tierra.....	7
2.	Placas tectónicas .....	8
3.	Mapa de fallas de Guatemala .....	10
4.	Propagación de las ondas sísmicas.....	11
5.	Sismograma de la estación APG de la RNS del Insivumeh, sismo registrado el día 09 noviembre del 2019 a las 08:32 horas (UTC), procesado con el software SEISAN .....	17
6.	Gráfica de los tiempos de viaje de las ondas.....	21
7.	Comparativo de la energía liberada por un sismo y explosivos .....	26
8.	Placas tectónicas para Guatemala.....	33
9.	Límite entre la placa de Norteamérica y del Caribe .....	36
10.	Subducción de la placa de Cocos y la placa del Caribe.....	37
11.	Propuesta para la zonificación de sismos corticales .....	40
12.	Propuesta para la zonificación de sismos con profundidades entre 25 y 60 km.....	41
13.	Propuesta para la zonificación de sismos profundos .....	42
14.	Distribución de las estaciones digitales dentro del territorio nacional ....	44
15.	Distribución de las estaciones de banda ancha y acelerómetros dentro del territorio nacional.....	46
16.	Mapa con la sismicidad registrada por Insivumeh desde enero de 1984 a febrero de 2018.....	49
17.	Mapa de los sismos con magnitud mayor a 5 registrados por Insivumeh.....	50

18.	Mapa con los epicentros de los eventos sísmicos relevantes de movimiento fuerte para Guatemala.....	53
19.	Sismogramas ordenados según la distancia epicentral sismo registrado el día 06 de septiembre a las 16:13 del año 2013 .....	56
20.	Sismogramas ordenados según la distancia epicentral sismo registrado el día 07 de septiembre a las 20:49 del año 2017 .....	57
21.	Gráfica de los tiempos de viaje para los sismos corticales .....	58
22.	Gráfica de los tiempos de viaje para los sismos interfase .....	59
23.	Gráfica de los tiempos de viaje para los sismos intraplaca.....	59
24.	Gráfica del tiempo de categorización del sismo.....	61
25.	Gráfica con los posibles tiempos de alerta para sismos corticales .....	63
26.	Gráfica con los posibles tiempos de alerta para sismos interfase .....	63
27.	Gráfica con los posibles tiempos de alerta para sismos intraplaca.....	64
28.	Tiempos de alerta para el sismo del 02 de febrero de 2019 (zona intraplaca).....	65
29.	Tiempos de alerta para el sismo del 28 de agosto de 2014 (zona interfase).....	66
30.	Tiempos de alerta para el sismos del 16 de julio del 2014 (zona cortical) .....	67
31.	Mapa con los posibles tiempos de alerta para la Ciudad de Guatemala .....	70
32.	Mapa de los epicentros reportados sensibles por la población a Insivumeh (enero – noviembre 2019) .....	72
33.	Mapa con los tiempos de alerta para la zona intraplaca .....	73
34.	Mapa con los tiempos de alerta para la zona cortical .....	75
35.	Mapa con los tiempos de alerta para la zona interfase.....	77

## TABLAS

I.	Extracto del modelo local de velocidad del Insivumeh .....	14
II.	Escala de Mercalli modificada.....	29
III.	Relación del PGA (aceleración pico) y PGV (velocidad pico) con la IMM.....	31
IV.	Conteo sísmico según la profundidad .....	48
V.	Registros de los eventos sísmicos de movimiento fuerte del Insivumeh.....	51
VI.	Registros del Insivumeh para los eventos sísmicos relevantes para Guatemala.....	52



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$P_n$	Arribo de la fase $P_n$
$S_n$	Arribo de la fase $S_n$
$M_l$	Es la magnitud se puede determinar midiendo la máxima amplitud de las ondas registradas en el sismograma; esta es la magnitud basada en la escala original de Richer, usada para sismos locales de California
$M_c$	La magnitud se puede determinar midiendo la duración del sismo
$M_d$	Magnitud coda
$M_w$	Magnitud de momento
$M_b$	Magnitud de ondas de cuerpo
$M_s$	Magnitud de ondas superficiales
$M_l$	Magnitud local
$M_b$	Magnitud que se puede determinar midiendo las amplitudes de la onda P
$M_s$	Magnitud que se puede determinar midiendo las amplitudes de la onda P
$M_0$	Momento sísmico
“P”	Onda de cuerpo primaria
“S”	Onda de cuerpo secundaria



## GLOSARIO

<b>Corteza continental</b>	Es una capa que tiene un espesor medio de entre 35 y 40 kilómetros, pero puede superar los 70 kilómetros en algunas regiones montañosas.
<b>Corteza oceánica</b>	Es una capa que tiene alrededor de 7 kilómetros de grosor y está compuesta por rocas ígneas oscuras denominadas basaltos.
<b>Corteza terrestre</b>	Es una capa rocosa externa, comparativamente fina de la Tierra; se divide generalmente en corteza oceánica y corteza continental.
<b>Enjambre sísmico</b>	Se caracteriza por un aumento gradual en la tasa de sismicidad de una región y tiempo determinado sin que ocurra un sismo con una magnitud que predomine sobre los demás eventos, por lo que las magnitudes tienen a ser bajar.
<b>IMM</b>	Intensidad de la escala de Mercalli modificada
<b>Insivumeh</b>	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología; para este trabajo de graduación hace referencia específicamente el Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos

<b>PGA</b>	Aceleración máxima del suelo, <i>Peak Ground Acceleration</i>
<b>PGV</b>	Velocidad máxima del suelo, <i>Peak Ground Velocity</i>
<b>Premonitores sismo principal replicas</b>	Este tipo de secuencia ocurre con menos frecuencia y se caracteriza iniciando con un aumento de sismicidad que antecede al sismo principal.
<b>SEISAN</b>	Es un conjunto de programas con una base de datos simple para analizar datos sísmicos; es posible utilizar un modelo de velocidades locales y regionales para la estimación de magnitudes, epicentros y momento sísmico. El archivo (S-file) contiene toda la información del sismo (tiempos de llegada, amplitud, período, azimut y entre otros).
<b>SEISCOMP3</b>	Es un software sismológico que ha evolucionado en los últimos 10 años; consta de módulos de adquisición pura, por lo cual es considerado un software de monitoreo casi en tiempo real. Dentro del desarrollo de SeisComP se crea la tercera generación, también conocido como SeisComP 3. El desarrollo inicial de SeisComP3 tuvo lugar en GFZ entre 2006 y 2008 dentro del proyecto GITEWS.
<b>Sismo principal-replica</b>	Está asociado a la ocurrencia de un sismo de gran magnitud (sismo principal) y seguido de uno o varios sismos (réplicas).

<b>Sismos artificiales</b>	Se originan de fuentes controladas o inducidas por el hombre. Entre este tipo de fuentes sísmicas artificiales se encuentra la minería, las explosiones nucleares, el ruido cultura, inyección de fluidos, entre otros.
<b>Sismos distantes</b>	Cuando la distancia es mayor a 12 000 km.
<b>Sismos intermedios</b>	Profundidades entre 25 y 70 km.
<b>Sismos locales</b>	Cuando la distancia epicentral es menor a 1 000 km.
<b>Sismos naturales</b>	Aquellos cuyas fuentes sísmicas de origen no pueden ser controladas por el hombre.
<b>Sismos profundos</b>	Cuando registran profundidades mayores a los 70 km.
<b>Sismos regionales</b>	Cuando la distancia se encuentra entre 1 000 y 12 000 km.
<b>Sismos superficiales</b>	Profundidades entre 0 y 25 km; gran porcentaje de origen volcánico y fallamiento local.
<b>Sismos tectónicos</b>	Son aquellos sismos que generalmente tienen su fuente de origen en los límites entre las placas tectónicas o a lo largo de fallas activas; estos pueden ser inapreciables para las personas o pueden llegar a provocar grandes catástrofes,

propagándose a grandes distancias tanto sobre la superficie como en el interior de la Tierra.

**Sismos volcánicos**

Son aquellos que tienen como fuente de origen a la actividad volcánica desde el ascenso del magma, así como su emplazamiento dentro de la corteza. Se caracterizan por la extrema violencia en su localidad y por una rápida disminución del movimiento del suelo al aumentar la distancia. Debido a que su foco es superficial, afecta a regiones poco extensas.

## RESUMEN

El presente trabajo de graduación surge de la necesidad de contribuir con una propuesta de impacto social ante la ocurrencia de fenómenos naturales, en especial, la actividad sísmica presente en Guatemala derivado de la interacción de tres placas tectónicas cuya actividad es diaria; no obstante, teniendo los antecedentes históricos de grandes terremotos, se carece de un alerta ante estos eventos naturales.

Las ondas sísmicas viajan en la corteza terrestre a gran velocidad, de tal manera que el territorio nacional es recorrido en escasos minutos; por lo cual, es necesario sistematizar y caracterizar los movimientos sísmicos. En Guatemala tienen una forma muy particular en su comportamiento; este es uno de los principales aportes de esta investigación.

Para hacer accesible el tema al lector, se inicia con un resumen de conceptos básicos de la geología y sismología necesario para comprender la historia sísmica en Guatemala. Posteriormente, se abordan conceptos que permiten conocer los principales avances técnicos y científicos en la sismología con el objetivo de familiarizarse con la medición de los sismos. Esta información es valiosa ya que contribuye a la toma de conciencia de la realidad sísmica que se vive en Guatemala.

Posteriormente, se presenta el registro sísmico de los últimos 6 años extraído de los registros de Insivumeh, que es la base para identificar la amenaza sísmica para el territorio nacional; y finalmente se describe el análisis realizado con estos registros sísmicos y de esta manera clasificarlos,

categorizarlos y proponer distintos escenarios posibles para un sistema de alerta ante sismos para la ciudad de Guatemala.

## **OBJETIVOS**

### **General**

Estimar la recurrencia de los sismos y el tiempo de arribo de las fases de un sismo para la ciudad de Guatemala, para identificar la viabilidad de un sistema de alerta ante sismos.

### **Específicos**

1. Conocer las magnitudes de los sismos más recurrentes y sus fuentes sísmicas para la ciudad Guatemala.
2. Determinar la zona sismogénica con el potencial sísmico más alto.
3. Sugerir estrategias de implementación fundamentadas en la viabilidad de la alerta ante sismos para la ciudad de Guatemala.



## INTRODUCCIÓN

La motivación para iniciar este trabajo de graduación fue aportar para la disminución de víctimas humanas que genera un evento sísmico y contribuir a la utopía de llegar a cero víctimas humanas en el territorio nacional frente a la ocurrencia de eventos sísmicos.

Dadas esas motivaciones, dedico este trabajo a las personas que de una u otra manera han sido víctimas de evento sísmico en Guatemala. Además, se lo dedicó a la población en general, como aporte al cumplimiento de la misión institucional de la Universidad de San Carlos de Guatemala, de contribuir a la solución de los problemas nacionales.

Entrego, entonces, el resultado de esta investigación a las futuras generaciones, para que se profundice en el conocimiento de la dinámica sísmica en el territorio guatemalteco, para que se viva en estas condiciones con un comportamiento colectivo inteligente que permita convivir con la realidad sísmica de alta frecuencia y alta intensidad que se ha heredado al haber tenido el honor de haber nacido en Guatemala.



# 1. REFERENCIAS HISTÓRICAS

## 1.1. La sismología a través del tiempo

Los fenómenos naturales de la tierra han cautivado y han sido fuente de inspiración para muchas civilizaciones a lo largo de la historia de la humanidad y los terremotos no son la excepción ya que existen registros escritos que datan de hace más de 3 000 años en China, al igual que registros japoneses y europeos sobre dichos fenómenos siglos atrás.

En la antigüedad, los sismos eran considerados como una intervención divina producto de la ejecución de un castigo; en las culturas precolombinas se atribuían los sismos a un proceso de equilibrio de la población el cual era provocado por los cuatro dioses que sujetaban la tierra y la mecían para retirar la gente sobrante. Por otra parte, en la mitología griega, el dios de los mares, Poseidón, hacía mecer los mares para hacer tambalearse al Atlas, dios que sostenía el mundo y con ello producir los terremotos. Y así, un sin número de culturas antiguas que han atribuido de forma mística explicar la causa de los terremotos; incluso la Iglesia Católica en la Edad Media definía a los terremotos como un castigo de dios.

Los filósofos de la Antigua Grecia fueron pioneros en el estudio de los sismos; también, en proponer teorías naturales del origen de los terremotos; y es así como surge la etimología de la palabra sismología la cual se deriva del griego *seísmos*: agitación, sacudida o movimiento rápido y *logos*: estudio.

Fueron varios los filósofos que propusieron diversas teorías, entre ellos, y quizá el más influyente fue Aristóteles, cuyas explicaciones sobre la naturaleza se basaban en observaciones y opiniones arbitrarias; sin embargo, él creía que las rocas habían sido creadas bajo la 'influencia' de las estrellas y que los terremotos se producían cuando el aire entraba con fuerza en la tierra, se calentaba por los fuegos centrales y escapaba de manera explosiva. La propuesta de Anaxímenes fue la más cercana a las teorías actuales, ya que explicaba que el origen de los terremotos estaba en el colapso de cavernas de roca profundas. Por su parte, también, Anaxágoras y Empédocles propusieron que el origen de los terremotos estaba en la salida súbita de aire caliente, teoría que fue aceptada por Aristóteles; estas teorías fueron propuestas y aceptadas por toda Europa Antigua hasta que la iglesia católica en el medioevo consideró estas teóricas como herejía.

El punto de partida para la sismología moderna fue con un gran terremoto que devastó Lisboa el 1 de noviembre de 1755. Fue la presión social ante tal catástrofe la que generó que matemáticos y físicos de la época se les encomendara la tarea de profundizar en el estudio de este fenómeno natural.

“Posterior a ello, R. Mallet en 1857 propuso las bases de la sismología moderna que desarrolló la teoría del foco sísmico a partir del cual se irradian las ondas sísmicas en todas direcciones y al relacionar dicho movimiento con la ruptura de la corteza terrestre; que dio paso a un nuevo campo de estudio: La propagación de las ondas sísmicas en el interior de la Tierra y fue hasta 1914 cuando B. Gutenberg propusiera el primer modelo del interior de la tierra.”<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> UDÍAS VALLINA, A. *Fundamentos de sismología*. p. 40.

Desde entonces a la fecha la sismología he evolucionado tan rápido como la tecnología se lo permite y con ello la instrumentación sísmica y el procesamiento de los datos cambia constantemente con el tiempo.

Actualmente, la sismología se puede dividir en tres grandes disciplinas:

- Estudio de la sismicidad
  - Fuentes sísmicas
  - Propagación de las ondas
- La ingeniería sísmica
- La prospección sísmica

## **1.2. Reseñan histórica del Insivumeh**

De acuerdo con los registros históricos del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh) de Guatemala, se instalaron los primeros sismógrafos mecánicos en 1925 en el Observatorio Nacional. Posteriormente, a principios de la década de los años setenta se instalaron los primeros seis sismómetros electromagnéticos, como parte de un proyecto con el Servicio Geológico de los Estados Unidos, para vigilar los volcanes activos. Al principio, el centro de registro estuvo en el Instituto Geográfico Nacional y posteriormente fue trasladado al Observatorio Nacional.

Después del terremoto del 4 de febrero de 1976, el Gobierno decidió crear el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Insivumeh; que dio paso a la creación del Departamento de Investigación y

Servicios Geofísicos y con ello se crea la primera la Red Sísmica Nacional, diseñada con el objetivo de registrar la actividad local dentro del territorio nacional.

Desde entonces el Insivumeh ha pasado por 3 periodos institucionales, siendo el último período el que ha mostrado más interés en el fortalecimiento de la institución. En el año 2019 fue elaborado el plan estratégico de la institución asesorado y acompañado por la consultora Ericka Morales Franco. En este plan se presenta la nueva cara de Insivumeh reflejado en su nueva misión y visión:

- “Misión: Somos una institución técnico-científica que genera y difunde información geo-científica, a través de la recolección y procesamiento de datos para la toma de decisiones que contribuyan al beneficio de la población”.<sup>2</sup>
- “Visión: Ser reconocidos como una institución generadora de información geo-científica; confiable, efectiva y de calidad que impacte positivamente a la población”.<sup>3</sup>

Por otra parte, la filosofía estratégica fue construida con la información de las autoridades de primera y segunda línea de mando del Insivumeh, en la cual se plasmaron las ofertas y demandas que la institución tiene para con la comunidad; resalta: “...la vigilancia permanente de amenazas geofísicas, calidad en la información que se genera con personal calificado, de manera que pueda ser divulgada de forma oportuna, veraz y con análisis objetivo para la

---

<sup>2</sup> Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh*. p. 6.

<sup>3</sup> *Ibíd.*

toma de decisiones informadas...”<sup>4</sup> y para el caso específico de la sismología, se cuenta con personal de turno las 24 horas los 365 días del año que localiza y monitorea la actividad sísmica diaria relevante para la república, así como atiende situación de emergencia en momentos de sismos sensibles; emite los boletines, reportes especiales; es decir, genera información valiosa para la toma de decisiones.

---

<sup>4</sup> Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh*. p. 7.

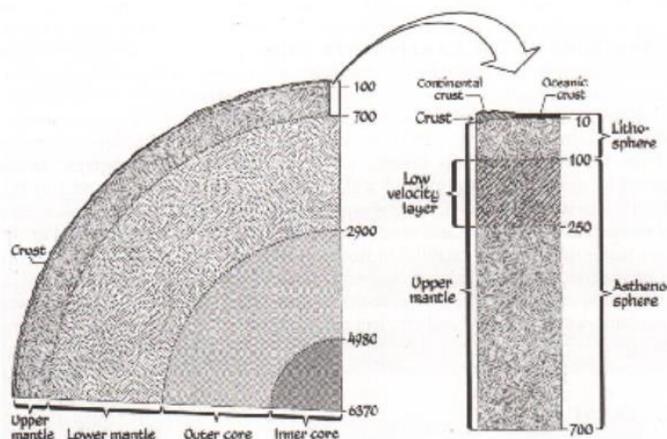


## 2. PLACAS TECTÓNICAS, FALLAS Y ORIGEN DE LOS SISMOS

Los avances científicos de los últimos años han ayudado a realizar diversos estudios y proponer distintas teorías sobre el interior de la tierra.

“...La Tierra está compuesto por varias capas de distintos grosores...”<sup>5</sup> tal y como se muestra en la figura 1 por su parte Kulhánek hace referencia: “...al analizar los sismogramas se puede apreciar una variación en los tiempos en que arriban las fases sísmicas según la profundidad del sismo...”<sup>6</sup>; valida de este modo la propuesta de la composición heterogénea del interior de la tierra.

Figura 1. Estructura interna de la Tierra



Fuente: OTA, Kulhánek. *Anatomy of Seismograms*. p. 10.

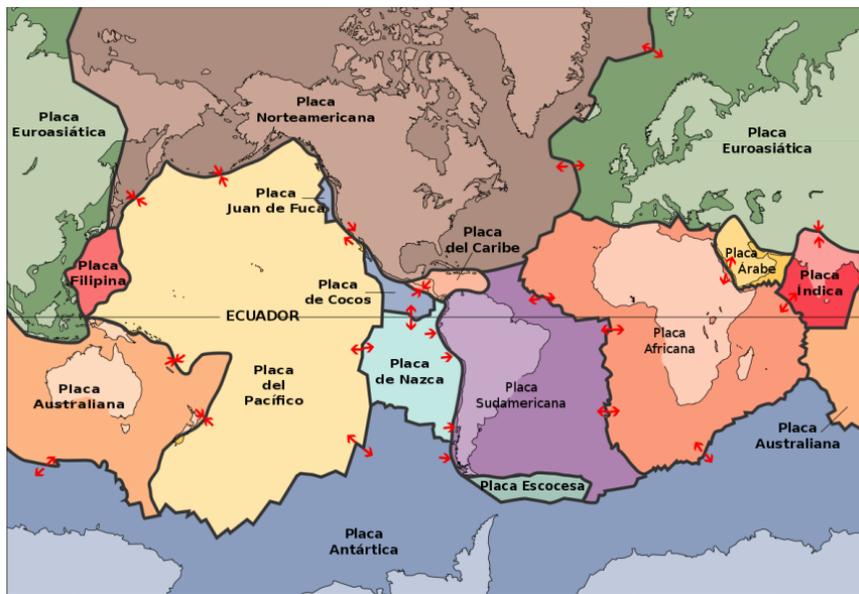
<sup>5</sup> TARBUCK, E.; LUDGEN, F. *Ciencias de la Tierra*. p. 3.

<sup>6</sup> OTA, Kulhánek. *Anatomy of Seismograms*. p. 22.

## 2.1. Estructura interna de la Tierra

A diferencia de la corteza oceánica, que tiene una composición química relativamente homogénea, la corteza continental consta de muchos tipos de rocas. El nivel superior de la corteza continental tiene la composición media de una roca granítica, mientras que la composición de la parte inferior de la corteza continental es más parecida al basalto.

Figura 2. Placas tectónicas



Fuente: OTA, Kulhánek. *Anatomy of Seismograms*. p.4.

Las rocas continentales tienen una densidad media de unos  $2,7 \text{ g/cm}^3$  y se han descubierto algunas cuya edad supera los 4 000 millones de años. Las rocas de la corteza oceánica son más jóvenes (180 millones de años o menos) y más densas (aproximadamente  $3,0 \text{ g/cm}^3$ ) que las rocas continentales.

### **2.1.1. Teoría de la tectónica de placas**

Esta teoría propone que los primeros 100 kilómetros de la superficie terrestre se comportan con un material rígido, quebradizo y poco denso, denominado litosfera. Esta descansa sobre una capa de material más denso y fluido denominado astenósfera. La litosfera no es una capa continua, está fragmentada en varios bloques o placas que se mueven con velocidades muy bajas y por ello surge:

“...El movimiento relativo entre las placas produce roces y deformaciones en los bordes o límites entre las placas y es principalmente allí donde se localizan la mayoría de sismos, volcanes y cadenas montañosas...”<sup>7</sup>.

La dirección del movimiento relativo y la composición de las placas determinan las características del límite o contacto entre las mismas, que son de tres tipos fundamentales:

- Divergente
- Convergente
- Transcurrente

### **2.1.2. Fallas geológicas**

Una falla es el plano en la estructura geológica el cual puede producir desplazamientos, acompañados de dislocaciones de roca, ya sea súbita y violentas.

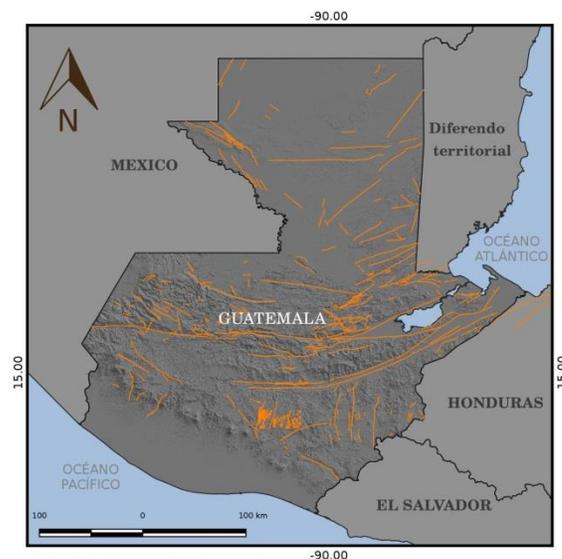
---

<sup>7</sup> UDÍAS VALLINA, A. *Fundamentos de sismología*. p.19.

No todos los sismos se generan en las zonas de contacto entre placas litosféricas adyacentes, muchos se originan en fallas geológicas, las cuales son producto del tectonismo local. No obstante, las fallas locales también están asociadas indirectamente al movimiento relativo entre placas litosféricas, pues los procesos tectónicos que las originan están relacionados con la interacción entre placas.

Por efecto del movimiento de placas se generan conmociones geológicas que dan lugar a las fallas, que no son más que rupturas, a lo largo de las cuales las paredes opuestas de la corteza terrestre se han movido una con relación a la otra.

Figura 3. **Mapa de fallas de Guatemala**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis 2.14.

Durante un sismo, un bloque de la corteza se desplaza respecto al bloque adyacente a lo largo del plano de falla. El plano de fractura está definido por su

orientación, por el ángulo de buzamientos y la dirección del desplazamiento. El desplazamiento en la roca puede ser horizontal, vertical, lateral o combinado.

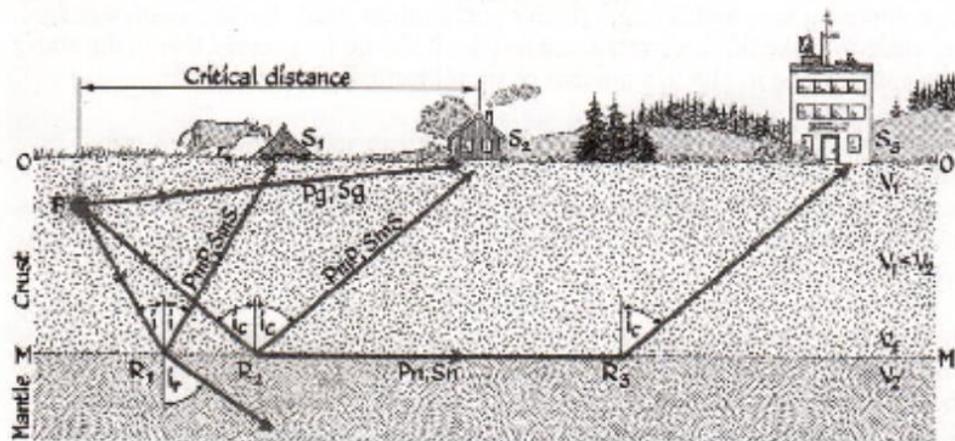
## 2.2. Movimiento del suelo y propagación de las ondas sísmicas

A continuación, se muestra el comportamiento de las ondas sísmicas.

### 2.2.1. Comportamiento de las ondas sísmicas

La propagación de ondas sísmicas a través del interior de la Tierra tiene el mismo comportamiento que las ondas de luz en la óptica, por lo que se pueden analizar matemáticamente con las mismas leyes. Si la velocidad de propagación y otras propiedades elásticas son uniformes a lo largo de la corteza de la Tierra, la onda sísmica se irradiaría desde el foco del sismo en todas las direcciones en forma de rayos.

Figura 4. Propagación de las ondas sísmicas



Fuente: OTA, Kulhánek. *Anatomy of Seismograms*. p. 21.

En general, la velocidad de onda sísmica incrementa con la profundidad y en consecuencia los rayos u ondas de propagación no son líneas rectas sino líneas cóncavas hacia arriba; sin embargo, para la sismicidad local se construye un modelo de velocidad compuesto de capas homogéneo, donde la propagación es rectilínea.

### **2.2.2. Modelo de velocidad**

Entre los modelos globales unidimensionales se pueden mencionar el modelo PREM, IASP91 y AK135 los cuales resultan del análisis de la propagación de las ondas sísmicas desde distintos puntos de vista, los cuales se describen a continuación, según información de IASPEI.<sup>8</sup>

- El modelo PREM se creó a partir de un gran conjunto de datos entre los que se puede mencionar: la observación de la propagación de ondas de superficie, información de tiempo de viaje travel-time para las ondas de cuerpo. Este modelo se considera en función de la profundidad la velocidad de la onda P, la onda S, véase anexo la tabla con los valores del modelo PREM en su versión isotrópica.
- El modelo IASP91 por su parte es un modelo de velocidad parametrizado en términos de un radio normalizado. Y el cual fue construido para representar las características de los tiempos de viaje travel-time de las principales ondas sísmicas. Para este modelo, la velocidad es considerada como un gradiente lineal.
- El modelo AK135 considera valores de densidad en la estimación de las velocidades, es decir, considera modelos de velocidad y densidad en

---

<sup>8</sup> IASPEI. *International Union of Geodesy and Geophysics*. p. 32.

función de la profundidad, por lo que a diferencia del modelo IASP91; este no es modelo parametrizado.

- Insivumeh utiliza un modelo local el cual es unidimensional y considera valores de espesores de capa, los cuales son homogéneas en su densidad; además, la velocidad de onda S se encuentra en función de la velocidad P por medio de la ecuación (colocar el número de la ecuación):

$$V_s = \sqrt{V_p}$$

Donde:

$V_p$  es la velocidad de la onda P

$V_s$  es la velocidad de la onda S

El software de análisis sísmico Seisan, realiza el cálculo de los tiempos de viaje *travel-time* con el comando *ttplot*, utilizando la información del modelo de velocidades del Insivumeh para los sismos locales y utiliza el modelo IASP91 para sismos regionales o distantes.

Tabla I. **Extracto del modelo local de velocidad del Insivumeh**

Profundidad <sup>†</sup> (km)	Velocidad de onda P (km/s)
0.0	3.50
1.0	5.00
6.0	6.00
13.0	6.80
35.0	8.00
200.0	8.26
300.0	8.50

<sup>†</sup> Se incluye el límite superior de la capa

Fuente: Insivumeh. <https://www.insivumeh.gob.gt/geofisica/sismologia/ANUAL/ANUAL2015/BSA2015.pdf>. Consulta: 15 de marzo de 2019.

### **2.2.3. Tipos de onda**

Según la clasificación estándar propuesta por IASPEI, se pueden clasificar en dos grandes grupos: ondas de cuerpo y ondas superficiales; las cuales se comportan de forma distinta una de la otra; esta agrupación se debe a la forma de propagación sobre la superficie terrestre.

#### **2.2.3.1. Ondas de cuerpo**

Son denominadas así ya que pueden desplazarse a través de la corteza terrestre a grandes profundidades; siguen caminos curvos debido a la densidad y composición de la corteza terrestre. Estas ondas siempre aparecen en los sismogramas y carecen de poder destructivo, las ondas de cuerpo se subdividen en:

- Ondas primarias: también llamadas onda P son las primeras en registrarse en un sismograma ya que éstas poseen mayor velocidad y dependiendo de la profundidad del sismo pueden existir distintas fases las cuales podrían apreciarse en el sismograma.
- Ondas secundarias: también llamadas onda **S**, se registran después de las ondas P en el sismograma, y de igual forma, pueden existir distintas fase en dependencia de la profundidad del sismo y el material por el cual atraviesa.

#### **2.2.3.2. Ondas superficiales**

Estas ondas viajan a lo largo de la superficie terrestre por lo que no tienden a adentrarse hacia capas más profundas de la corteza de la Tierra. Son las que tienen mayor capacidad de destrucción. Se pueden clasificar de la manera siguiente:

- Ondas Rayleigh: su principal característica es por un movimiento elíptico, también denominadas en inglés como *ground roll*, son ondas de periodo corto a largo que viajan a travez de la corteza terrestre.
- Ondas Love: se caracterizan por un movimiento ondulante horizontal. Son denominadas así por el matemático Augustus Edward Hough Love, quien desarrollo el modelo matemático de dichas ondas, en 1911.

#### **2.2.4. Refracción y reflexión**

Por lo general, la velocidad de onda varía con la profundidad y en consecuencia sigue una forma curva (cóncava hacia arriba), por lo que le

proporciona un recorrido temporal más corto a través de la corteza terrestre. Sin embargo, para fines de análisis se consideran varias discontinuidades en la tierra y al mismo tiempo, para simplificar la geometría de los rayos se asumen las consideraciones siguientes:

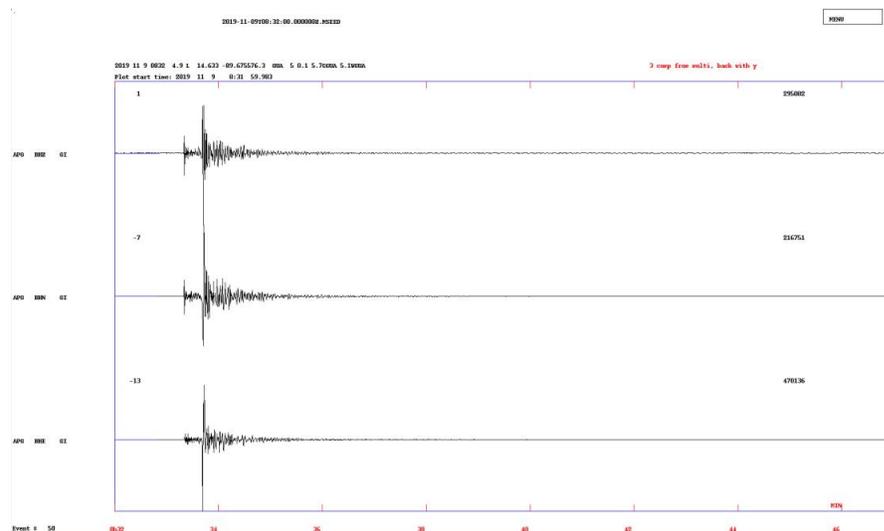
- La Tierra es esférica.
  
- La Tierra ésta conformada por un número finito de conchas las cuales tienen las siguientes características:
  - Homogéneas
  - Esferoidales
  - Concéntricas

Las proporciones elásticas varían para cada concha, pero son constantes en cada concha. Por otra parte, la distancia entre el foco y la estación asociada al punto de análisis es expresada como el ángulo subtendido entre dichos puntos y el centro de la Tierra; por lo que si la distancia fuera 111 kilómetros entre foco y estación, el ángulo correspondiente sería de 1 grado.

### **2.2.5. Análisis de un sismograma**

En la actualidad un sismograma es el registro digital del movimiento del suelo al momento de un evento sísmico, ver figura 5.

Figura 5. **Sismograma de la estación APG de la RNS del Insivumeh, sismo registrado el día 09 noviembre del 2019 a las 08:32 horas (UTC), procesado con el software SEISAN**



Fuente: Registros del Insivumeh.

En el sismograma existe al inicio una perturbación del suelo muy leve previo al arribo de las ondas P caracterizado como ruido ambiente; sin embargo, este es imperceptible para el hombre: la automatización de las localizaciones puede resultar difícil, si los niveles del ruido ambiente son mayores a los de las ondas sísmicas, por ello es necesario contar con sitios que tengan bajos niveles de ruido ambiente.

Luego se pueden apreciar las ondas P, éstas tienen en promedio una velocidad de propagación mayor a la de las ondas S; por otra parte, las ondas secundarias poseen una amplitud de onda mayor y su arribo se caracteriza por un cambio de frecuencia. Debido a la diferencia en las velocidad de cada una de las onda, éstas tendrán un distinto tiempo de arribo a la estación sísmica, el

cual se ve reflejado claramente en la gráfica de tiempos de viaje, o en inglés *travel-time*.

Otra característica que diferencia a cada ondas son las amplitudes máximas que pueden registrar, siendo las ondas superficiales las que pueden llegar a registrar mayor amplitud de todas, es por ello que las ondas superficiales poseen mayor potencial de destrucción.

Dependiendo la componente del sismograma observado, pueden aparecer únicamente las ondas love Q o solo las ondas rayleigh R.

Por último, la coda es el decaimiento de la onda conforme pasa el tiempo para llegar al nivel original de ruido ambiente. La duración de la coda puede variar en dependencia de la energía del evento sísmico.

En el monitoreo sísmico tectónico existen tres componentes, una vertical Z orientada al cenit, y dos horizontales N y E (norte-sur y este-oeste, respectivamente) En la figura 5, se observa la lectura de las tres componentes de la estación APG (aldea Apasote, municipio de Santa Cruz El Chol, departamento de Baja Verapaz, Guatemala), registro tomado del procesamiento de rutina del Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos del Insivumeh.

Los analistas del Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos del Insivumeh durante el procedimiento de rutina para localizar fases en el sismograma utilizan únicamente el canal vertical para la fase Pn (La n hace referencia al tipo de fase que el analista localiza) y la coda, mientras que para la fase Sn (en el caso se pueda localizar) únicamente los canales horizontales; esto debido a las características que presentan cada una de las fases.

Para el monitoreo 'cercano al tiempo real' SEISCOMP3 es el utilizado por el departamento de Investigación y Servicios Geofísicos del Insivumeh debido al corto tiempo que le toma procesar las formas de ondas; sin embargo, en muchos casos esta información al ser automática puede arrojar grandes incertezas (hasta cientos de kilómetros), por lo que es necesario realizar un análisis de cada localización.

La relocalización de los eventos sísmicos registrados es realizada por medio de SEISAN, por ser un software versátil en el manejo de la información, debido a la base de datos simple. Entre los diversos comandos que tiene la versión 11 de SEISAN para linux *ttplot* fue el requerido para la realización de esta tesis.

#### **2.2.5.1. Localización de un sismo**

Un evento sísmico cualquiera, produce diferentes tipos de ondas de cuerpo o superficiales, las cuales viajan a distintas velocidades, por lo tanto llegarán a distinto tiempo a una misma estación sísmica.

El método de triangulación se basa en la información registrada en tres o más estaciones para un mismo evento sísmico y registrar una localización manual. Sin embargo, SEISCOMP3 en su manual de usuario explica que el módulo *scautoloc*<sup>12</sup> no registrará algún origen con menos de un cierto número de fases, típicamente de 6 a 8, siendo 6 el mínimo absoluto. Sin embargo, en caso de eventos potencialmente peligrosos, puede ser conveniente recibir un alerta o aviso antes de alcanzar el conteo de fases mínimas; es decir, de registrar amplitudes muy grandes en un número suficiente de estaciones, es

---

<sup>12</sup> SCAUTOLOC es el módulo de SEISCOMP3 que realiza localizaciones preliminares o automáticas.

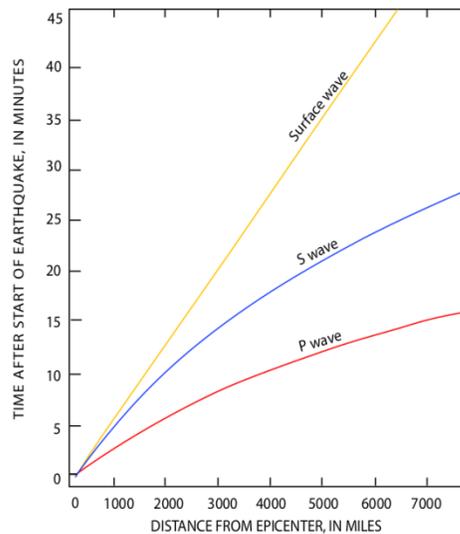
posible producir orígenes preliminares (denominados eventos XXL) basados en menos de 6 selecciones.

### **2.3. Gráfica de los tiempos de viaje *travel-time***

Las curvas de tiempo de viaje o *travel-time*, son gráficas del tiempo que le toman a las ondas sísmicas viajar desde el epicentro del sismo (distancia cero) hasta una estación de control (sensor sísmico). Estas curvas resultan del análisis de varios años de estudio, creando así los modelos de velocidades; estas curvas son utilizadas para realizar la localización de los sismos.

La figura 6 presenta una versión introductoria de una curva de tiempos de viaje donde se muestran las principales fases de un sismo, ondas P y ondas S y superficiales en rojo, azul y amarillo respectivamente; éstas gráficas pueden llegar a ser mucho más complejas, derivado de la refracción y reflexión de las ondas sísmicas produciendo el arribo de muchas más fases que las que aquí se presentan.

Figura 6. **Gráfica de los tiempos de viaje de las ondas**



Fuente: Iris. *Tiempo de viaje de ondas*. <https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/traveltime/>  
Consulta: 18 de febrero de 2019.

Cabe mencionar que la variación de los tiempos de arribo aumenta con la distancia entre el hipocentro y la estación de control, y este tiempo es valioso cuando de alerta se trata.

#### 2.4. Clasificación de los sismos

Se pueden encontrar distintas clasificaciones para la actividad sísmica; a continuación, se presentan las principales:

- Clasificación por su fuente sísmica: los sismos se clasifican de acuerdo a la fuente que los provoca; de tal manera, que en principio se distinguen dos grandes clases sismos naturales y sismos artificiales.

- Clasificación según la profundidad del foco: los eventos sísmicos de origen tectónico se clasifican dependiendo de dónde se localiza el hipocentro (sismos superficiales, intermedios y profundos); el proyecto RESIS II propone de igual forma 3 categorías (cortical, interfase e intraplaca).
- Clasificación según la distancia epicentral: los sismos de origen tectónico también se pueden clasificar según la distancia entre el foco del sismo y el punto de interés y estos son : sismos locales, regionales y distantes; cabe mencionar que la instrumentación puede variar según sea el objetivo de la vigilancia sísmica; es decir, se requiere de instrumentación adecuada para cada clasificación, por ejemplo: acelerómetros y periodo corto para sismos locales, y sensores de banda ancha para regionales o distantes.

#### **2.4.1. Tipos de secuencias sísmicas**

Los eventos sísmicos pueden ocurrir también en series o secuencias de eventos dependientes en el tiempo y espacio, entre las que se pueden mencionar son los enjambres, sismos principal y réplicas, entre otros.

#### **2.5. Magnitud, energía e intensidad sísmica**

Para un sismo existen varios parámetros para categorizarlo, siendo los más importantes: la magnitud e intensidad.

### 2.5.1. Magnitud de un sismo

La magnitud es el parámetro más fácil de medir ya que es cuantitativa e instrumental; a diferencia de la intensidad, es una constante y representa una medida del tamaño del sismo, independientemente del sitio de observación.

Existen varias escalas de magnitud, según el tipo de onda en que se basa la medición. En la actualidad, la magnitud que se reporta en los boletines del Insivumeh, es la magnitud coda.

La magnitud coda  $M_d$  está definida por la siguiente ecuación:

$$M_d = 2,4 \log(T_{coda} + 0,00046 \Delta - 0,72)$$

Donde:

$T_{coda}$  es el tiempo medido en segundos

$\Delta$  es la distancia epicentral en kilómetros

Esta magnitud es la ideal para sismicidad local (asociada muchas veces a la duración del sismo); la cual inicia con el arribo de la onda P y finaliza en el punto donde la señal sísmica ya no es visible por el ruido; cabe resaltar que la estimación de la  $T_{coda}$  puede variar según los criterios del analista o bien de la atenuación de la onda y el ruido ambiente.

“...se puede estimar una  $M_d$  para grandes eventos telesismicos, sin embargo, no es una rutina acostumbrada hacerlo para los observatorios sismológicos...”<sup>13</sup>

La  $M_l$  es la escala original de magnitud para un sismo y fue desarrollada por Charles Richter en 1935 para sismos locales de California; esta utiliza una escala logarítmica. Richter en su análisis, estableció una magnitud 3 a un sismo con las características siguientes:

- Amplitud máxima de 1 mm medido con el sismómetro Wood-Anderson
- Una distancia epicentral de 100 km.<sup>14</sup>

Es de hacer notar que el mismo sismo medido con otro sismómetro arrojará valores distintos, por ello, en la actualidad es necesario tener conocimiento sobre la respuesta instrumental y ecuaciones de transferencia, para calcular el valor máximo (en la unidad de medida) del sensor, posterior a ello poder convolucionar al sensor Wood-Anderson y poder empezar el proceso de la estimación de la  $M_l$ . En general la relación para determinar la  $M_l$  esta dada por la siguiente ecuación:

$$M_l = \log (A_{max}) + f (\Delta) + C$$

Donde:

$A_{max}$  es la amplitud máxima del sismograma.

$f (\Delta)$  es una corrección que depende de la distancia epicentral.

---

<sup>13</sup> HAVSKOV, J. y OTTEMOLLER, L. *Routine data procesing in Earthquake Seismology*. p. 160.

<sup>14</sup> El mismo sismo tendría una amplitud mayor para dicho sismómetro (Wood-Anderson) a una distancia menor; por ello en la actualidad es necesario hacer correcciones en función de la distancia epicentral.

$C$  Es una constante para escalar con la definición original de magnitud propuesta por Charles Richter.

El tamaño de un sismo también puede ser determinado con el momento sísmico  $M_0$  definido por la siguiente ecuación:

$$M_0 = \mu AD$$

Donde:

$\mu$  se asocia a la rigidez

$A$  es el área de ruptura

$D$  es el deslizamiento de la falla, llamado momento tensor

De esta manera, la magnitud de momento  $M_w$  se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$M_w = ( M_0 )$$

“...Para eventos sísmicos con magnitudes mayores a 5; se considera la  $M_w$  como la magnitud más significativa...”<sup>15</sup>.

### **2.5.2. Energía sísmica**

La liberación de energía durante un sismo es uno de los aspectos fundamentales. Gran parte de la energía se disipa en forma de calor y una parte es irradiada en forma de onda sísmica. La magnitud no representa la cantidad

---

<sup>15</sup> HAVSKOV, J.; OTTEMOLLER, L. *Routine data procesing in Earthquake Seismology*. p.178.

de energía liberada en sí, existe una expresión para representarla y es la que se muestra en la ecuación siguiente.

$$\log(E_s) = 11,8 + 1,5 M_s$$

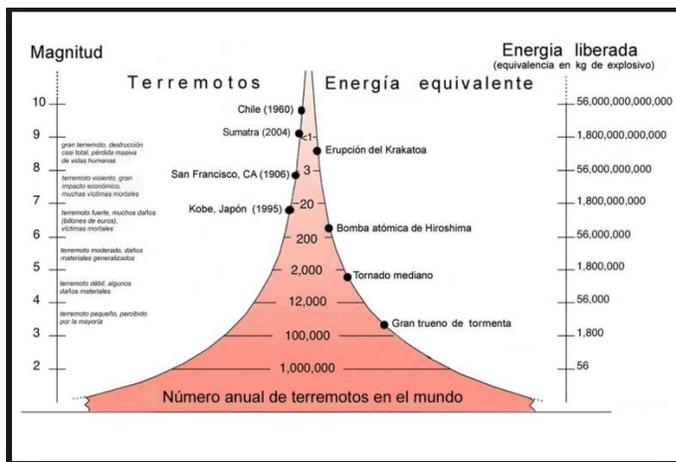
Donde:

$M_s$  es la magnitud superficial

$E_s$  es la energía irradiada por el sismo, medida en ergios

Esta relación es un valor aproximado de la energía liberada y no una medición exacta. Así pues un sismo de magnitud superficial 6, se estima que libera una cantidad de energía equivalente a  $6,3 \times 10^{20}$  ergios; es decir, la energía equivalente a 63 bombas atómicas, como se ve la figura 7.

Figura 7. **Comparativo de la energía liberada por un sismo y explosivos**



Fuente: Red Sísmica. <http://redsismica.uprm.edu/Spanish/educacion/terremotos/tamano.php>.

Consulta: 20 de enero de 2019.

### **2.5.3. Intensidad de un sismo**

La intensidad no es un valor único, es una medida de la fuerza del movimiento del suelo causado por un evento sísmico o el grado de vibración registrado en una localidad; la intensidad es variable ya que está en función del observador o del instrumento y esta varía a medida que se aleja del área epicentral o bien del tipo del suelo (atenuación o amplificación de la onda).

Existen dos formas para describir la intensidad:

- **Subjetiva:** la que está en función de la apreciación de un observador; es decir, mide los efectos aparentes producidos por un evento sísmico, es útil para describir los efectos de un terremoto, estimada por medio de encuestas con respuestas ponderadas.
- **Instrumental:** es la medida que se basa en el registro instrumental sobre la amplitud del movimiento del terreno y para ello se emplean parámetros como aceleración, velocidad y desplazamiento. La aceleración es expresada como un porcentaje de la gravedad y es usada para evaluar las fuerzas horizontales inducidas a una estructura durante un sismo.

La aceleración máxima PGA del terreno es un valor que representa la máxima sacudida de éste y es un valor que se usa para identificar la intensidad de determinado lugar.

#### **2.5.3.1. Escala de intensidad**

La intensidad de un sismo se asigna mediante una apreciación subjetiva de los efectos producidos por el evento sísmico y por lo tanto depende de la

distancia del observador al foco del sismo. Existen distintas escalas de intensidad; sin embargo, es la escala de intensidad de Mercalli modificada (IMM) que se utiliza por el Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos del Insivumeh; tiene un rango de I hasta XII. En la tabla I se describe esta escala.

Dentro de la escala IMM se pueden identificar claramente tres grandes grupos dentro de ésta escala, los cuales son:

- El rango (I - VI) le asigna el valor de intensidad al sismo en proporción a la cantidad de personas que percibieron el sismo (color celeste en la tabla I).
- El rango (VII - X) le asigna el valor según el grado de severidad de los daños en la infraestructura (color amarillo en la tabla I).
- El rango (XI - XII) le asigna el valor según los efectos y cambios geológicos que pudo haber causado el terremoto (color rojo en la tabla I).

El rango de intensidades IMM entre I y VI no es relevante en términos de riesgo sísmico; mientras que el 90 % del daño ocasionado por los terremotos corresponde a eventos con intensidades entre VII al XII, como se ve en la tabla II, donde a partir de VII del daño potencial puede ser moderado; sin embargo, cabe resaltar que el daño en una estructura dependerá de muchos factores: buena calidad de los materiales de construcción, mano de obra calificada, supervisión durante la construcción, diseño estructural adecuado, entre otros.

Tabla II. **Escala de Mercalli modificada**

<b>IMM</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>I</b>	El movimiento es tan leve que solo es registrado por los instrumentos.
<b>II</b>	Movimiento sentido por muy pocas personas en reposo o en niveles superiores de un edificio.
<b>III</b>	Movimiento sentido por pocas personas, movimiento similar al paso de un vehículo liviano.
<b>IV</b>	Movimiento sentido por muchas personas, vehículos estacionados se bambolean.
<b>V</b>	Personas dormidas se despiertan, las puertas se abren y cierra.
<b>VI</b>	Sentido por todas las personas, muchas sufren pánico y corren hacia el exterior.
<b>VII</b>	Dificultad para estar en pie, es percibido por conductores de vehículos en marcha.
<b>VIII</b>	Conducir vehículos se dificulta, daños considerables en estructuras.
<b>IX</b>	Pánico general, construcciones de mampostería totalmente destruidas.
<b>X</b>	Pánico general, construcciones de mampostería totalmente destruidas.
<b>XI</b>	Deslizamientos de tierra, ruptura de tubería de concreto enterrada.
<b>XII</b>	Destrucción total, ninguna edificación en pie, objetos son lanzados al aire.

Fuente: UDÍAS VALLINA, Andrea. *Fundamentos de sismología*. p. 95.

## 2.6. **Potencial sísmico**

El término potencial sísmico se refiere al grado de actividad sísmica de las fallas geológicas que representan un peligro para el sitio de estudio, clasificándolas según la cantidad de sismos que generan, la energía que liberan y los daños que ya han causado en la zona; es decir, la constante amenaza de las fuentes sísmicas para llegar a producir eventos capaces de causar daños en el sitio de estudio.

Las zonas de frontera en que las placas tectónicas ejercen fuerzas unas con otras, son desde luego, las fuentes sísmicas donde probablemente se origina la mayoría de los eventos sísmicos. Sólo aproximadamente un diez por

ciento de los sismos ocurren alejados de los límites de las placas. Otras fuentes sísmicas importantes son la actividad subterránea originada por un volcán en proceso de erupción.

Para lograr la identificación y evaluación de las fuentes sísmicas se deben considerar la evidencia geológica, la evidencia tectónica, la sismicidad histórica y la instrumentación sísmica de la zona. Ubicar la zona de estudio dentro de un marco tectónico definido con base en los elementos geológicos presentes en la región y la interacción que pudiera existir entre los mismos, es fundamental para alcanzar los objetivos.

## **2.7. Movimiento fuerte strong ground motion**

Los estudios de movimiento fuerte, *strong motion*, se enfocan en el área más susceptible a presentar daños, que es usualmente, el área cercana al epicentro. Para este objetivo se consideran dos mediciones: una es la aceleración propia del suelo y la otra es la segunda derivada de la aceleración, que representa el desplazamiento del suelo; la primera (la aceleración) es la que puede llegar a producir daños estructurales.

La fuerza del sismo que es proporcional a la aceleración, generalmente puede llegar a superar la capacidad de medición de un sismógrafo (registro saturado), lo que obliga al uso de acelerómetros. Los acelerómetros pueden registrar movimientos violentos de un sismo; sin embargo, no cuentan con la sensibilidad para el registro de sismos distantes. La ciencia del movimiento fuerte del suelo también trata las variaciones de la ruptura de fallas, tanto en el desplazamiento total, la energía liberada y la velocidad de ruptura.

A medida que los instrumentos sísmicos y en particular los acelerómetros se vuelven más comunes, se hace necesario correlacionar el daño esperado con las lecturas del instrumento. Como se explicó en el capítulo 2.5, la antigua escala de intensidad de Mercalli modificada, sigue siendo útil en el sentido de que cada nivel de intensidad proporciona una diferencia observable en el daño sísmico.

Después de muchos años de análisis y comparación de los registros históricos de aceleración y el daño resultante, se determinó que la aceleración máxima en el suelo PGA proporciona la mejor correlación con el daño en una estructura. El PGA simplemente expresa el pico máximo del registro de aceleración y por su lado PGV expresa el pico máximo de velocidad. Posterior a ello Wald en 1999 logró formular el siguiente cuadro donde se vincula PGA y PGV con escalas de intensidad con la de Mercalli modificada. Los registros de PGA y daño estructural analizados por Wald fueron para California.

Tabla III. **Relación del PGA (aceleración pico) y PGV (velocidad pico) con la IMM**

Sacudida percibida	No sentido	Débil	Suave	Moderado	Fuerte	Muy fuerte	Severo	Violento	Extremo
Daño potencial	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Muy poco	Poco	Moderado	Moderado a alto	Alto	Muy alto
PGA (%)	< 0.17	0.17–1.4	1.4–3.9	3.9–9.2	9.2–18	18–34	34 –65	65–124	> 124
PGV (cm/s)	<0.1	0.1–1.1	1.1–3.4	3.4–8.1	8.1–16	16–31	31–60	60–116	>116
IMM	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Fuente: elaboración propia.

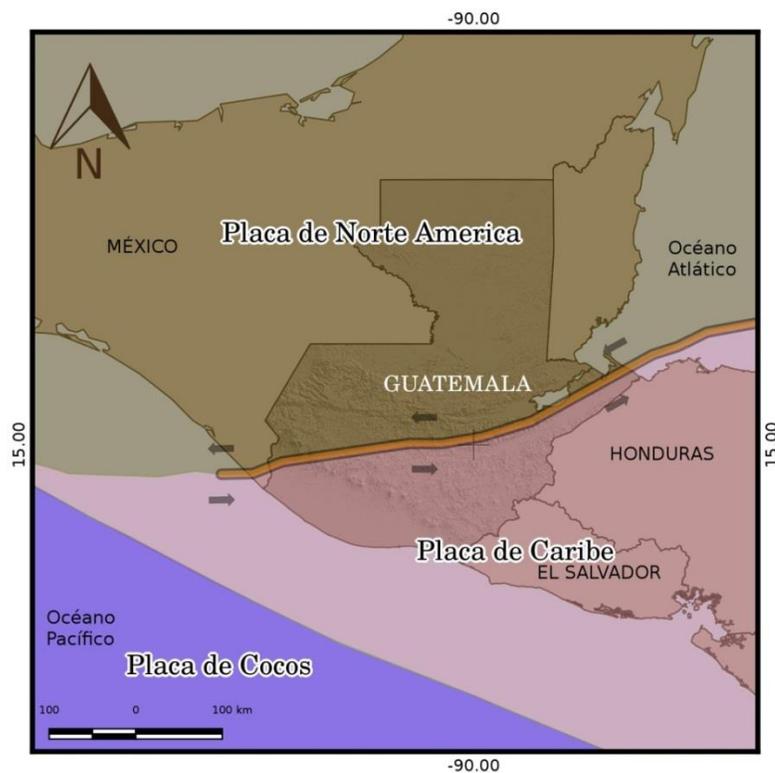
No se puede dejar de considerar el efecto del tipo de suelo; ya que estas condiciones pueden amplificar o atenuar significativamente los valores PGA y

PGV. Los efectos de sitio, como es denominado comúnmente, pueden llegar a ser el factor que determine el colapso de una estructura; entre estos efectos se puede mencionar la amplificación de la onda sísmica, la resonancia y la licuefacción del suelo; por ello es importante realizar estudios de suelos detallados para el diseño de una obra civil.

### 3. PLACAS TECTÓNICAS EN GUATEMALA

El territorio nacional interactúan tres placas tectónicas: Norteamérica (NA), Caribe (CA) y Cocos (CO); los movimientos relativos entre éstas determinan los principales rasgos topográficos del país y la distribución de los sismos. A continuación se presenta una breve descripción de cada una de ellas según la publicación de Guzmán-Speziale *La actividad sísmica a lo largo de Centro América* y las cuales se muestran en la figura 8.

Figura 8. **Placas tectónicas para Guatemala**



Fuente: elaboración propia, empelando Qgis 2.14.

- Placa de Norteamérica: es una placa tectónica continental que cubre América del Norte (incluyendo a Groenlandia). Las placas con las que limita son: al norte con la placa Euroasiática y al sur con la placa del Caribe; su principal punto de contacto es la falla del Motagua y Chixoy - Polochic (Guatemala) la cual debe considerarse como una zona y no como un límite. Véase figura 8 y figura 9.
- Placa de Caribe: los principales puntos de contacto son: al norte con Placa de Norteamérica produciendo una falla de transurrencia, la cual tiene un desplazamiento medio de 2 cm al año constituida principalmente por la falla de Motagua - Polochic (Guatemala). Por otra parte, tiene interacción de tipo convergente con la placa de cocos, véase figura 8.
- Placa de Cocos: es una placa tectónica debajo del océano Pacífico de la costa occidental de América Central. Sus límites son: al oeste con la placa del Pacífico, al sur con la placa de Nazca en ambos límites tiene un comportamiento divergente. La interacción con la placa del Caribe es de tipo convergente y tiene una velocidad media de 7 a 8 cm al año; donde su comportamiento es de subducción; genera el arco volcánico centroamericano, véase figura 8.

### **3.1. Límite entre las placas NA-CA**

Este límite está formado por tres sistemas de fallas con rumbo aproximado en dirección este-oeste como se puede observar en la figura 9 y son:

- Chixoy-Polochic: con una traza continua y clara en la mayor parte de su recorrido del territorio guatemalteco; sin embargo, al llegar al estado de

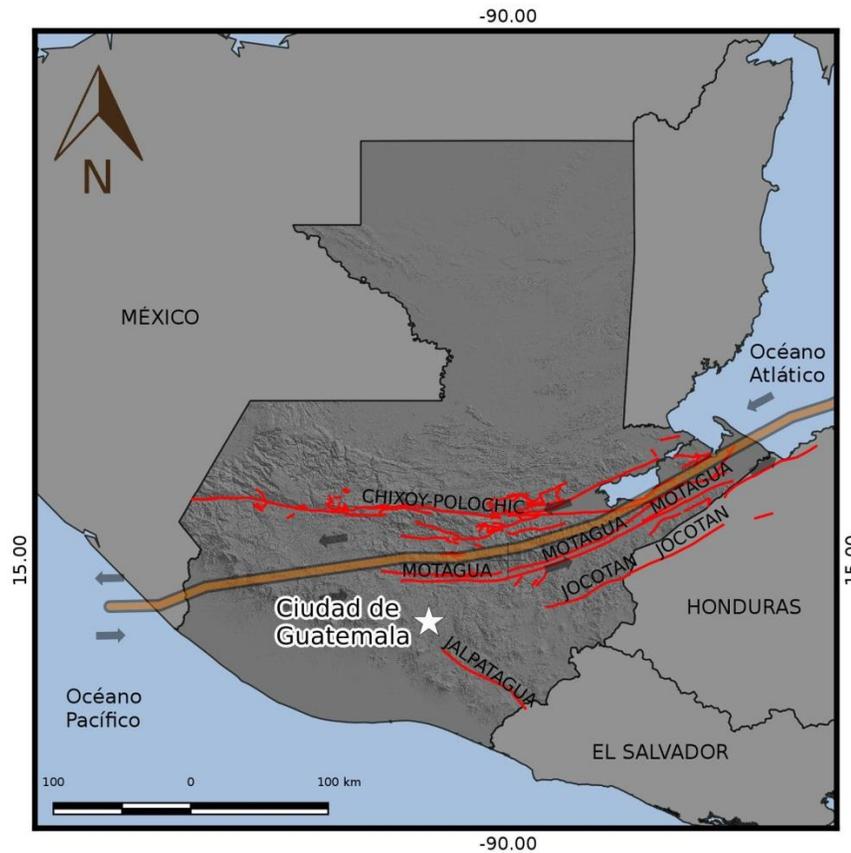
Chiapas, México, parece dividirse en dos ramales; por otra parte, en su extremo, este forma la cuenca del lago de Izabal.

- Motagua: es considerada la continuación de la falla de Swan (cisne) en el Caribe, formando la cuenca del río Motagua; luego al llegar al oriente del territorio guatemalteco su traza se pierde, el punto más cercano a esta falla se encuentra a solo 25 km al norte del centro de la Ciudad de Guatemala. "... El 6 de febrero de 1976 ocurrió el terremoto más devastador para Guatemala, con una magnitud 6,8 y con una longitud de ruptura de aproximadamente 230 km, el cual se extendió a lo largo del valle del Motagua hasta aproximadamente 50 km de la ciudad capital; provocando aproximadamente 23 000 muertes y 77 000 heridos; se estimó un monto de 1 100 millones de dólares el daño provocado por este evento sísmico..."<sup>18</sup>.
- Jocotán-Chamelecón: esta falla se extiende hacia el sur y es paralela con la falla del Motagua y es visible desde el oriente de Guatemala hasta el noroccidente de Honduras; sin embargo, su traza esta segmentada por fallas normales norte-sur y por su historial sísmico es considerada inactiva.

---

<sup>18</sup> Gobierno de Guatemala. *Simposio Internacional sobre el Terremoto de Guatemala, del 4 de febrero de 1976 y Proceso de Reconstrucción*. p. 30.

Figura 9. Límite entre la placa de Norteamérica y del Caribe

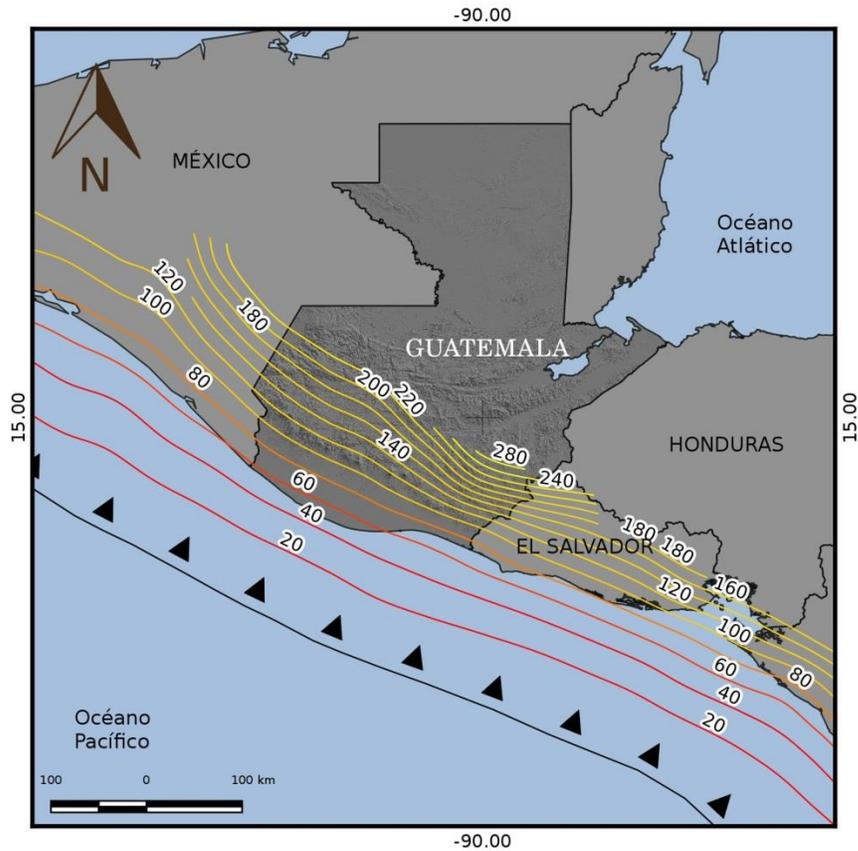


Fuente: elaboración propia, empleando Qgis 2.14.

### 3.1.1. Zona de subducción

La zona de subducción se extiende a lo largo de la costa pacífica de América Central y esta sísmicamente bien definida; se observa en la figura 10.

Figura 10. **Subducción de la placa de Cocos y la placa del Caribe**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis 2.14.

La ocurrencia de sismos en la zona de subducción en Centroamérica en tiempos históricos, ha sido bien documentada. Los sismos de subducción más grandes han ocurrido en los segmentos de la trinchera frente a las costas de Guatemala, El Salvador y Nicaragua.

“...A partir de la sismicidad histórica se conoce que en Centroamérica y en especial en la zona de subducción, pueden ocurrir sismos con magnitudes de

hasta  $M_w$  8,0. En el siglo XX, en la zona subducción de Centroamérica, se originaron 51 sismos grandes...”<sup>19</sup>.

### **3.1.2. Arco volcánico y fallas locales**

“... El arco volcánico de Centro América se extiende desde Guatemala, a partir del volcán Tacaná hasta el volcán La Yegua, en el Oeste de Panamá. A partir del año 1900 han ocurrido 32 sismos destructivos con magnitudes que van desde  $M_w$  5,7 hasta  $M_w$  6,9, a distancias de hasta 10 kilómetros del eje volcánico. En esta zona han ocurrido sismos superficiales con magnitudes pequeñas como  $M_w$  5,7, que han causado intensidades de hasta VII IMM a pocos kilómetros del epicentro, mientras que sismos de subducción menores a  $M_w$  7.0 no produjeron intensidades mayores a VI IMM.

En Guatemala el evento más grande asociado a la zona del arco volcánico ocurrió en 1930 en el sur-oriente con  $M_w$  6,9 – 6,8. Solo durante el siglo XX ocurrieron al menos cinco eventos producto del fallamiento local, que generaron intensidades mayor o igual a VII IMM. Los sismos que más daños causaron fueron los sismos reportados entre 1917 y 1918 con  $M_w$  entre 5,1 y 6,2 que destruyeron gran parte de la Ciudad de Guatemala...”<sup>20</sup>.

### **3.2. Zonificación sismogéncia**

La zonificación toma en consideración diversos criterios, como son las características geométricas de la zona donde se producen los sismos, similitudes en los patrones de fallamiento y sismicidad, mecanismos de ruptura, etc. Para este estudio, se utilizará la zonificación para Guatemala propuesta por

---

<sup>19</sup> OTERINO, Benito; MOLINA, E. *Amenaza sísmica en América Central*. p.31.

<sup>20</sup> *Ibíd.*

M. Benito y Mario Villagran en su libro *Amenaza sísmica en América Central* el cual se detalla a continuación: este libro surge como parte del proyecto RESIS II:

### **3.2.1. Cortical o superficial (0 a 25 km)**

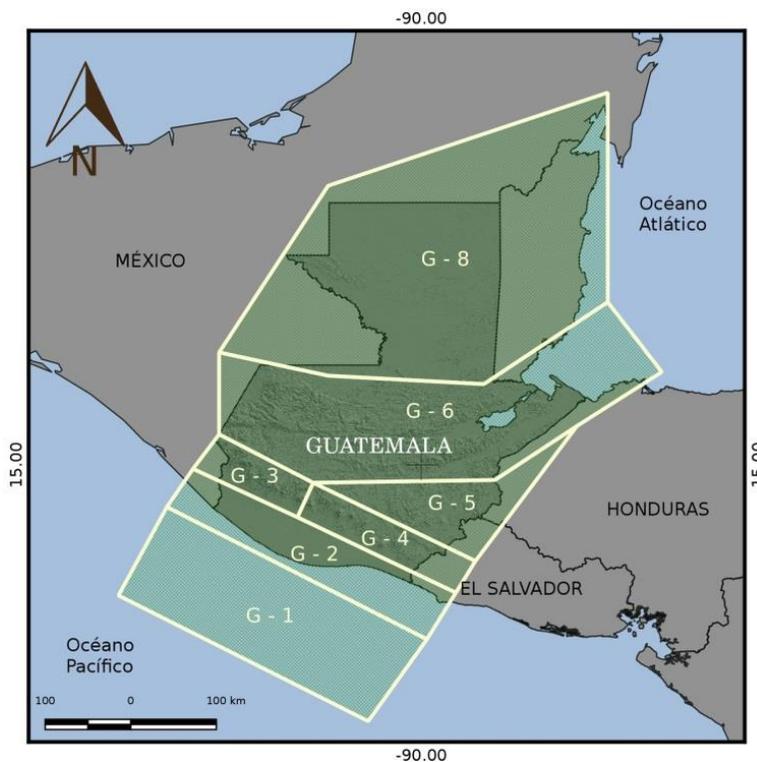
La zonificación cortical propuesta para Guatemala se describe a continuación y se muestra en la figura 11.

- Guatemala Pacífico Central G1: comprende la parte superficial de la subducción en el límite (CO-CA), entre la fosa mesoamericana y la línea de costa.
- Guatemala antearco G2: comprende la franja costera entre la cadena volcánica y la línea de costa de Guatemala y El Salvador.
- Guatemala arco volcánico oeste G3: es la franja de aproximadamente 40 kilómetros de ancho que incluye el arco volcánico, del volcán Tacaná en frontera con México hasta el volcán Atitlán.
- Guatemala arco volcánico este G4: es la sección del arco volcánico que se caracteriza por la ocurrencia de actividad sísmica tipo enjambre.
- Depresión de Honduras G5: es la zona bordeada por fallas normales con rumbo Norte. Esta zona empieza en la fractura entre la placa del Caribe y la de Swan.

- Guatemala Polochic Motagua oeste G6: es una zona de fallas paralelas de rumbo E-W y corrimiento lateral izquierdo (Chixoy-Polochic, Motagua y Jocotan-Chamelecon).
- Guatemala norte G8: esta es una zona de baja sismicidad y especialmente muy dispersa, que comprende el norte de Guatemala y Belice.

Cabe resaltar que la zona G7, es la extensión del límite (NA-CA) hacia el este, que estrictamente corresponde a la falla de Swan.

Figura 11. **Propuesta para la zonificación de sismos corticales**

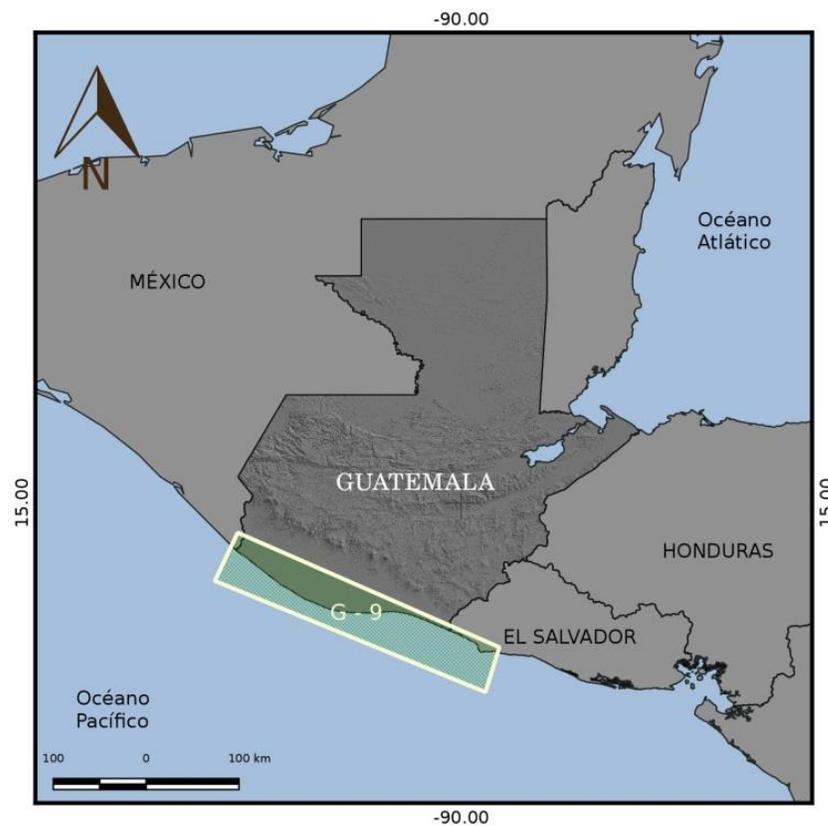


Fuente: elaboración propia, empleando Qgis 2.4.

### 3.2.2. Interfase o intermedia (25 a 60 km)

Está comprendida por una sola zona, la franja entre la trinchera y las costas de Guatemala, ver la figura 12, sismos para profundidades entre 25 y 60 kilómetros.

Figura 12. **Propuesta para la zonificación de sismos con profundidades entre 25 y 60 km**

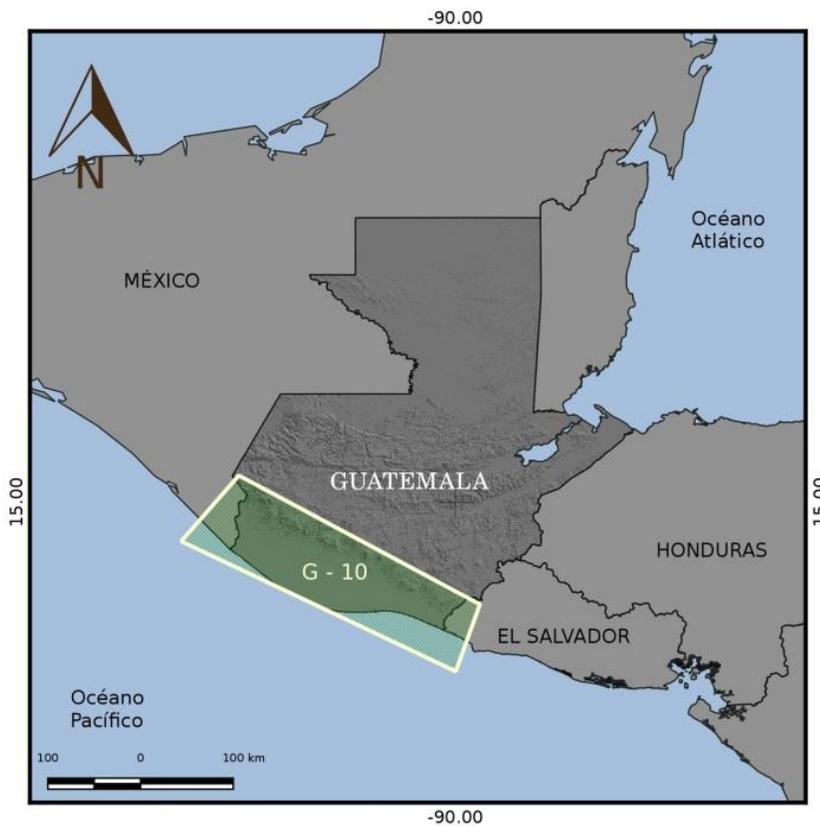


Fuente: elaboración propia, empleando Qgis 2.4.

### 3.2.3. Intraplaca *in slab* o profunda mayor a 60 km

Está comprendida por una sola zona, ver la figura 13, sismos para profundidades mayores a 60 kilómetros.

Figura 13. **Propuesta para la zonificación de sismos profundos**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis 2.4.

### 3.3. Red sísmica nacional

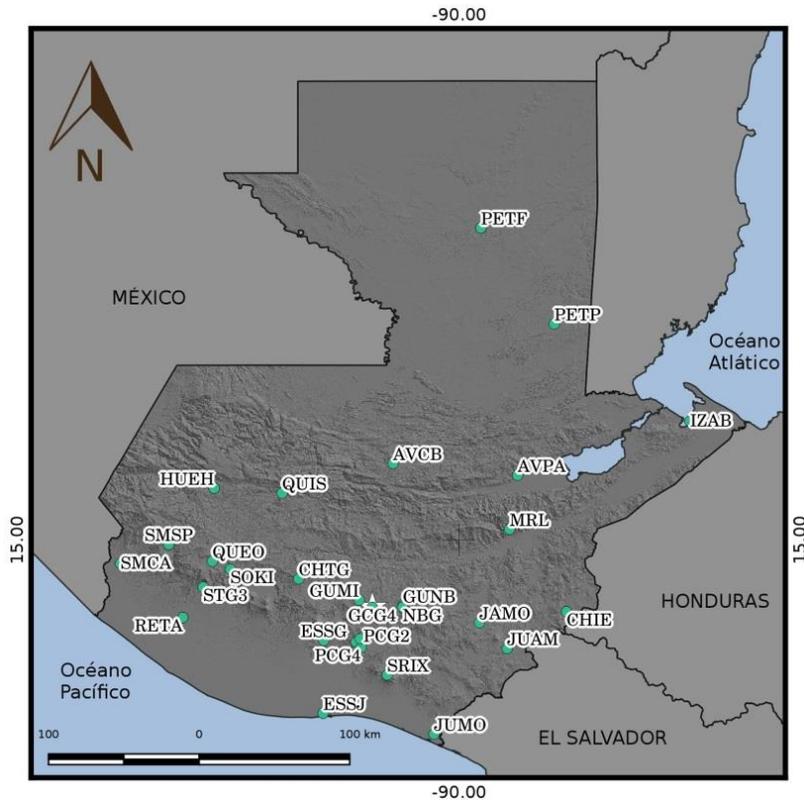
El Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos es la unidad del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología e Hidrología del Insivumeh, que

se encarga de realizar el monitoreo de la actividad sísmica relevante para Guatemala, por medio de la red sísmica nacional.

La RSN consta de estaciones sismológicas analógicas y digitales distribuidas en distintos puntos geográficos del país. La primera red sísmica del Insivumeh inició sus operaciones después del terremoto del 4 de febrero de 1976 y desde entonces el número de estaciones sismológicas ha cambiado con el tiempo.

En la actualidad cuenta con 5 estaciones de período corto, que transmiten las señales por ondas de radio UHF Y VHF a la central de datos del Insivumeh; a estas estaciones se les denomina analógicas. La información que llega a la sede central es procesada con el sistema de análisis sismológico SEISAN. Son analógicas ya que hasta que la información llega a la estación central es aquí cuando es digitalizada y sincronizada en los sistemas EARTHWORM Y SEISLOG.

Figura 14. **Distribución de las estaciones digitales dentro del territorio nacional**



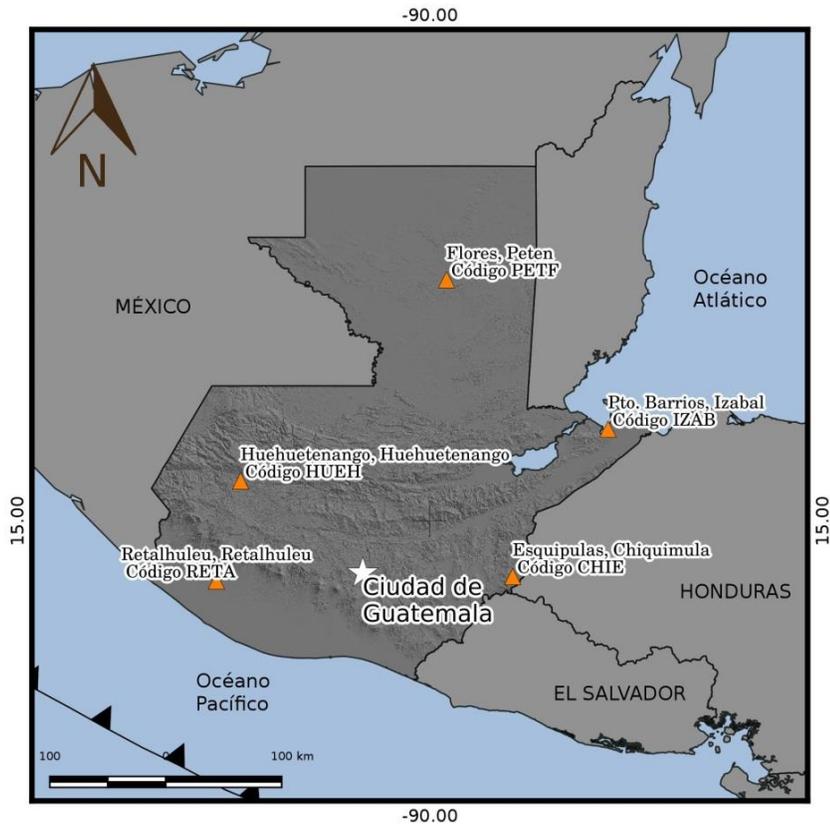
Fuente: elaboración propia, empleando Qgi 2.14.

A partir del año 2013 la RSN fue ampliándose con nuevas estaciones sismológicas digitales (son denominadas digitales ya que la información registrada por el sensor es digitalizada en la estación y luego transmitida a la central para su posterior análisis) hasta llegar a tener 5 de banda ancha, 5 de banda 'intermedia', 13 de período corto y 5 acelerómetros, las cuales envían las señales por distintos medios de los siguientes métodos de transmisión: VSAT, *Very Small Aperture Terminal*, y VPN, *Virtual Private Network*.

Las señales transmitidas desde las estaciones hacia el Insivumeh son sincronizadas con el sistema SeedLink y posteriormente analizadas por el personal técnico de la unidad de sismología con el sistema de análisis sísmológico SeisComp3 que utiliza el algoritmo scautoloc para la localización y caracterización de los eventos sísmicos basado en el modelo de capas iasp91, para el procesamiento de localizaciones automáticas. En la figura 15 se muestra la distribución de estaciones de banda ancha y acelerómetros utilizadas para este estudio.

Por otra parte, la red digital ha variado con el tiempo, tanto en las localizaciones de las estaciones como en los tipos de sensores. En la figura 14 se muestra el mapa con todas las estaciones dentro de la república de Guatemala para el años 2019; en su mayoría son estaciones de período corto de marca Sixaola versiones 1, 2, 3 y 4; el resto de sensores de la RSN son de banda ancha, intermedia y acelerómetros de marca Guralp. Además, se cuenta con instrumentación instalada cerca de los volcanes Fuego y Santiaguito la cual tiene como principal función la vigilancia volcánica; sin embargo, estos sensores también ayudan al vigilancia sísmica.

Figura 15. **Distribución de las estaciones de banda ancha y acelerómetros dentro del territorio nacional**



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis2.14.

## 4. REGISTROS SÍSMICOS DE GUATEMALA

### 4.1. Catálogo sísmico

Un catálogo sísmico consta de toda la información relevante al estudio de la actividad sísmica en un período determinado de tiempo; entre la información mínima que debe tener un catálogo sísmico se tiene:

- Tiempo de origen de los sismos
- Coordenadas del epicentro (latitud y longitud)
- Profundidad del foco
- Magnitud del sismo

Un catálogo sísmico puede ser tan extenso, como variables sea capaz de monitorear en su rutina diaria una agencia sismológica; además, de la estimación del hipocentro de los sismos, también, se pueden calcular los valores de PGA, PGV, IMM.

Es de hacer notar que para la buena calidad de un catálogo hay que considerar aspectos técnicos de la instrumentación (tipo de sensor) o bien aspectos cuantitativos como lo es la cantidad de estaciones utilizadas para la localización.

Los valores de error en las coordenadas y profundidad presenta gran importancia en la calidad del dato en un catálogo; a su vez, los valores residuales (rms) producto de la convergencia de una solución durante el

proceso de la localización sísmica reflejan la calidad de la solución obtenida la cual no debe de confundirse con la exactitud de la localización.

#### **4.2. Registros sísmicos del Insivumeh**

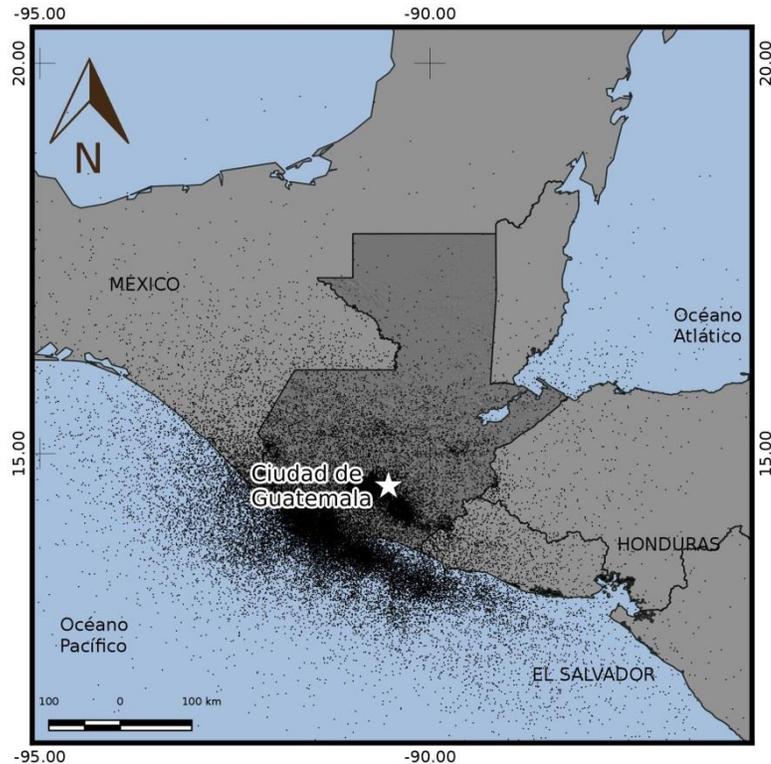
El catálogo histórico digital de Insivumeh tiene su origen a partir del año de 1984 y de esa fecha al momento que se realizó este estudio, el Insivumeh ha registrado un total de 51,734 sismos; entre ellos se encuentran sismos locales, regionales y distantes como se puede ver en la figura 16; los epicentros se agrupan formando una tendencia en su localización, tal y como los describe la zonificación de RESIS II para Guatemala; al hacer la clasificación y conteo de estos sismos, se obtuvieron los siguientes resultados: RESIS II, es un proyecto regional financiado por el gobierno de Noruega, bajo la gestión del CEPREDENAC para el estudio de la amenaza sísmica en Centro América.

Tabla IV. **Conteo sísmico según la profundidad**

<b>Profundidad</b>	<b>Cantidad sismos</b>
Cortical	19 765
Interfase	19 887
Intraplaca	12 082

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Mapa con la sismicidad registrada por Insivumeh desde enero de 1984 a febrero de 2018**



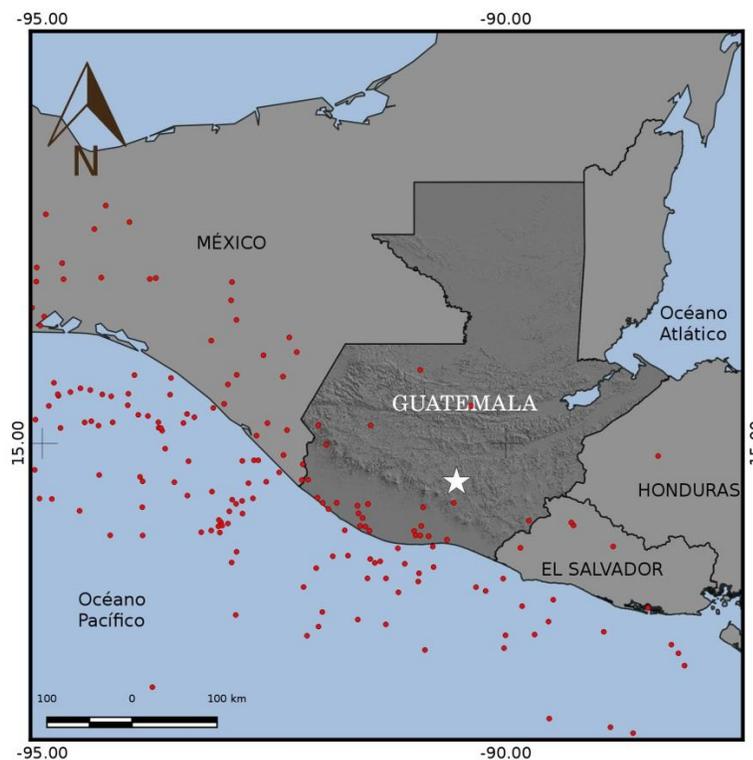
Fuente: elaboración propia, empleando Qgis 2.14.

### 4.3. Sismos relevantes para la Guatemala

Dada la gran actividad sísmica registrada en el país (el Insivumeh registra alrededor de 1 500 sismos al año) y de la cual no todos los sismos representan una amenaza para la población, el catálogo fue construido basado en los registros de los últimos 7 años, aparte de considerarlo como una muestra representativa, se toma esta cantidad de años ya que en el 2013 se instalan los primeros acelerómetros en Guatemala por parte de Insivumeh y este es un parámetro que será utilizado posteriormente como filtro para el catálogo; para el

período de tiempo (enero 2013 – febrero 2019), el Insivumeh tiene registrados 229 sismos con magnitudes mayores a 5 como se puede ver en la figura 17, por lo que fue necesario realizar un filtrado de la información para considerar los eventos sísmicos más relevantes para Guatemala; por lo que se consideraron aquellos eventos sísmicos con registros de aceleración, y de esta forma enfocar la selección al movimiento fuerte. De esta depuración se obtuvo un total de 14 sismos, véase tabla IV.

Figura 17. **Mapa de los sismos con magnitud mayor a 5 registrados por Insivumeh**



Fuente: elaboración propia, empelando Qgis 2.14.

Tabla V. **Registros de los eventos sísmicos de movimiento fuerte del Insivumeh**

FECHA	Hora	Latitud	Longitud	Profundidad	Magnitud *
2013-09-07	00:13:31	14.61	-92.13	58.90	6.50
2014-06-16	10:04:28	15.20	-92.02	13.00	5.10
2014-07-07	11:24:01	14.61	-92.20	103.30	6.40
2014-08-28	08:27:46	14.06	-91.74	25.50	5.50
2015-12-17	19:49:16	17.08	-96.00	0.30	5.80
2016-06-15	13:46:59	14.20	-91.55	28.30	5.30
2017-06-14	07:29:05	14.99	-91.94	115.40	6.90
2017-09-08	04:49:22	15.14	-93.71	81.10	7.70
2017-11-04	18:12:30	13.78	-91.87	33.50	5.00
2018-04-08	05:08:22	13.79	-91.70	35.40	5.10
2018-08-04	05:46:07	13.60	-90.94	26.10	5.10
2018-10-12	21:09:48	14.06	-91.47	49.10	5.10
2018-10-28	22:24:04	13.89	-90.79	93.40	5.10
2019-02-01	16:14:13	14.88	-92.40	64.70	5.50

\*La magnitud reportada por INSIVUMEH es Coda

Fuente: elaboración propia.

Luego a este catálogo se procedió a realizar un último filtro tomando como parámetro aquellos sismos que al menos en una estación de la RAN registraran una aceleración pico (PGA) igual o mayor a 1,4 % de G; se consideró este umbral como parámetro en la categorización de los sismos porque en condiciones favorables, una persona podría reportar este sismo como sensible, situación que podría generar algún tipo de alarma en la población.

R. Wald en su análisis, sintetizado en la tabla II (ver capítulo 2.7) le asigna una intensidad de IV IMM a los PGA que se encuentran entre el rango de 1,4 y 3,9 % de g; es importante mencionar que con estos valores de aceleración el daño potencial en una estructura podrían no ser significativos. Sin embargo, esto dependerá de las condiciones en que la estructura fue diseñada y construida sin dejar de mencionar la calidad de los materiales de construcción;

en resumen una supervisión técnica-calificada en cada etapa que tiene la ejecución de una obra de ingeniería civil.

Este proceso dio como resultado un total de 9 sismos de movimiento fuerte para el período de tiempo entre enero 2013 a febrero 2019. Véase tabla V, esta tabla muestra la información preliminar y revisada por Insivumeh; muestra la siguiente información: tiempo de origen (tiempo en que se originó el sismo), coordenadas del hipocentro, PGA, IMM y la fuente sísmica asociada; la localización de los epicentros se muestra en las figura 18.

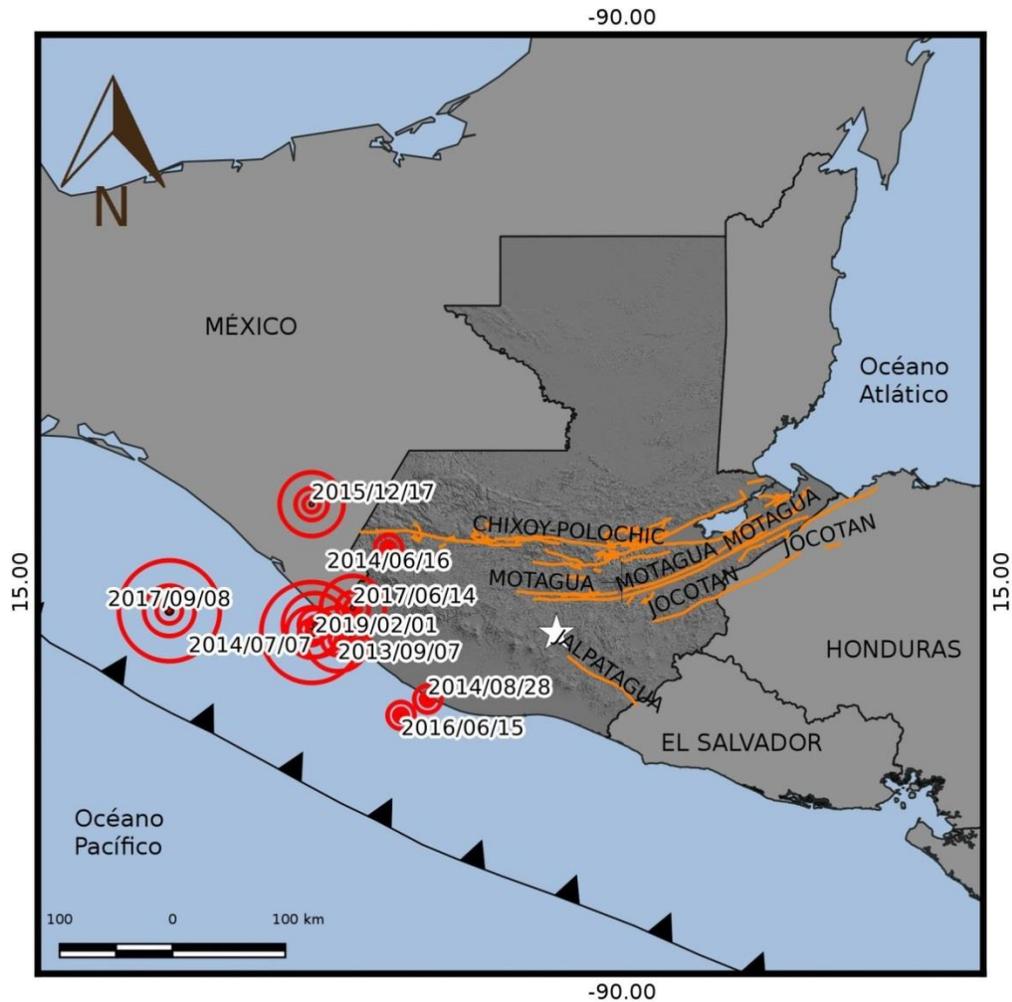
**Tabla VI. Registros del Insivumeh para los eventos sísmicos relevantes para Guatemala**

FECHA	INFORMACION PRELIMINAR					INFORMACION REVISADA							
	T. ORIGEN (UTC)	LAT.	LONG.	PROF. (km)	MAGNITUD	LAT.	LONG.	PROF. (km)	MAGNITUD	EST.	PGA (%G)	IMM MAX.	FUENTE SÍSMICA
2013-09-07	00:13:31	14.61	-92.13	58.90	6.5 CGUA	14.537	-92.311	67.6	6.6 LGUA	RETA	4.83	V	INTERFASE
2014-06-16	10:04:28	15.20	-92.02	13.00	5.1 CGUA	15.278	-91.898	15	5.6 LGUA	HUEH	1.87	IV	CORTICAL
2014-07-07	11:24:01	14.61	-92.20	103.30	6.4 CGUA	14.593	-92.523	73.3	6.8 LGUA	RETA	6.83	V	INTRAPLACA
2014-08-28	08:27:46	14.06	-91.74	25.50	5.5 CGUA	14.05	-91.58	43.1	5.3 LGUA	RETA	1.62	IV	INTERFASE
2015-12-17	19:49:16	17.08	-96.00	0.30	5.8 CGUA	15.637	-92.524	70.3	6.5 LGUA	HUEH	1.5	IV	INTRAPLACA
2016-06-15	13:46:59	14.20	-91.55	28.30	5.3 CGUA	13.918	-91.797	48.4	5.8 LGUA	RETA	2.32	IV	INTERFASE
2017-06-14	07:29:05	14.99	-91.94	115.40	6.9 CGUA	14.793	-92.189	106.7	6.5 LGUA	RETA	3.83	IV	INTRAPLACA
2017-09-08	04:49:22	15.14	-93.71	81.10	7.7 CGUA	14.769	-93.681	79.2	8.1 WGUA	HUEH	9.45	VI	INTRAPLACA
2019-02-01	16:14:13	14.88	-92.40	64.70	5.5 CGUA	14.654	-92.498	66.8	6.3 LGUA	HUEH	3.08	IV	INTRAPLACA

(LGUA) MAGNITUD LOCAL ; (CGUA) MAGNITUD CODA ; (IMM) INTENSIDAD MERCALI MODIFICADA ; (LAT.) LATITUD ; (LONG.) LONGITUD ; (EST) ESTACIÓN SÍSMICA

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Mapa con los epicentros de los eventos sísmicos relevantes de movimiento fuerte para Guatemala



Fuente: elaboración propia, empleando Qgis 2.14.

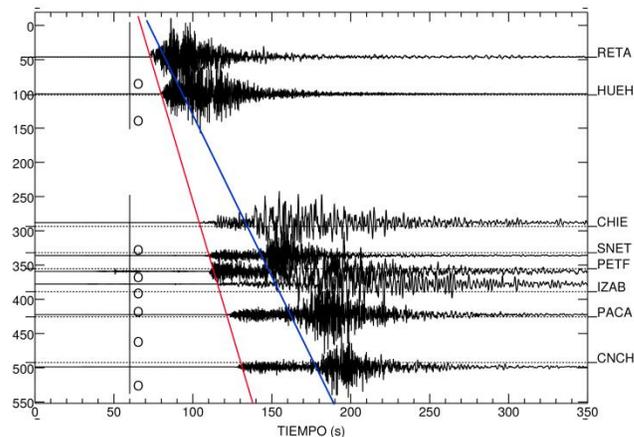


## **5. MARCO METODOLÓGICO**

### **5.1. Análisis de los sismogramas**

Para determinar el tiempo de alerta, es necesario conocer cómo se propagó la onda para cada sismo del catálogo depurado, para lo cual fue necesario implementar el software Seismic Analysis Code (SAC). Este programa requiere de generar código fuente para el procesamiento y la generación de las curvas de tiempo de viaje de una o varias series de tiempo (sismograma), por lo cual fue necesario desarrollarlo, y así poder crear las curvas de tiempo para cada uno de los sismos del catálogo depurado, dichas líneas de código se encuentra en el apéndice.

Figura 19. **Sismogramas ordenados según la distancia epicentral sismo registrado el día 06 de septiembre a las 16:13 del año 2013**

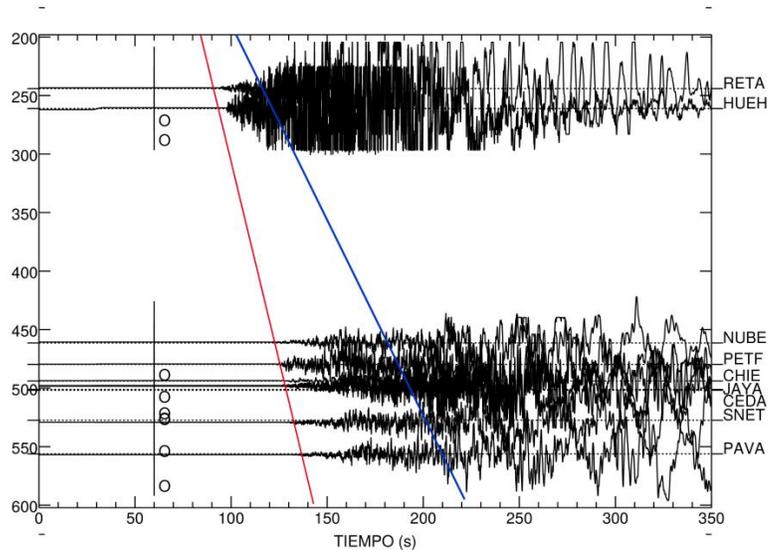


Fuente: elaboración propia, empleando SAC.

En la figura 19 se observa el primer análisis realizado; en el que se muestran las formas de onda para el sismo con epicentro en las costas del Pacífico, frontera entre Guatemala y México, asociado a la subducción en la región intraplaca registrado con una magnitud 6,4, dichos sismogramas están alineados al tiempo de origen del sismo y ordenados de forma descendente según la distancia epicentral; la escala es la que en eje vertical en lado izquierdo representa la distancia epicentral en km, mientras que del lado derecho se muestran los códigos de las distintas estaciones.

La línea roja muestra el arribo de la onda P, mientras que la línea azul muestra el arribo de la onda S, cabe resaltar que aunque aquí se muestran como líneas rectas solo es una aproximación, estas pueden llegar a presentar un comportamiento curvo conforme el registro sísmico se aleja del origen.

Figura 20. **Sismogramas ordenados según la distancia epicentral sismo registrado el día 07 de septiembre a las 20:49 del año 2017**



Fuente: elaboración propia, empelando SAC.

## 5.2. Estimación de los tiempos de alerta

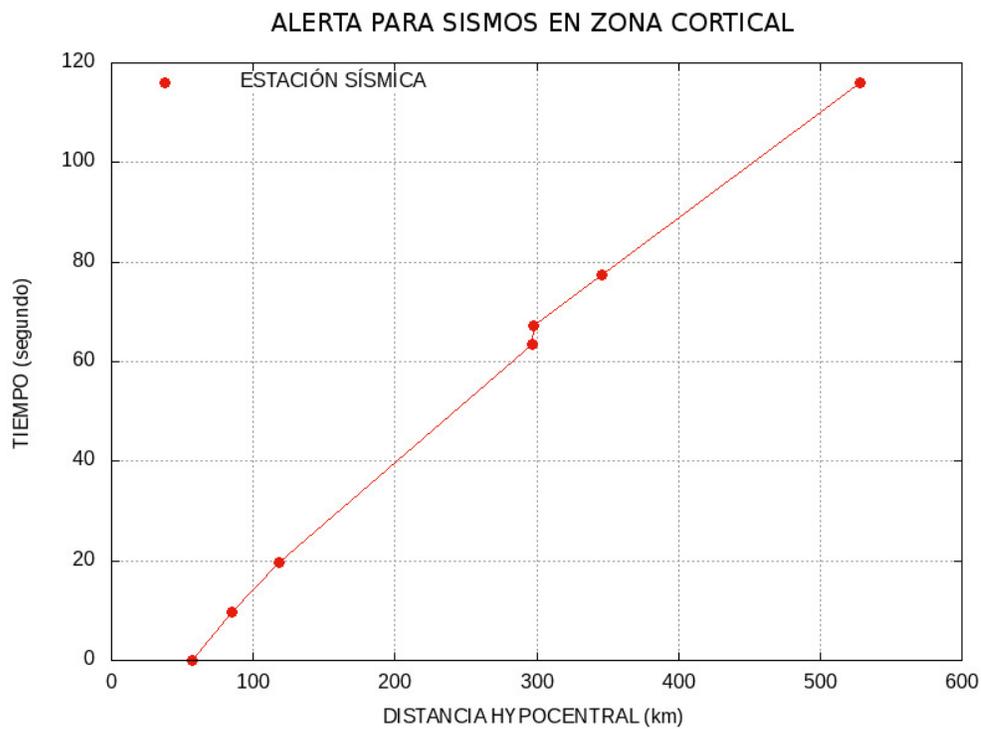
A continuación, se muestran los tiempos de viaje del catálogo depurado.

### 5.2.1. Tiempos de viaje del catálogo depurado

Para la estimación de los tiempos de alerta se procedió a graficar las curvas de los tiempos de viaje *travel time* de cada uno de los sismos del catálogo depurado (9 sismos de movimiento fuerte); sin embargo, a continuación se presentan únicamente el consolidado en una gráficas para cada una de las zonas (corticales, interfase e intraplaca) véase en los apéndice las gráficas de

tiempos de viaje para cada sismo más detallado y con sus respectivos sismogramas.

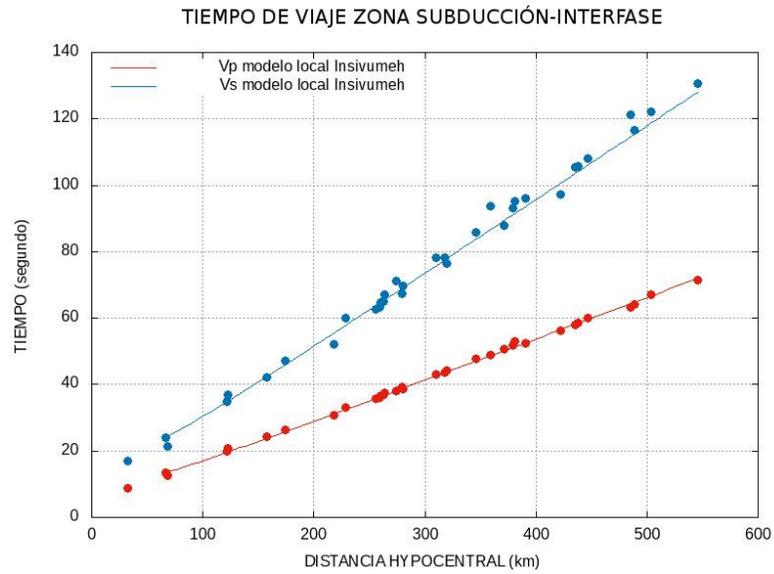
Figura 21. **Gráfica de los tiempos de viaje para los sismos corticales**



Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

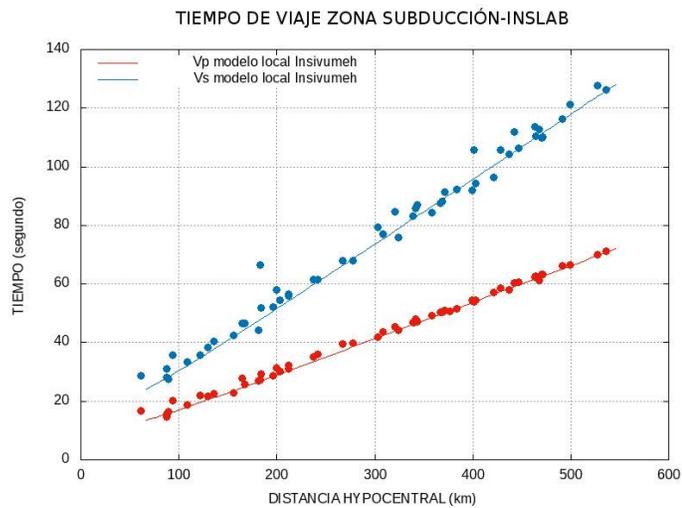
Cabe resaltar que el modelo de velocidad del Insivumeh no se ajusta al arribo de las fases analizadas como se puede ver en la figura 21, aunque podría deberse a los pocos datos analizados (un sismo). Caso contrario, el modelo tiene una correlación (visual) muy aceptable para las fases analizadas en la zona de subducción en general, tanto para la región interface como para intraplaca véase figuras 22 y 23; por tanto, es importante ampliar este análisis, ya que el modelo de velocidades es fundamental para la obtención de bajos residuales en las localizaciones.

Figura 22. **Gráfica de los tiempos de viaje para los sismos interfase**



Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Figura 23. **Gráfica de los tiempos de viaje para los sismos intraplaca**



Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

### **5.2.2. Tiempos de alerta**

A continuación, se describe el proceso que se siguió para la obtención de los tiempos de alerta.

- **Categorización del sismo**

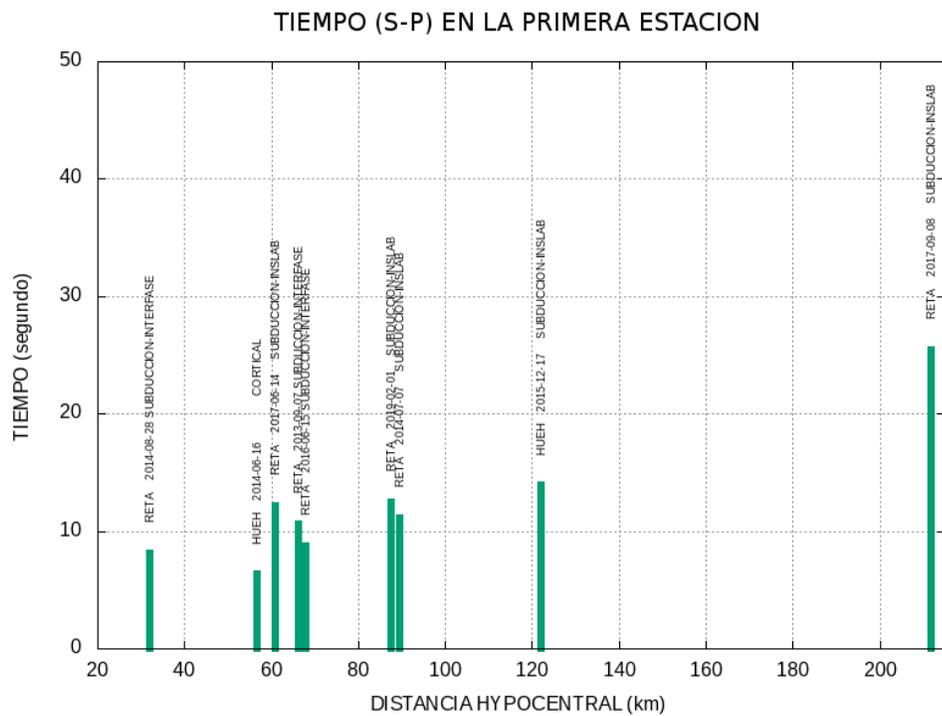
Se calculó la diferencia de tiempo entre el arribo de la onda S y onda P a la primera estación considerando que con esta relación de amplitudes se podría suponer el tamaño del sismo, véase figura 24. Como era de esperarse, los valores de S-P son proporcionales a la distancia hipocentral, de ahí la importancia de contar con una red sísmica densa para poder disminuir estos tiempos; por otra parte al categorizar el sismo en la primera estación ésta no tendría tiempo de alerta.

Cabe resaltar que la información aquí presentada se analizó considerando que el evento es de movimiento fuerte; es decir, ya conocemos el efecto que tuvo el sismo; en la actualidad, el SEISCOMP3 requiere de al menos 6 estaciones para declarar un evento sísmico, para tal caso se necesita tener una cobertura de al menos 6 estaciones en una extensión de 12 321 kilómetros cuadrados, obteniendo como resultado un total de 53 estaciones para la extensión territorial de Guatemala.

También, resulta útil considerar que esta densificación de la red podría realizarse con instrumentación de bajo costo, ya que para la sismicidad local y sobre todo para sismos con magnitudes mayores a 5, las frecuencias pueden superar el ruido cultural, por lo que los sensores de periodo corto podría ser una solución factible para implementar y lograr un óptimo proceso de localizaciones automáticas para sismos locales con magnitud superior a 5.

Por otra parte, el módulo SCAMP de SESICOMP3 puede realizar el análisis de amplitud como se consideró en este estudio y para su óptimo funcionamiento es imperante contar con la una densificación de acelerómetros para que esta solución cumpla su propósito. Para el año 2019 Guatemala cuenta con una relación de 0,28 acelerómetros por un millón de habitantes.

Figura 24. **Gráfica del tiempo de categorización del sismo**



Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

- Luego se procedió a calcular los distintos tiempos de alerta con la ecuación que se muestra a continuación. Se consideró que el tiempo de activación de la alerta sería justo después del arribo de la fase S a la primera estación.

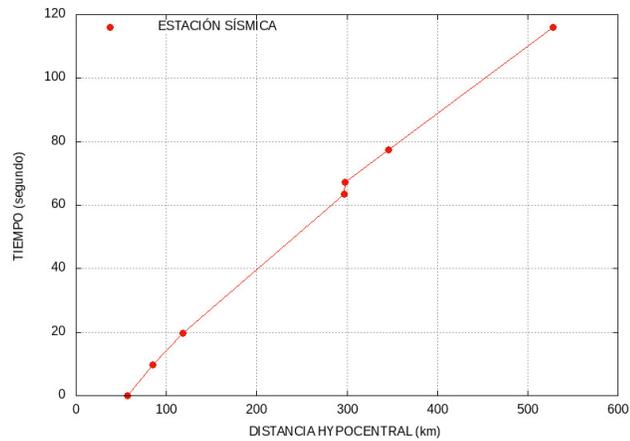
$$Alerta = Fase "S"_{estación-1} - Fase "S"_{primera estación}$$

Es importante resaltar que se requiere información de más sensores para poder realizar un muestreo dentro del territorio nacional, mientras eso no suceda cualquier investigación solo arrojará valores aproximados.

Para este análisis, se tomó únicamente las estaciones de banda ya que para Guatemala estas ubicaciones tienen la característica de tener este sensor y además un acelerómetro en el mismo sitio.

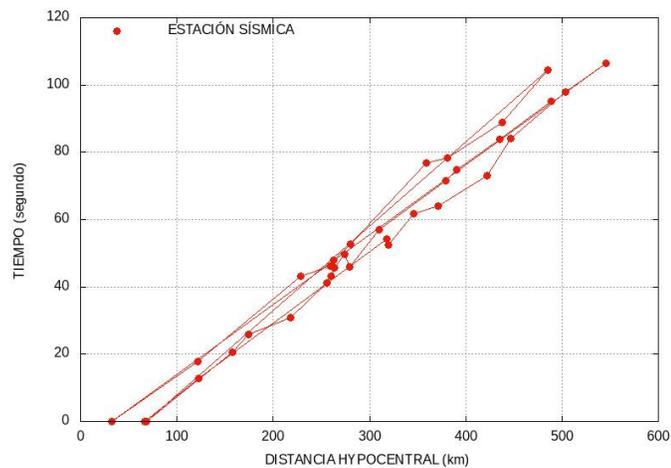
Por la calidad de la información se optó por analizar los registros de los sensores de banda ancha a pesar que en algunos sismogramas estaban saturados y dado que el análisis se limitó a identificar el arribo de las fases P y S, los demás parámetros de los sismos como los PGA, magnitudes, localizaciones se tomaron los registros del INSIVUMEH, en los anexos se encuentran los S-files de cada uno de los eventos y además la tabla con los valores instrumentales.

Figura 25. **Gráfica con los posibles tiempos de alerta para sismos corticales**



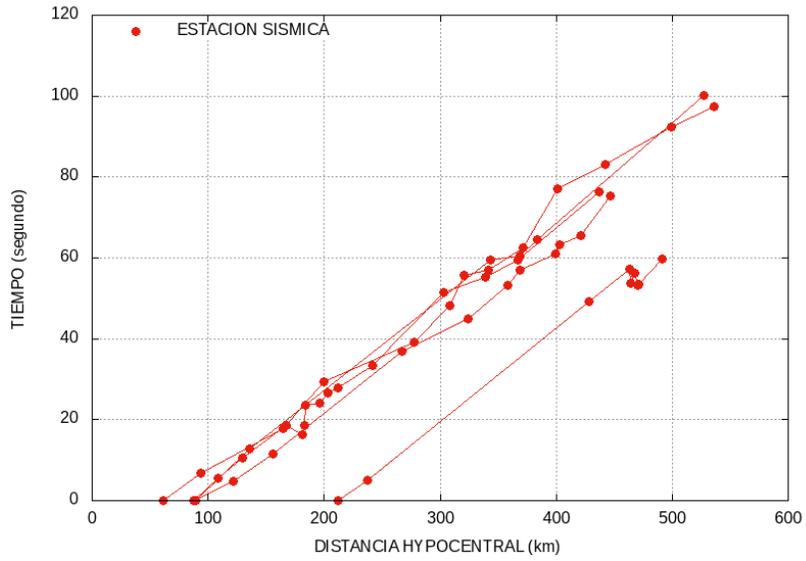
Fuente: elaboración propia, empelando gnuplot 5.0.

Figura 26. **Gráfica con los posibles tiempos de alerta para sismos interfase**



Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Figura 27. **Gráfica con los posibles tiempos de alerta para sismos intraplaca**



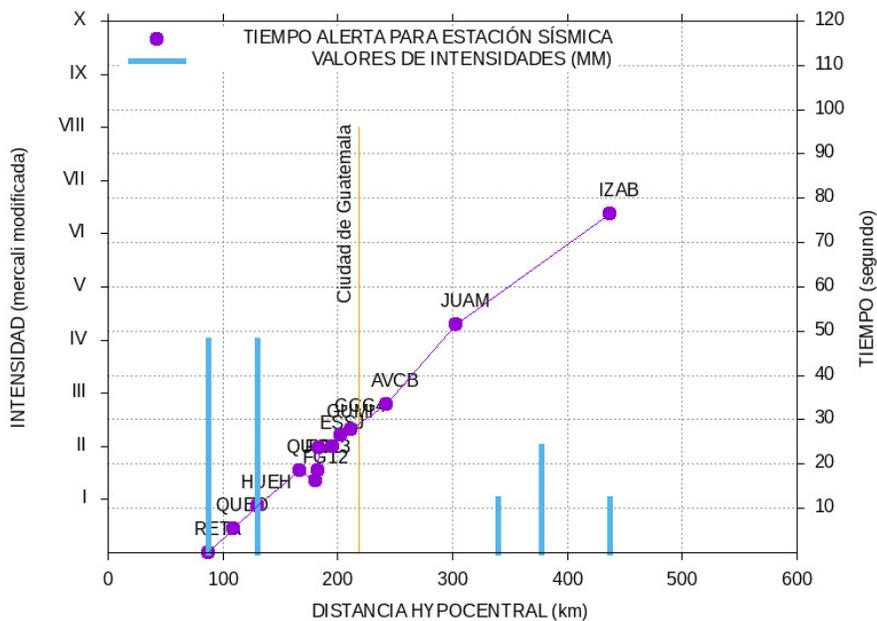
Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

## 6. ANÁLISIS DE LA AMENAZA SÍSMICA

### 6.1. Intensidades vs distancia hipocentral y tiempos de alerta

A continuación, se muestra en la figura 28 los tiempos de alerta para el sismo del 2 de febrero de 2019.

Figura 28. **Tiempos de alerta para el sismo del 02 de febrero de 2019 (zona intraplaca)**

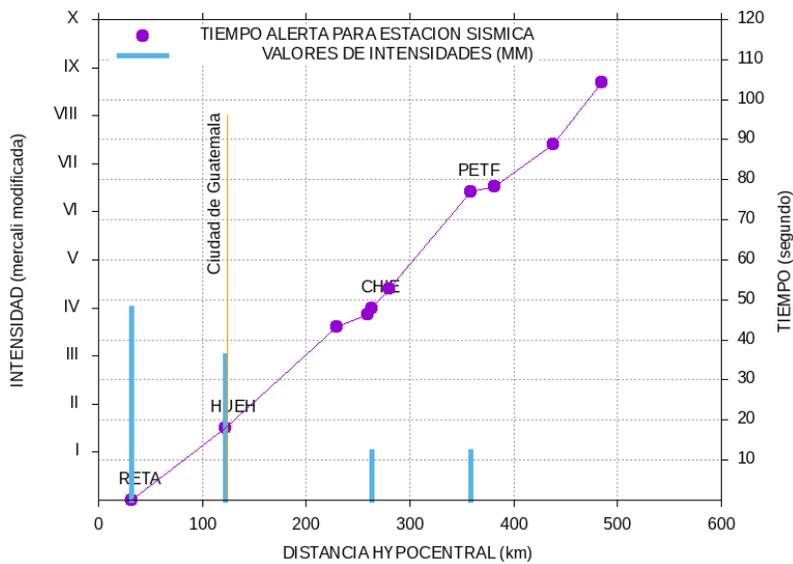


Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Una vez calculados los tiempos de alerta, se procedió a compararla con los PGA de los registros del Insivumeh (véase figuras 28, 29 y 30).

De este análisis se estimaron los posibles tiempos de alerta para la ciudad de Guatemala; dato que se estimó gráficamente tomando el tiempo correspondiente a la distancia epicentral (sismo - ciudad de Guatemala); arrojó en promedio un tiempo de 30 segundos de alerta en casi todos los casos a excepción del sismo registrado el 28 de agosto de 2014 que tuvo su fuente sísmica en la subducción en la zona interfase.

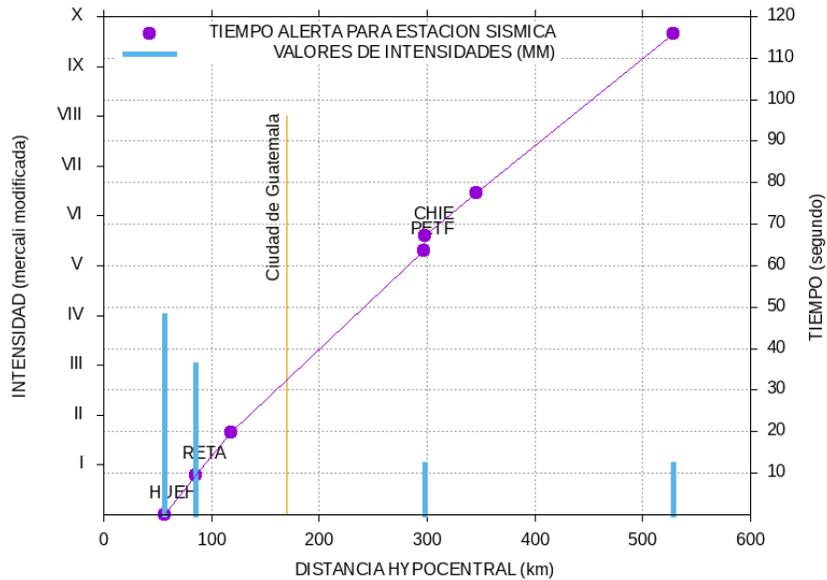
Figura 29. **Tiempos de alerta para el sismo del 28 de agosto de 2014 (zona interfase)**



Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

La figura 29 muestra que para este caso el tiempo de alerta sería menor a los 20 segundos, esto debido a que la distancia hipocentral es menor de 150 km. En los apéndices se muestran todas las gráficas de intensidad vrs la distancia hipocentral y los tiempos de alerta en orden cronológico al tiempo de origen de los sismos.

Figura 30. **Tiempos de alerta para el sismos del 16 de julio del 2014  
(zona cortical)**



Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

## 6.2. Localización de la fuente sismogénica con mayor amenaza

El libro *Amenaza sísmica en América Central* de M. Benito concluye:

Amenaza sísmica en América Central surge como parte de la promoción y desarrollo de una cultura de prevención y mitigación de desastres. Tiene como objetivo constituirse como una herramienta de consulta y referencia para las instituciones nacionales, regionales y sociedad general; sentando las bases en el marco sismo-tectónico regional, una metodología de cálculo y zonificación.

...Para la ciudad de Guatemala se identifica un claro sismo de control, asociado al par  $M=6,5$  y  $R= 15$  km, que domina para todos los periodos de retorno considerando el movimiento de corto periodo y de largo periodo estructural. Además, de ese sismo, aunque con menor densidad de probabilidad, aparece también una importante contribución de un sismo entre las magnitudes (7 y 7,5) a distancias entre (135 y 150 km) para un periodo de retorno de 500 años y otro de magnitud (7,25 a 7,5) a distancias entre (150 a 180 km) para un periodo de retorno de 2 500 años. “Todo parece indicar que, si bien la amenaza está dominada en todos los casos por un sismo próximo de fallamiento local, también tiene su contribución un posible sismo de subducción más distante, y dicha contribución es mayor aún para el largo periodo del movimiento...”<sup>42</sup>.

Comparando la conclusión de Ma. Benito con el análisis de este trabajo de graduación, se puede ver claramente que para el período de análisis (2013-2019) de los 9 sismos de movimiento fuerte, 7 tienen su fuente sísmica en la subducción del pacífico y de estos, 5 están localizados en la zona intraplaca, 3 asociados a la subducción en la zona interface y solamente hay un sismo que por sus características hipocentrales puede ser catalogado como cortical (véase tabla V ); para poderlo asociar a la falla Chixoy-Polochic o bien a un movimiento derivado de la transcurencia entre el límite NA-CA, es necesario conocer el mecanismos focal; sin embargo, se asumirá que la fuente sísmica es la falla antes mencionada, considerando su cercanía a esta falla y el bajo potencial sísmico que presenta el fallamiento local cercano a este sismo.

Por tanto, se puede suponer que la fuente sísmica de mayor amenaza para Guatemala en este periodo de análisis es la subducción en la región intraplaca. Sin embargo, es posible que el conjunto de fallas Motagua-Polochic

---

<sup>42</sup> OTERINO, Benito; MOLINA, E. *Amenaza sísmica en América Central*. p. 167.

en su condición de fallas activas pueda tener una amenaza mayor para la ciudad de Guatemala, debido a su cercanía.

...Se destaca este sistema de fallas, ya que fue en esta región donde se originó el sismo de 1976, el cual marcó un hito en la historia del país. La evidencia geológica posterior al sismo arroja desplazamientos de hasta un metro a lo largo de este sistema de fallas...

Al realizar una comparación entre magnitud vs intensidad, llama la atención que el sismo cortical (el segundo de menor magnitud) tenga registros de PGA iguales a los sismos de subducción con 3 órdenes de magnitud superiores en la escala logarítmica, e incluso dentro del área de estudio (territorio nacional) tuviera registros de aceleración pico similares al sismo de mayor magnitud 8,1 registrado en las costas de México.

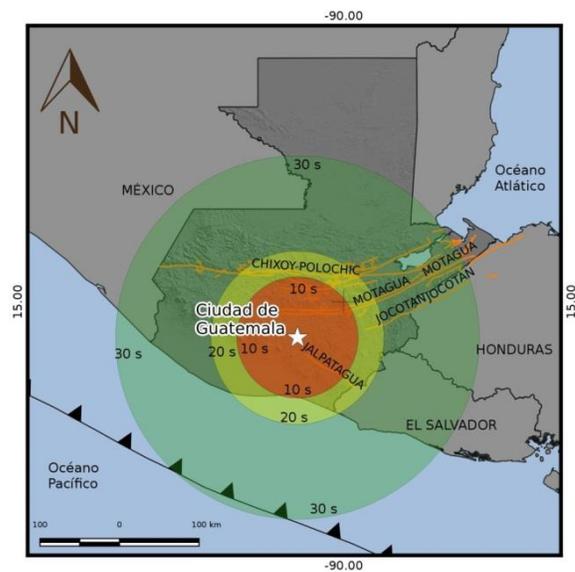
Por lo que se puede suponer que los sismos corticales tienen capacidad de liberar más energía por su condición de superficiales; además, es probable que lo variado de la geología en la región central de Guatemala y en específico la zona G-6 exista una amplificación en la onda sísmica, aumentando la vulnerabilidad de los efectos de sitio en el área. Por esta razón es importante continuar con los estudios geológicos con más detalle para toda Guatemala.

### 6.3. Viabilidad de la alerta ante sismos para la Ciudad de Guatemala

En la figura 31 se presenta el mapa con la estimación de los tiempos de alerta. El área verde representa un tiempo aproximado de 30 segundos de alerta, el amarillo 20 segundos y el rojo menos de 10 segundos.

Al comparar las áreas con las posibles fuentes sísmicas, se ve que en la zona de transcurrencia los tiempos para un alerta son muy bajos; sin embargo, para la subducción presenta un mejor escenario. En los siguientes capítulos se presenta un análisis detallado para cada zona (cortical, subducción interface y subducción intraplaca).

Figura 31. **Mapa con los posibles tiempos de alerta para la Ciudad de Guatemala**



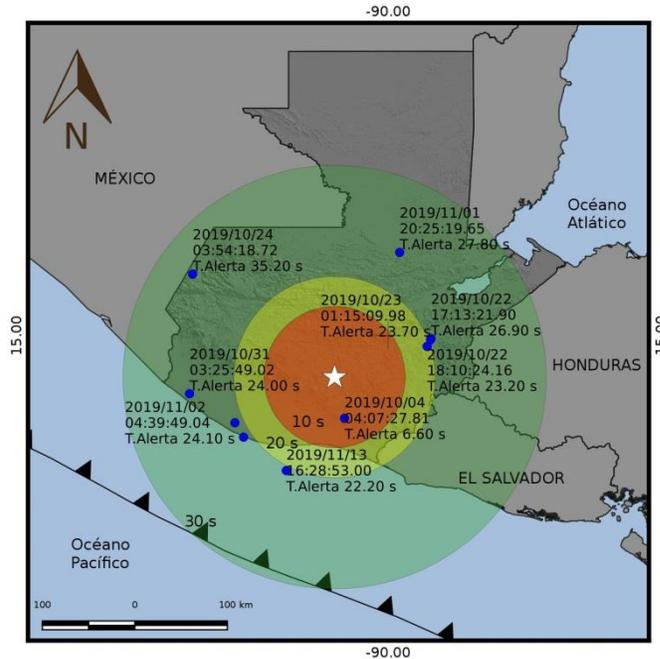
Fuente: elaboración propia empleando Qgis 2.14.

#### **6.4. Validación del modelo**

La validación del modelo descrito anteriormente se muestra en la figura 32 para el cual se tomaron los sismos reportados sensibles por distintas poblaciones del interior de la república a Insivumeh entre los meses de enero y noviembre del año 2019; cabe resaltar que no todos estos sismos pueden ser considerados de movimiento fuerte, pero el hecho de ser reportados sensibles puede ser un parámetro de alerta.

Por otra parte, no todos los sismos antes mencionados fueron registrados por la estación central GCG4; por lo que, para aquellos eventos sísmicos que no fueron registrados por GCG4, se tomó la estación más cercana a la ciudad de Guatemala la cual está ubicada en Chimaltenango, Sacatepéquez. Este análisis tiene como objetivo conocer el tiempo real del arribo de las fases para la estación; por lo que no es de extrañar que los valores IMM para la ciudad de Guatemala estuvieran alrededor de I o II, ya que la sacudida fue percibida (en el mejor de los casos) únicamente por el sensor.

Figura 32. **Mapa de los epicentros reportados sensibles por la población a Insivumeh (enero – noviembre 2019)**

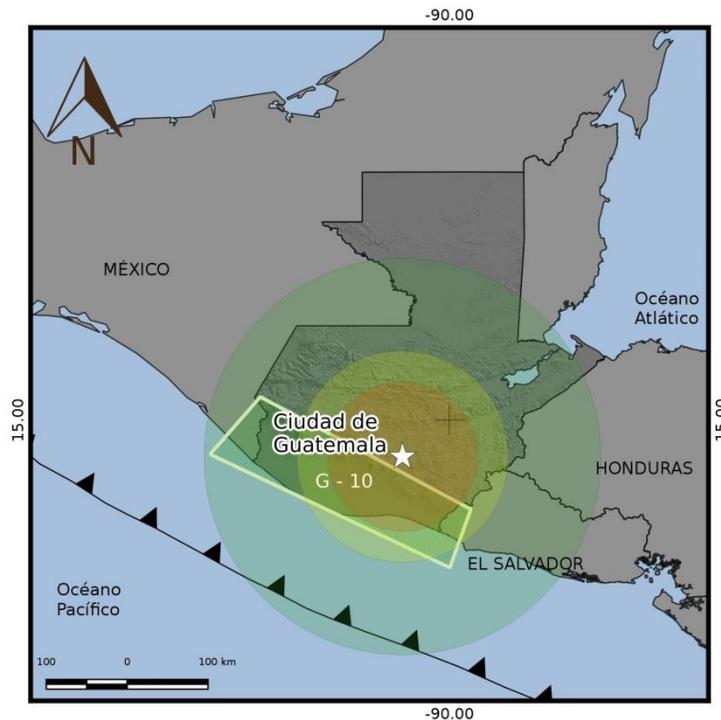


Fuente: elaboración propia, empenado Qgis 2.14.

### 6.5. Alerta para la zona intraplaca

Esta zona es la que presenta el escenario con mayor viabilidad, ya que las distancias hipocentrales favorecen a tener un mayor tiempo para la categorización y activación de un sistema de alerta; sin embargo, de presentarse el caso un sismo localizado dentro de los departamentos de Escuintla o Santa Rosa sería sin duda el escenario un tanto desfavorable.

Figura 33. **Mapa con los tiempos de alerta para la zona intraplaca**



Fuente: elaboración propia, emplenado Qgis 2.14.

En la figura 33 se observa que existen regiones con menos de 10 segundos para un alerta; sin embargo, para el período 2013-2019 los sismos de subducción interfase se localizaron al noroeste de la república entre los departamentos de San Marcos y el territorio mexicano; por lo que de continuar esta tendencia, la alerta tendría como principal objetivo la automatización de los cortes de suministro de energía en edificios, centros comerciales, gasolineras, centrales eléctricas y en hidroeléctricas; se podría pensar en parar el funcionamiento de turbinas y generadores.

Por otra parte, un alerta poblacional sería viable para las personas que se encuentren en oficinas, talleres, escuelas, casas que no sobrepasen dos

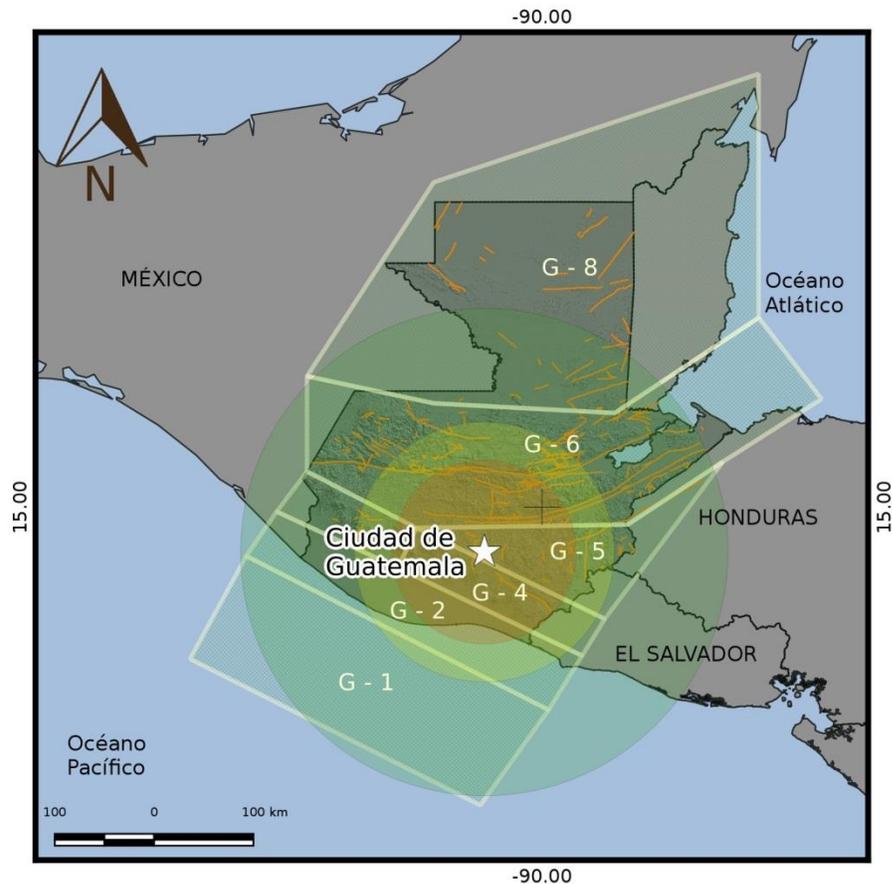
niveles, ya que 30 segundos es tiempo suficiente para resguardarse o buscar puntos seguro previamente establecidos; sin embargo, para aquellas personas que se encuentran en edificios de gran altura, centros comerciales, universidades, entre otros, presenta un valor bajo de viabilidad debido a la relación entre el tiempo de la alerta y al tiempo que le tomaría evacuar esta instalación; por lo que para este caso se debe contar con un adecuado análisis y diseño de la estructura.

## **6.6. Alerta para la zona cortical**

Como se ve en la figura 34, el escenario para sismos superficiales en la corteza continental presenta una muy baja viabilidad ya que la zona con mayor potencial sísmico es la zona G-6, la cual se encuentra a 50 km al norte de la ciudad de Guatemala, situación que desfavorece a la hora de pensar en un alerta para sismos; por otra parte, esta zona históricamente tiene el sismo que provoco más destrucción para Guatemala (4 febrero 1976). Se estima que de ocurrir otro sismo con iguales características estaría localizado entre la franja de los 20 y 10 segundos.

En cualquiera de los escenarios, este tiempo no es suficiente para evacuar un edificio de gran altura; sin embargo, para aquellas personas que viven o se encuentran en casas, oficinas o comercios de uno o dos niveles sería tiempo suficiente para resguardarse o buscar un punto seguro previamente identificado.

Figura 34. Mapa con los tiempos de alerta para la zona cortical



Fuente: elaboración propia, emplenado Qgis 2.14.

Dado el caso de los sistemas de almacenamiento y producción de energía (eg. hidroeléctrica, distribuidoras de gas, gasolineras, plantas energéticas, entre otros). Se podría establecer un sistema que realice cortes de estos suministros, de forma automática y de esta forma evitar cortos circuitos, explosiones posteriores al sismo y cualquier otro daño no relacionado al colapso de la estructura por estar sometida a fuerzas laterales producto del sismo.

Por tanto, es importante resaltar que este escenario tiene la probabilidad de ocurrencia más bajo de todos; sin embargo, es el que tiene el mayor potencial de destrucción, por ello se recomienda realizar un adecuado análisis de diseño estructural sismo resistente, considerando entre otros estudios, cálculo del periodo natural del suelo, estimación de efectos de sitio (amplificación de la onda), PGA, cálculo de la cimentación del edificio, un adecuado diseño de cargas (vivas y muerta) de la estructura; sin dejar por un lado una correcta planificación de la obra, contar con mano de obra calificada en todo el proceso de la obra (diseño, planificación y ejecución).

Por otra parte, como herramienta de toma de decisiones posevento, contar con mapas que reflejen la sacudida del suelo sería vital para las autoridades.

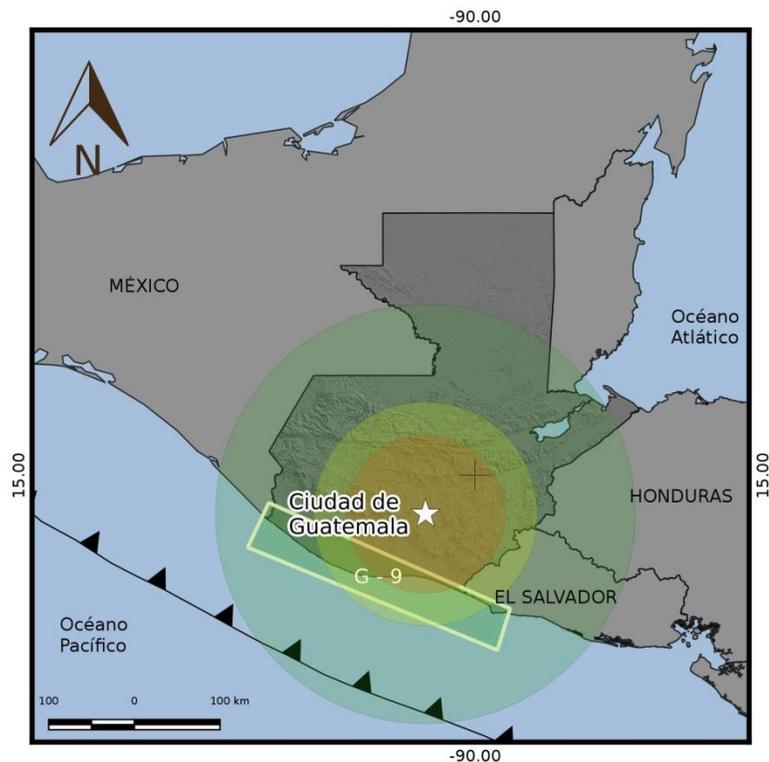
Por último, una estructura sismo-resistente tiene como objetivo soportar esfuerzos producto de una fuerza horizontal y llegar a una falla balanceada para que la estructura no colapse; sin embargo, será necesario realizar trabajos de remozamiento para que pueda seguir prestando su servicio.

#### **6.7. Alerta para la zona interfase**

Se ve en la figura 35 que de ocurrir un sismo en esta zona, este sería el escenario que presentaría la viabilidad más baja, esto debido a que la zona G-9 tiene alta probabilidad de provocar sismos a lo largo de las costas del pacífico y en el caso el epicentro fuera localizado en las costas de Escuintla (puntos más cercano de la zona G-9 a ciudad de Guatemala aprox. 95 km) sería aún más desfavorable (respecto al tiempo de alerta), ya que por la distancia, los tiempos de alerta pueden variar entre 10 a 20 segundos.

Por tanto, para aumentar la viabilidad de un alerta para este escenario es necesario instalar estaciones sísmicas submarinas para aumentar los tiempos de categorización y activación de un alerta.

Figura 35. **Mapa con los tiempos de alerta para la zona interfase**



Fuente: elaboración propia, emplenado Qgis 2.14.

Sin embargo, para este escenario y el de la zona cortical, resulta difícil pensar en un alerta, por lo que desarrollar mapas de sacudida del suelo sería una herramienta útil para determinar si es necesario la activación de protocolos de rescate y coordinar la ayuda humanitaria, ya estos mapas muestran los valores PGA del suelo por medio mediciones puntuales (estaciones sísmicas con acelerómetros) y al combinarlos con ecuaciones de atenuación y efectos de

sitio según la geología del lugar muestran la sacudida teórica, información valiosa para la toma de decisiones en situaciones de crisis. Estos mapas resulta del trabajo de un equipo multidisciplinario (ingenieros civiles, electrónicos, en sistemas, geólogos, entre otros); además, de una red de acelerómetros densa para que la información mostrada en el mapa resulte válida y confiable para las autoridades.

Por otra parte, también es hacer notar la importancia de la densificación instrumental dentro del territorio nacional, tanto con sensores de periodo corto, acelerómetros, banda ancha y GPS, para tener una mejor cobertura en la vigilancia sísmica y así establecer actividad premonitora a un gran evento sísmico; es decir, comprender de mejor manera el comportamiento de la actividad tectónica dentro del país.

#### **6.8. Propuesta de acciones para implementar en la ciudad de Guatemala**

Para todos los casos de alerta ante sismos la automatización de los procesos es vital, ya que el tiempo con el que se cuenta es muy reducido, hasta 30 segundos, en el escenario más favorable.

Incluso se podría pensar en un alerta población para la ciudad de Guatemala, por medio de una aplicación en la cual se notificara sobre la ocurrencia del sismo; sin embargo, para ello la población debe estar consciente sobre la amenaza latente a la que está expuesta y sobre todo conocer los procedimientos y protocolos que se deben tomar al momento de activarse la alerta. Y para ello es importante que la sismología deje ser un tema tabú, para cambiar la ideología negativa hacia el aprendizaje en esta rama de la ciencia.

A continuación, se enumeran las posibles acciones a implementar en ciudad de Guatemala según el tiempo de alerta:

- 10 segundos de alerta
  - Automatización de cortes de suministro de energía eléctrica por medio mems.
  - Automatización de cortes de combustible por medio mems
  - Elaboración de mapas de sacudida de suelo.
  
- 20 segundos de alerta
  - Automatización de cortes de suministro de energía eléctrica por medio mems.
  - Automatización de cortes de combustible por medio mems.
  - Detener manejo de maquinaria de gran tamaño por medio de una alerta sonora activada automáticamente.
  - Detener manipulación de químicos por medio de una alerta sonora activada automáticamente.
  - Elaboración de mapas de sacudida de suelo.
  
- 30 segundos de alerta
  - Alerta poblacional para lugares con baja densidad poblacional y sobre todo a personas ubicados en edificaciones de uno o dos niveles por medio de una alerta sonora activada automáticamente.
  - Automatización de cortes de suministro de energía eléctrica por medio mems.
  - Automatización de cortes de combustible por medio mems.

- Detener el funcionamiento de hidroeléctricas de forma automática.
- Detener manejo de maquinaria de gran tamaño por medio de una alerta sonora activada automáticamente.
- Detener manipulación de químicos por medio de una alerta sonora activada automáticamente.
- Elaboración de mapas de sacudida de suelo.

## CONCLUSIONES

1. En Guatemala la actividad sísmica es monitoreada por el Departamento de Investigación y Servicios Geofísicos del Insivumeh; desde el uno de enero de 1984 hasta el 30 de abril de 2019 se han registrado un total de 51 734 sismos; de los cuales 31 969 son asociados a la subducción y 19 765 son categorizados como superficiales y de estos 14 509 son asociados a la sismicidad cortical propiamente pues 5 256 de estos sismos son producto de la subducción superficial. Dada la presencia de varias fuentes sísmicas, un alerta ante sismos presenta varios escenarios, en los cuales varía la viabilidad en relación a la distancia hipocentral a la primera estación y la distancia hipocentral a la ciudad de Guatemala.
2. La región intraplaca de la subducción fue la que presentó mayor recurrencia en los sismos de movimiento fuerte del catálogo depurado registrando 5 de un total de 9 sismos analizados; estos sismos fueron reportados con magnitudes entre 6,5 a 8,1, sin embargo, para un periodo más largo de análisis, sin duda la fuente sísmica con mayor amenaza para ciudad de Guatemala y en general para toda la república, la presenta el límite entre la placa de Norteamérica y la placa del Caribe, esto debido a que los hipocentros de estos sismos son superficiales; del análisis comparativo entre los sismos del catálogo depurado resaltó que el único sismos asociado a la zona G-6 y categorizado cortical fue uno de los sismos con menor magnitud (5,6) pero alcanzó intensidades de IV en la escala de Mercalli modificada, al igual que sismos con magnitudes de

3 órdenes superiores; además de recordar que el sismo del 4 de febrero de 1976 es asociado a la falla del Motagua.

3. En el escenario más favorable se pudo determinar que existe hasta un máximo de 30 segundos de alerta para la ciudad de Guatemala; la principal fuente sísmica la subducción en su región intraplaca y con epicentros localizados en el departamento de San Marcos y territorio mexicano; otra región que presentó un tiempo de hasta 30 segundos de alerta fue la zona G-6 según la zonificación de RESIS II con epicentros asociados a la falla del Motagua.
4. Se estimó menos de 20 segundos para un sistema de alerta antes sismos en el escenario menos favorable; esta condición está presente con la falla de Jalpatagua y la falla de Motagua en la región más cercana a la ciudad de Guatemala (60 km al norte de la ciudad); sin embargo, este tiempo puede variar dependiendo del aumento de la instrumentación en el área. Otra región que presenta una baja viabilidad es la zona interfase de la subducción debajo del departamento de Escuintla ya que la distancia a la ciudad de Guatemala es de aproximadamente 100 km; se estiman tiempos de arribo menores a 10 segundos.
5. Implementar un alerta para la ciudad de Guatemala en cualquier caso requiere de automatizar el corte de suministro de energía eléctrica, gas propano y otros servicios, incluso se podría considerar un alerta sonora, ya que el tiempo es reducido.
6. Los mapas de sacudida de suelo, como herramienta útil para la activación de protocolos de ayuda humanitaria en las zonas reportadas con mayores valores de aceleración pico.

## RECOMENDACIONES

1. Dada la alta tasa de sismicidad registrada en el país, es necesario ampliar la cobertura de la RSN y aumentar a un total de 65 estaciones como mínimo, con el objetivo de mantener un monitoreo automático de la actividad sísmica dentro del país.
2. Entre los sensores en que se debe considerar para la vigilancia sísmica dentro del territorio nacional, se recomienda el uso de acelerómetros, geófonos y GPS. Son los de mayor importancia, por la baja cobertura dentro del país, los acelerómetros.
3. En el caso de aumentar la densidad instrumental, es necesario pensar en un efectivo medio de telecomunicación, ya que la latencia en la transferencia de datos puede ser crítico cuando de alerta ante sismos se trata.
4. Para creación de los mapas de sacudida del suelo es necesario tener muestras representativas de todo el territorio para que sea válida la información que se reporta.
5. Es necesario realizar campañas de estudios geológicos para poder tener un mapa geológico con mayor detalle.
6. Toda obra civil debe respetar el proceso de ejecución (planificación-diseño-ejecución-uso) y debe ir acompañada de una supervisión técnica-calificada.

7. Realizar enlaces regionales para que, desde el sur de México hasta Panamá, se tenga integrado un sistema unificado de vigilancia sísmica, pues un sismo de gran magnitud no reconoce fronteras.
8. Que el estado financie, dentro del Insivumeh, un programa de producción de sensores sísmicos, para evitar la dependencia de tecnología extranjera de alto costo y de esta manera contar con una red densamente equipada en el territorio nacional con la capacidad tecnológica para ser sostenible.
9. Realizar alianzas estratégicas entre Insivumeh y la Universidad de San Carlos de Guatemala, para introducir un fortalecimiento de los contenidos del estudio sísmico dentro de la Ingeniería Civil y que dentro de todos los Centros Universitarios y fincas experimentales se tenga estaciones equipadas para los registros de eventos sísmicos.
10. Que todas las municipalidades del país incorporen dentro de los planes de ordenamiento territorial, exigencias mínimas de sismo resistencia, como variable estratégica para el diseño de viviendas, densidad de ocupación de suelo, entre otros.
11. Realizar la microzonificación del país, con el objetivo de conocer las características del suelo y su comportamiento, para generar información necesaria a la hora de realizar un diseño estructural, es decir, que cada municipalidad pueda contar con la información necesaria para la creación de un código construcción adecuado a sus condiciones.

## BIBLIOGRAFÍA

1. BORMANN, Peter. International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior. *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP)*. Alemania: GeoForschungsZentrum, 2002. 234 p.
2. DEL CID, Ligia Eleonora. *Estudio de sismos originarios por fuentes sismogénicas superficiales ocurridos en Guatemala en el siglo XX*. Trabajo de graduación de ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2007. 293 p.
3. DÍAZ RODRÍGUEZ, Jorge. *Dinámica de suelo*. México: UNAM, 2005. 120 p.
4. Gobierno de Guatemala. *Simposio Simposio Internacional sobre el Terremoto de Guatemala, del 4 de febrero de 1976 y Proceso de Reconstrucción*. Guatemala, Guatemala, 1978. 203 p.
5. GUZMAN SPEZIALE, Marco; MOLINA, Enrique y VALDES GONZALES, Carlos. *Seismic activity along de Central America volcanic arc*. España: Elsevier, 2005. 193 p.
6. HAVSKOV, Jensen y ALGUACIL, Gerardo. *Instrumentation in Earthquake Seismology*. España: Springer International Publishing, 2015. 90 p.

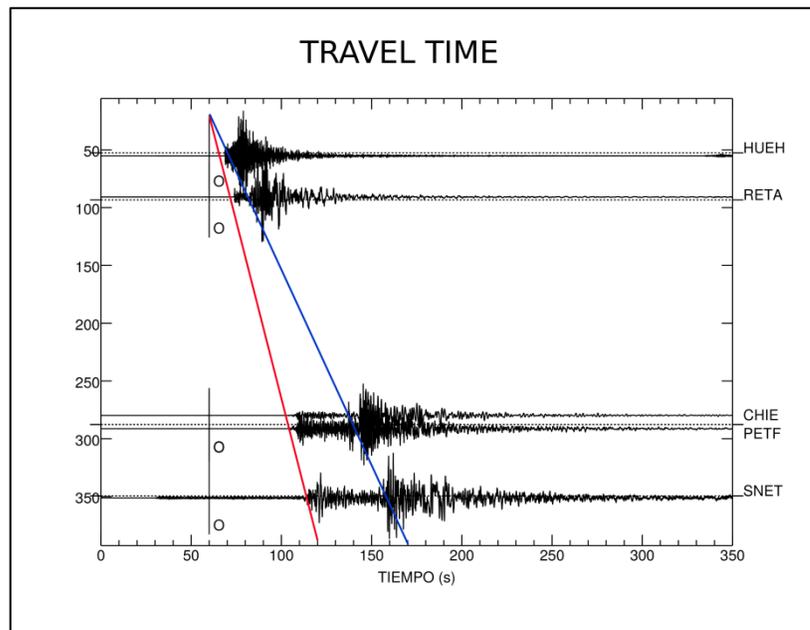
7. \_\_\_\_\_. OTTEMOLLER, Lars. *Routine data procesing in Earthquake Seismology*. Bergen, Norway: Springer, 2010. 232 p.
8. HELFFRICH, George; WOOKEY, James y BASTOW, Ian. *The Seismic Analysis Code: A Primer and User's Guide*. United Kingdom: Cambridge University Press, 2013.
9. Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences y gempa GmbH. [en línea]. <<https://docs.gempa.de/seiscomp3/current/>>. [Consulta: 8 de abril de 2018].
10. IGEL, Heiner. *Computational Seismology: A Practical Introduction*. United Kingdom: Oxford University Press, 2017. 193 p.
11. Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh*. [en línea]. <[https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf)>. [Consulta: 20 de diciembre de 2019].
12. IRIS. *Construcción de las curvas de tiempo de viaje*. [en línea]. <<https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/traveltime/>>. [Consulta: 18 de febrero de 2019].
13. JO LEÓN CHANG, Arturo. *Estudio de algunos sismos de la zona de subducción en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1986. 123 p.

14. KANAMORI, Hiro; LEE, William y KISSLINGER, Carl. *International Handbook of EARTHQUAKE & ENGINEERING SEISMOLOGY*. United Kingdom: ACADEMIC PRESS, 2002. 193 p.
15. MELGAR, Oscar. *Análisis del origen de los sismos en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1986. 167 p.
16. MOLINA, Enrique; MARROQUIN, Griselda; ESCOBAR, José; TALAVERA, Emilio; ROJAS, Wilfredo; CLIMENT, Álvaro y LINDHOLM, Conrad. *PROYECTO RESIS II Evaluación de la amenaza sísmica en Centroamérica*. Centroamérica: CEPREDENAC, 2008. 292 p.
17. OTA, Kulhánek. *Anatomy of Seismograms*. Sweden: Elsevier, 1990. 203 p.
18. OTERINO, Benito; MOLINA, Enrique. *Amenaza sísmica en América Central*. España: Entimema, 2009. 120 p.
19. PINILLOS, Hugo. *Estudio de la actividad sísmica tipo enjambre registrada durante el periodo 1979 al 2013 en el departamento de Santa Rosa*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018. 128 p.
20. SHEARER, Peter. *Introduction to Seismology*. United Kingdom: Cambridge University Press, 2009. 120 p.

21. TARBUCK, Eduard y LUDGEN, Frederik. *Ciencias de la Tierra*. 8a ed. España: McGraw-Hill, 2005. 239 p.
22. U.S. Geological Survey. *Standard for the Exchange of Earthquake Data*. United States: Usgs, 2012. 129 p.
23. UDÍAS VALLINA, Agustín. *Fundamentos de sismología*. El Salvador: UCA Editores, 1996. 203 p.
24. VILLAGRAN, Mario. *Sismología, conceptos fundamentales, principales sismos del siglo XX en Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1992. 202 p.
25. WHITE, Richard y HARLOW, David. *estructive upper-crustal earthquakes of Central America since 1960*. United States: Seismological Society of America, 1993. 229.
26. YANI, Robin. *Mediciones de intensidades sísmicas dentro del área urbana extendida, de la ciudad de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006. 97 p.

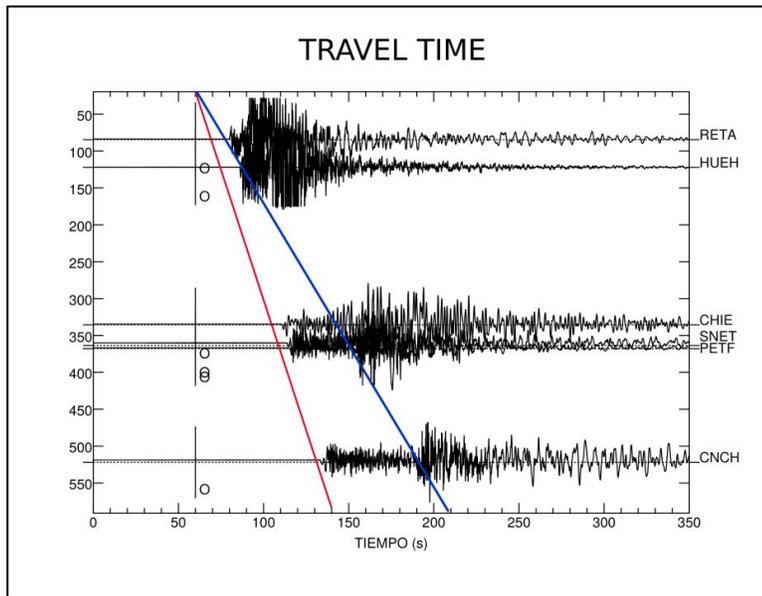
# APÉNDICES

## Apéndice 1. Sismo registrado el día 06 de junio de 2014



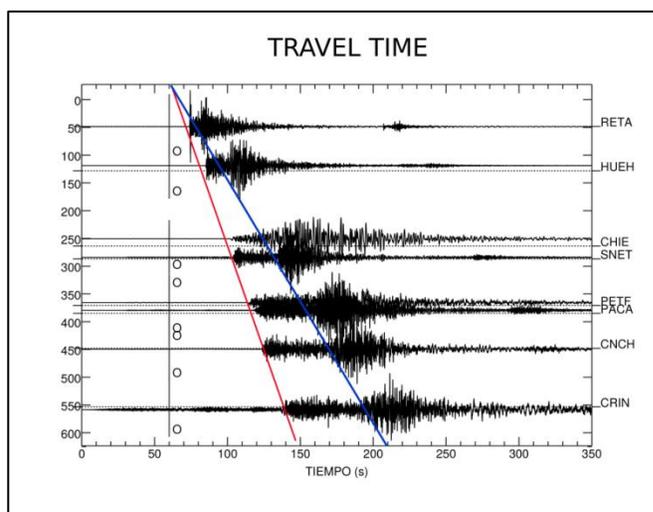
Fuente: elaboración propia, empleando SAC.

Apéndice 2. **Sismo registrado el día 07 de julio de 2014**



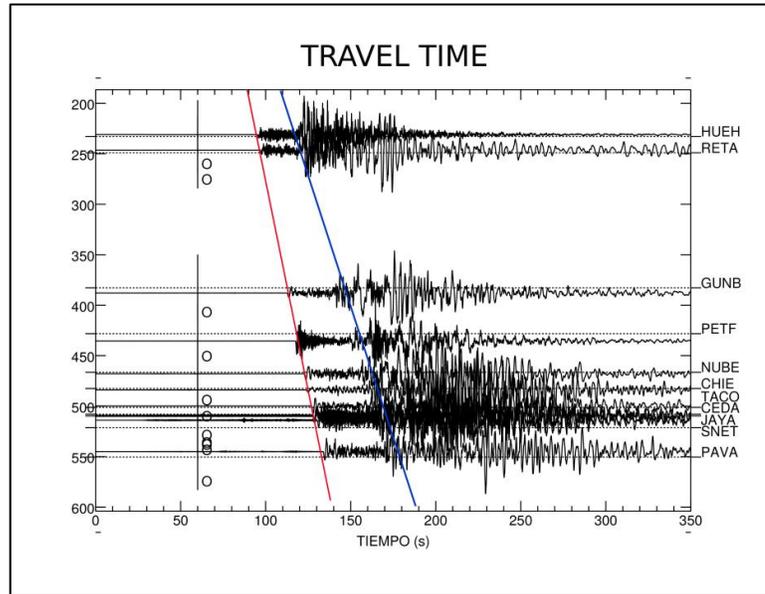
Fuente: elaboración propia, empleando SAC.

Apéndice 3. **Sismo registrado el día 28 de agosto de 2014**



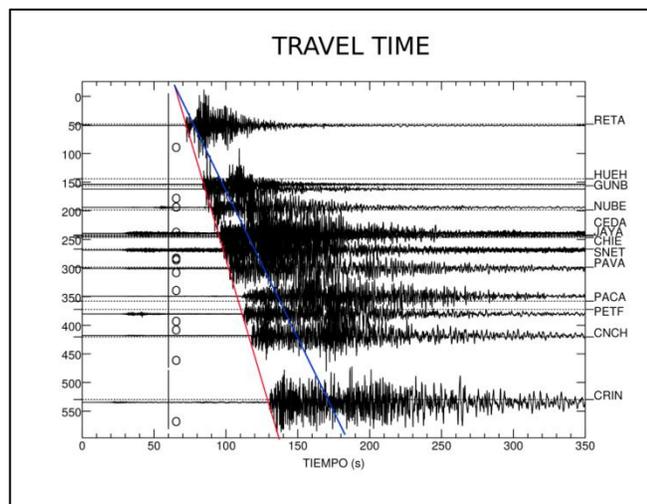
Fuente: elaboración propia, empleando SAC.

Apéndice 4. **Sismo registrado el día 12 de diciembre de 2015**



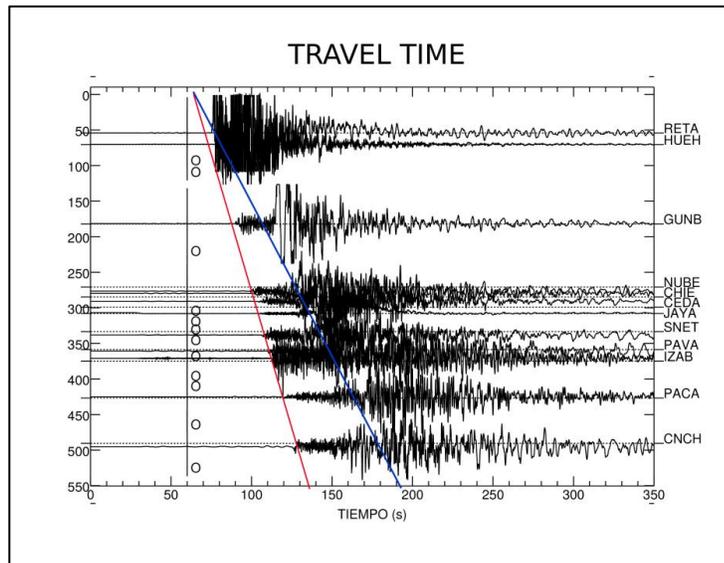
Fuente: elaboración propia, empleando SAC.

Apéndice 5. **Sismo registrado el día 15 de junio de 2016**



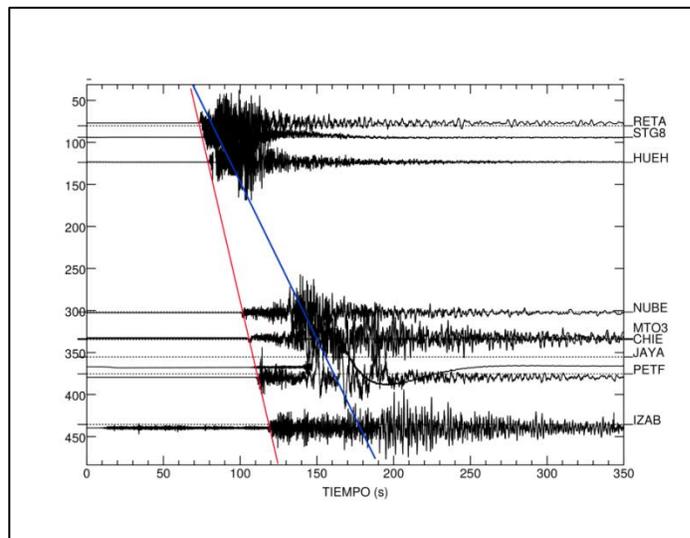
Fuente: elaboración propia, empleando SAC.

Apéndice 6. **Sismo registrado el día 14 de junio de 2017**



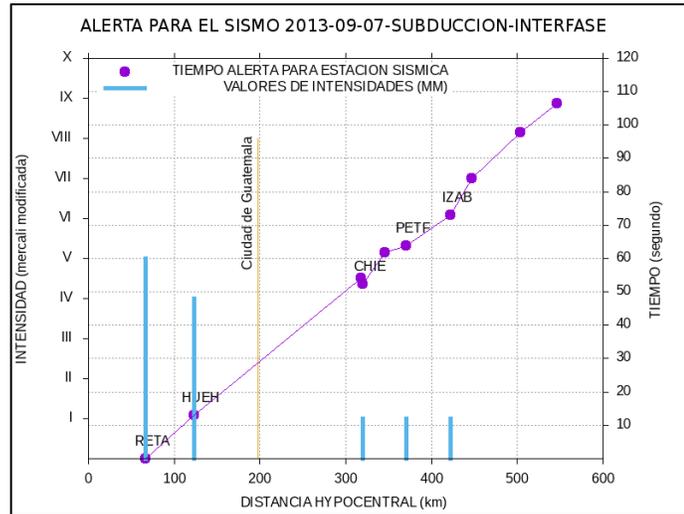
Fuente: elaboración propia, empleando SAC.

Apéndice 7. **Sismo registrado el día 01 febrero de 2019**



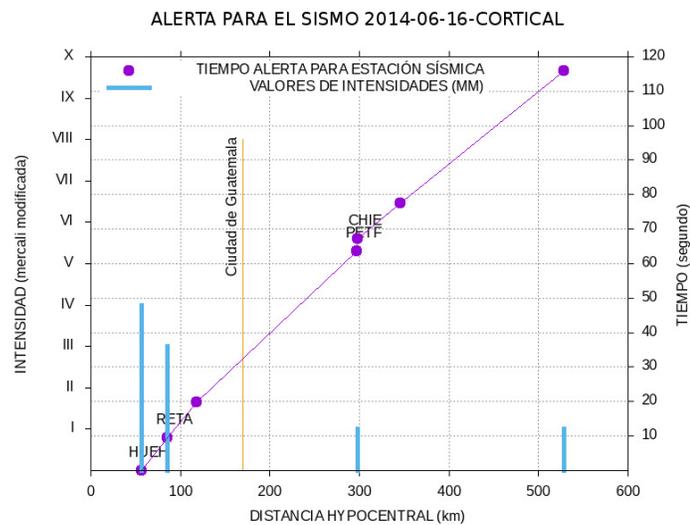
Fuente: elaboración propia, empleando SAC.

Apéndice 8. **Gráficas de los tiempos de alerta para cada sismo relevante para Guatemala**



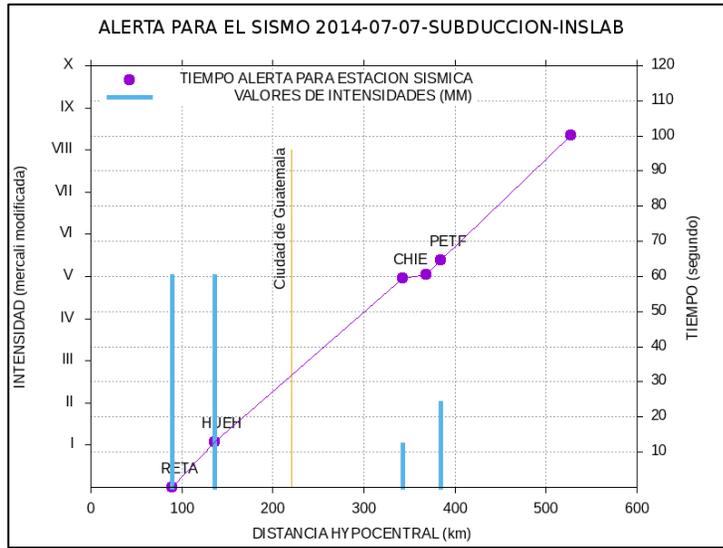
Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Apéndice 9. **Gráficas de los tiempos de alerta 1**



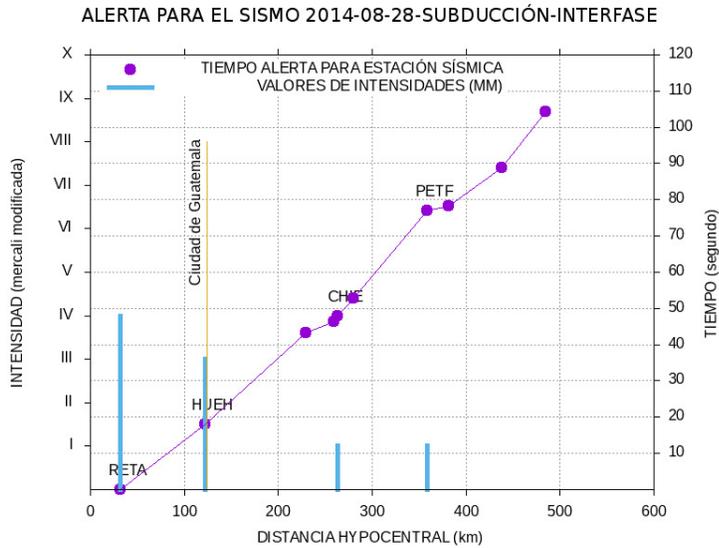
Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Apéndice 10. **Gráficas de los tiempos de alerta 2**



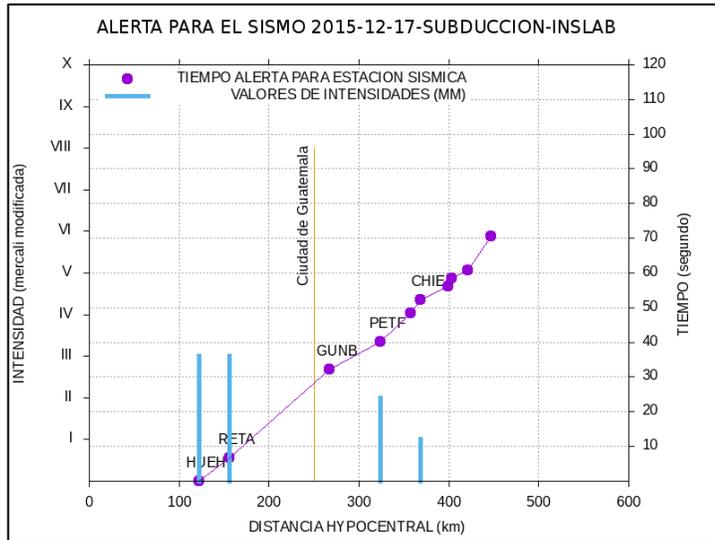
Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Apéndice 11. **Gráficas de los tiempos de alerta 3**



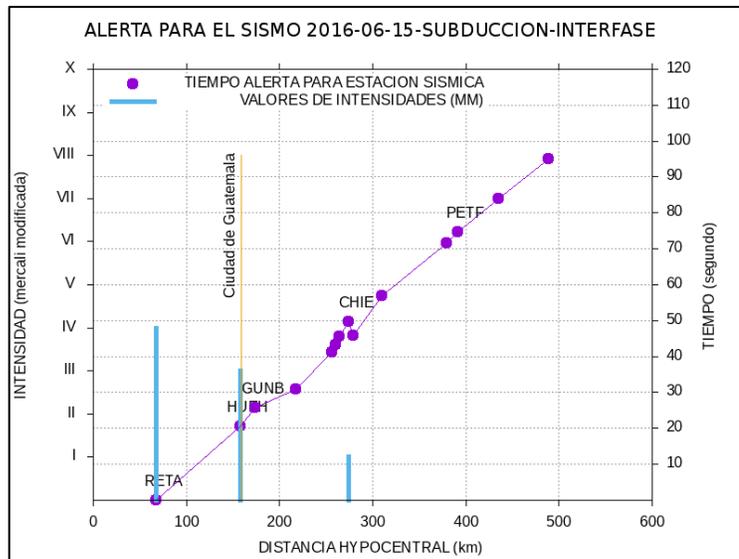
Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Apéndice 12. Gráficas de los tiempos de alerta 4



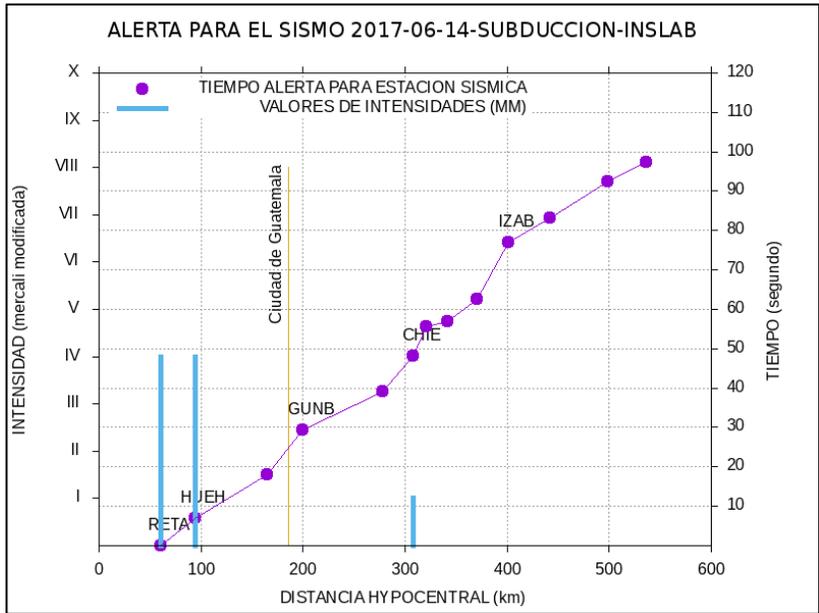
Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Apéndice 13. Gráficas de los tiempos de alerta 5



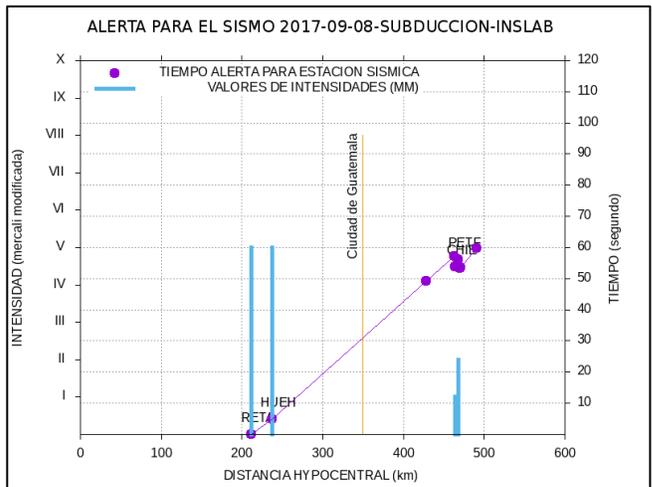
Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Apéndice 14. **Gráficas de los tiempos de alerta 6**



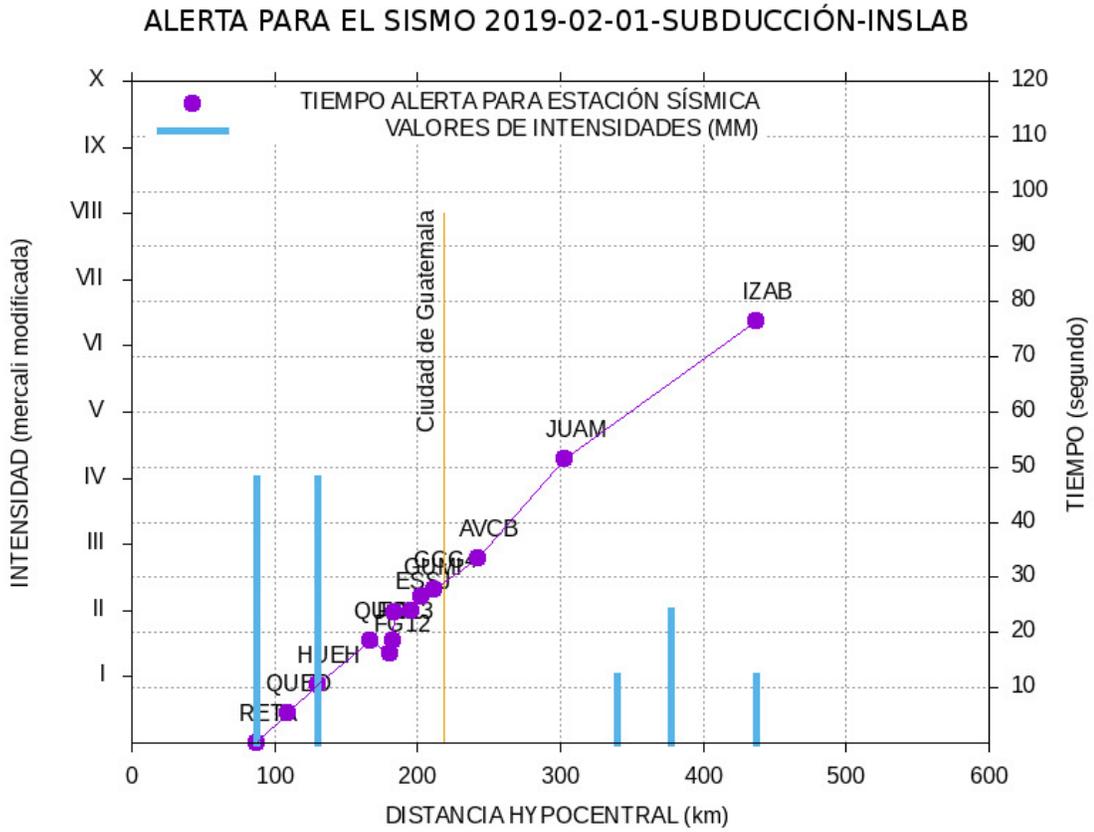
Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Apéndice 15. **Gráficas de los tiempos de alerta**



Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Apéndice 16. Gráficas de los tiempos de alerta



Fuente: elaboración propia, empleando gnuplot 5.0.

Apéndice 17. **Código fuente para la elaboración de las curvas de tiempo de viaje con los sismogramas, empelando el software Seismic Analisys Code (sac)**

```

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO...avel_time/crear-travel-time.sh                                     Page 1 of 3

#!/bin/bash

source "/home/diego/SAC.bash"
dir_top="$HOME/tesis/tesis-DIEGO_en_luisa"
dir_analisis="$HOME/tesis/tesis-DIEGO_en_luisa/travel_time"

info_estaciones="$dir_analisis/bbEstaciones.csv"
info_sismos="$dir_analisis/catalogo_depurado.csv"

for archivo in *.seed
do
    year=${archivo%.*}
    year=${year:0:4}
    day=${archivo%.*}
    day=${day:4:10}
    day_j=${archivo%.*}
    day_j=${day_j:11:16}
    dir_name="$year"_"$day_j"_dir
    #mkdir $dir_name
    dir_new="$dir_analisis $dir_name"
    #rdseed -f "$dir_new" -d -o 1

    echo "INICIANDO ANALISIS.." "$year"-"$day_j"

    [ -f listado_estaciones.txt ]
    rm listado_estaciones.txt
    echo "BORRANDO LISTADO DE ESTACIONES ANTERIOR"

    [ -f phases.txt ]
    rm phases.txt
    echo "BORRANDO LISTADO LAS FASES ANTERIOR"

    ##### inicia a ingresar informacion a los headers
    registro "HH"SAC

    echo $registro
    -e "INFORMACION DEL SISMO\n"
    "DATE" $year/"$day

    "$info_sismos" | while IFS="," read -r id $year-$day_j Time evla evlo evdp magnitud mtype
    imm_max f_sismica

    # echo $id
    # echo $date
    # echo $time
    "LATITUD" "$evla
    "LONGITUD" "$evlo
    "PROFUNDIDAD" "$evdp" km"
    "MAGNITUD" "$magnitud

    # echo $mtype
    # echo $imm max
    # echo $f_sismica

    ""
    "CARGANDO REGISTRO" $registro
    $registro | while IFS="," read -r file_name

    net=${file_name[6]}
    "NETWORK" $net
    est=${file_name[7]}
    "ESTACION" $est
    loc=${file_name[8]}
    "LOCATION" $loc
    com=${file_name[9]}
    "COMPONENTE" $com

```

## Continuación del apéndice 17.

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO...avel\_time/crear-travel-time.sh

Page 2 of 3

```
    "INFORMACION ESTACION"
    $info_estaciones $est while IFS="," do
        "LATITUD " ${info[1]}
        lat=${info[1]}
        "LONGITUD " ${info[2]}
        long=${info[2]}
        "ELEVACION " ${info[3]}
        elev=${info[3]}
        $net,$est,$lat,$long >> "$dir_new/listado_estaciones.txt"
        $year,$day_j,$net,$est,$lat,$long >> "../listado_estaciones_general.txt"
    done
    -e ""

#sleep 1
sac
echo on
read $registro
rmean
rtrend
taper
ch stla $lat
ch stlo $long
ch stel $elev
ch evla $evla
ch evlo $evlo
ch evdp $evdp
ch mag $magnitud
cho A
ch T0
lh stla stlo stel evla evlo evdp mag A T0
write over

setbb origin &1,0MARKER
#setbb phaseP &1,AMARKER
#setbb phaseS &1,T0MARKER
setbb estacion &1,kstnm
setbb network &1,knetwk
#getbb to phases.txt names off newline off network estacion origin phaseP phaseS
getbb to phases.txt names off newline off network estacion origin
quit

    -e "\n.....\n"

#sleep 2

##### termina de ingresar informacion a los header de sac
#### imprimir los sismogramas

    "IMPRIMIENDO TRAVELTIME..."

sac
echo on
r *HH*Z*SAC
rmean
rtr
taper
qdp off
xdiv power off
ydiv increment 50
beginframe
sss
```

## Continuación del apéndice 17.

```
File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO...avel_time/crear-travel-time.sh Page 3 of 3

timewindow 0 350
traveltime model iasp91 phase Pn Sn quiet
prs ttime off orient portrait s 2 l kstnm ylabel 'TIEMPO (s)' xlabel off
qs
endframe
pause period 2
saveimg $year-$day_j.pdf
quit

"TERMINA ANALISIS " "$year"-"$day_j"
#sleep 2
..
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 18. Código fuente para las gráficas de tiempos de viaje travel time empleando gnuplot 5.0

```
File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO...luisa/graficas/travel_time.gnu Page 1 of 1

list=system('cat listado_grupo')

do for [ name in list] {
    file = "travel_time_". name. ".png"
    data = name. ".txt"
    graficat = "TIEMPO DE VIAJE ZONA ", name

    set title graficat font 'arialblack,15'
    set xlabel 'DISTANCIA HYPOCENTRAL (km)'
    set xrange [0 : 600]
    set grid
    set ylabel 'TIEMPO (segundo)'
    set key left top
    set key reverse

    plot 'ttlayer.out' using 1:2 with line dt 5 lt 7 title 'Vp modelo local INSIVUMEH' axes xlyl,\
        'ttlayer.out' using 1:3 with line dt 5 lt 6 title 'Vs modelo local INSIVUMEH' axes xlyl,\
        data using 2:3 lt 7 lc 7 lw 3 notitle axes xlyl,\
        data using 2:5 lt 7 lc 6 lw 3 notitle axes xlyl

    set terminal png size 800,600
    set output file
    replot
}
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 19. Código fuente para la elaboración de las gráficas de tiempos de alerta y IMM

```
File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO...graficas/tiempo_alerta_imm.gnu Page 1 of 1

list=system('cat listado_gregoriano')

do for [ name in list] {
  file = "alerta_imm ". name. ".png"
  data = name. ".out"
  graficat = "ALERTA PARA EL SISMO ". name
  distancia = name. "-distancia-epi.txt"
  set grid y2tics
  set grid xtics
  set title graficat font 'arialblack,15'

  set xlabel 'DISTANCIA HYPOCENTRAL (km)'
  set xrange [0 : 600]
  set x2range [0 : 600]

  set y2label 'TIEMPO (segundo)'
  set y2range [0 : 120]
  set y2tics ( '10' 10, '20' 20, '30' 30, '40' 40, '50' 50, '60' 60, '70' 70, '80' 80, '90' 90, '100' 100,
  '110' 110, '120' 120)

  set ylabel 'INTENSIDAD (mercali modificada)'
  set ytics nomirror
  set ytics ('I' 1, 'II' 2, 'III' 3, 'IV' 4, 'V' 5, 'VI' 6, 'VII' 7, 'VIII' 8, 'IX' 9, 'X' 10)
  set tics out
  set autoscale y
  set yrange [0 : 10]

  set key left top
  set key reverse

  set key left top
  set key reverse

  plot data u 2:7:1 w labels offset char 1,1 notitle axes x2y2,\
  data u 2:7 lt 7 lc 1 lw 6 title 'TIEMPO ALERTA PARA ESTACION SISMICA' axes x2y2,\
  data u 2:8 w impulse title 'VALORES DE INTENSIDADES (MM)' lc 3 lw 5 axes x1y1,\
  distancia u 4:5 w impulse notitle dt 2,\
  distancia u 4:5:2 w labels notitle font 'arial,12' rotate by 90 offset -1,-4,\
  data u 2:7 w line notitle lc 1 axes x2y2,\

  set terminal png size 800,600
  set output file
  replot
}
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 20. Código fuente para la elaboración de los tiempos de alerta

```
File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO...a/graficas/tiempo_alerta_1.gnu Page 1 of 1

#list="CORTICAL" 'SUBDUCCION-INTERFASE' 'SUBDUCCION-INSLAB-LOCAL' 'SUBDUCCION-INSLAB-REGIONAL'
list=system('cat listado_grupo')

do for [ name in list] {
    file = "alerta_zona". name. ".png"
    data = name. ".txt"
    data2 = name. " distancia epi.txt"
    graficat = "ALERTA PARA SISMOS EN ZONA ". name

    set title graficat font 'arialblack,15'
    set xlabel 'DISTANCIA HYPOCENTRAL (km)'
    set xrange [0 : 600]
    set grid
    set ylabel 'TIEMPO (segundo)'
    set key left top
    set key reverse

    plot data u 2:7 lt 7 lc 7 lw 3 title 'ESTACION SISMICA' axes x1y1,\
        data u 2:7 w line lt 7 notitle,\
        # data2 u 4:5 w impulse,\
        # data2 u 4:5:2 w labels font 'arial,7'

    set terminal png size 800,600
    set output file
    replot
}
}
```

Fuente: elaboración propia.

## Apéndice 21. Código fuente para la elaboración de la gráfica del tiempo para la caracterización del sismo

```
File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO...aficas/tiempo_caracterizar.gnu Page 1 of 1

set title 'TIEMPO (S-P)' font 'arialblack,15'
set xlabel 'DISTANCIA HYPOCENTRAL (km)'
set xrange [30 : 215]
set yrange [0 : 40]
set grid
set ylabel 'TIEMPO (segundo)'
set key left top
set key reverse

plot 'caracterizacion_sismo.csv' u 3:8 w impulse title 'PRIMERA ESTACION' lc 3 lw 6,\
    'caracterizacion_sismo.csv' u 3:8:1 w labels offset 0,3 rotate by 90 notitle

set terminal png size 800,600
set output 'caracterizacion.png'
replot
```

Fuente: elaboración propia.

# ANEXOS

## Anexo 1. Registros de PGA del INSIVUMEH

ACELERACIONES PICO															
FECHA	RED	AGENCIA	ESTACION	COMPONENTE	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION	PGA (m/s <sup>2</sup> )	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGA (%g)	IMM	MAGNITUD	DISTANCIA (*)	DISTANCIA (km)	Dhijo (km)
2013-09-07	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00480	0.480	0.05	I	6.5	2.69	298.59	298.66
2013-09-07	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00774	0.774	0.08	I	6.5	2.69	298.59	298.66
2013-09-07	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.14740	14.740	1.50	IV	6.5	0.93	103.23	103.43
2013-09-07	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.16050	16.050	1.64	IV	6.5	0.93	103.23	103.43
2013-09-07	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNE	15.7300	-88.5843	0.01	0.00589	0.589	0.06	I	6.5	3.59	398.49	398.54
2013-09-07	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNN	15.7300	-88.5843	0.01	0.00488	0.488	0.05	I	6.5	3.59	398.49	398.54
2013-09-07	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.01081	1.081	0.11	I	6.5	3.15	349.65	349.71
2013-09-07	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.00824	0.824	0.08	I	6.5	3.15	349.65	349.71
2013-09-07	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.47299	47.299	4.83	V	6.5	0.42	46.62	47.07
2013-09-07	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.38635	38.635	3.94	V	6.5	0.42	46.62	47.07
2014-06-16	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00196	0.196	0.02	I	5.1	2.66	295.26	295.30
2014-06-16	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00264	0.264	0.03	I	5.1	2.66	295.26	295.30
2014-06-16	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.18354	18.354	1.87	IV	5.1	0.45	49.95	50.21
2014-06-16	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.16210	16.210	1.65	IV	5.1	0.45	49.95	50.21
2014-06-16	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.00792	0.792	0.08	I	5.1	2.62	291.06	291.11
2014-06-16	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.01182	1.182	0.12	I	5.1	2.62	291.06	291.11
2014-06-16	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.04253	4.253	0.43	II-III	5.1	0.86	95.46	95.60
2014-06-16	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.03063	3.063	0.31	II-III	5.1	0.86	95.46	95.60
2014-07-07	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00469	0.469	0.05	I	6.4	3.02	335.22	335.28
2014-07-07	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00551	0.551	0.06	I	6.4	3.02	335.22	335.28
2014-07-07	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.39655	39.655	4.05	V	6.4	1.10	122.10	122.27
2014-07-07	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.65960	65.960	6.73	V	6.4	1.10	122.10	122.27
2014-07-07	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.04480	4.480	0.46	II-III	6.4	3.31	367.41	367.47
2014-07-07	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.05318	5.318	0.54	II-III	6.4	3.31	367.41	367.47
2014-07-07	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.66962	66.962	6.83	V	6.4	0.77	85.47	85.71
2014-07-07	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.54865	54.865	5.60	V	6.4	0.77	85.47	85.71
2014-08-28	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00063	0.063	0.01	I	5.5	2.49	276.39	276.44
2014-08-28	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00082	0.082	0.01	I	5.5	2.49	276.39	276.44
2014-08-28	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.03315	3.315	0.34	II-III	5.5	1.24	137.64	137.75
2014-08-28	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.03799	3.799	0.39	II-III	5.5	1.24	137.64	137.75
2014-08-28	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.00201	0.201	0.02	I	5.5	3.38	375.18	375.22
2014-08-28	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.00175	0.175	0.02	I	5.5	3.38	375.18	375.22
2014-08-28	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.15644	15.644	1.60	IV	5.5	0.43	47.73	48.05
2014-08-28	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.15865	15.865	1.62	IV	5.5	0.43	47.73	48.05
2015-12-17	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00314	0.314	0.03	I	5.8	4.32	479.52	479.56
2015-12-17	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00343	0.343	0.03	I	5.8	4.32	479.52	479.56
2015-12-17	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.14686	14.686	1.50	IV	5.8	2.11	234.21	234.28
2015-12-17	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.10879	10.879	1.11	II-III	5.8	2.11	234.21	234.28
2015-12-17	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.06138	6.138	0.63	II-III	5.8	3.78	419.58	419.62
2015-12-17	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.08340	8.340	0.85	II-III	5.8	3.78	419.58	419.62
2015-12-17	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.06998	6.998	0.89	II-III	5.8	2.26	250.86	250.93
2015-12-17	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.06525	6.525	0.87	II-III	5.8	2.26	250.86	250.93
2016-06-15	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00093	0.093	0.01	I	5.3	2.28	253.08	253.14
2016-06-15	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00172	0.172	0.02	I	5.3	2.28	253.08	253.14
2016-06-15	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.04734	4.734	0.48	II-III	5.3	1.21	134.31	134.41
2016-06-15	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.04426	4.426	0.45	II-III	5.3	1.21	134.31	134.41
2016-06-15	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.00502	0.502	0.05	I	5.3	3.20	355.20	355.24
2016-06-15	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.00432	0.432	0.04	I	5.3	3.20	355.20	355.24
2016-06-15	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.19112	19.112	1.95	IV	5.3	0.41	45.51	45.82
2016-06-15	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.22720	22.720	2.32	IV	5.3	0.41	45.51	45.82
2017-06-14	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00496	0.496	0.05	I	6.9	2.60	288.60	288.68
2017-06-14	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00654	0.654	0.07	I	6.9	2.60	288.60	288.68
2017-06-14	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.17143	17.143	1.75	IV	6.9	0.64	71.04	71.37
2017-06-14	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.21290	21.290	2.17	IV	6.9	0.64	71.04	71.37
2017-06-14	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.32700	32.700	3.34	IV	6.9	0.49	54.39	54.83
2017-06-14	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.37416	37.416	3.82	IV	6.9	0.49	54.39	54.83
2017-09-08	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00906	0.906	0.09	I	7.7	4.44	492.84	492.90
2017-09-08	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.01031	1.031	0.11	I	7.7	4.44	492.84	492.90
2017-09-08	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.92597	92.597	9.45	VI	7.7	2.34	259.74	259.85
2017-09-08	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.65285	65.285	6.66	V	7.7	2.34	259.74	259.85

Continuación el anexo 1.

ACELERACIONES PICO															
2017-09-08	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.15000	15.000	1.53	IV	7.7	4.31	478.41	478.47
2017-09-08	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.12203	12.203	1.25	II-III	7.7	4.31	478.41	478.47
2017-09-08	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.36771	36.771	3.75	IV	7.7	2.20	244.20	244.32
2017-09-08	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.40177	40.177	4.10	V	7.7	2.20	244.20	244.32
2017-11-04	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.11892	11.892	1.22	II-III	5	0.76	84.91	85.06
2017-11-04	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.12210	12.210	1.22	II-III	5	0.76	84.91	85.06
2017-11-04	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.01919	1.919	0.20	II-III	5	1.58	175.54	175.61
2017-11-04	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.05382	5.382	0.55	II-III	5	1.58	175.54	175.61
2017-11-04	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00119	0.119	0.01	I	5	2.65	293.73	293.77
2017-11-04	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00124	0.124	0.01	I	5	2.65	293.73	293.77
2017-11-04	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.00196	0.196	0.02	I	5	3.72	413.09	413.12
2017-11-04	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.00150	0.150	0.02	I	5	3.72	413.09	413.12
2018-04-08	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.01542	1.542	0.16	I	5.1	0.73	81.55	81.71
2018-04-08	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.02064	2.064	0.21	II-III	5.1	0.73	81.55	81.71
2018-04-08	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.01250	1.250	0.13	I	5.1	1.54	171.04	171.11
2018-04-08	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.01181	1.181	0.12	I	5.1	1.54	171.04	171.11
2018-04-08	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00151	0.151	0.02	I	5.1	2.48	275.41	275.46
2018-04-08	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00157	0.157	0.02	I	5.1	2.48	275.41	275.46
2018-04-08	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNE	15.7300	-88.5843	0.01	0.00654	0.054	0.01	I	5.1	3.67	407.40	407.43
2018-04-08	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNN	15.7300	-88.5843	0.01					5.1	3.67	407.40	407.43
2018-04-08	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.00127	0.127	0.01	I	5.1	3.62	402.29	402.32
2018-04-08	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.00113	0.113	0.01	I	5.1	3.62	402.29	402.32
2018-08-04	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.00117	0.117	0.01	I	5.1	1.19	132.51	132.60
2018-08-04	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.00150	0.150	0.02	I	5.1	1.19	132.51	132.60
2018-08-04	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.00145	0.145	0.01	I	5.1	1.81	200.68	200.74
2018-08-04	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.00227	0.227	0.02	I	5.1	1.81	200.68	200.74
2018-08-04	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNE	15.7300	-88.5843	0.01					5.1	3.18	352.52	352.56
2018-08-04	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNN	15.7300	-88.5843	0.01					5.1	3.18	352.52	352.56
2018-08-04	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.00040	0.040	0.00	I	5.1	3.49	386.91	386.95
2018-08-04	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.00034	0.034	0.00	I	5.1	3.49	386.91	386.95
2018-10-12	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.11117	11.117	1.13	II-III	5.1	0.52	57.31	57.53
2018-10-12	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.08474	8.474	0.86	II-III	5.1	0.52	57.31	57.53
2018-10-12	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.02019	2.019	0.21	II-III	5.1	1.26	139.70	139.80
2018-10-12	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.02074	2.074	0.21	II-III	5.1	1.26	139.70	139.80
2018-10-12	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00448	0.448	0.05	I	5.1	2.19	242.71	242.77
2018-10-12	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00248	0.248	0.03	I	5.1	2.19	242.71	242.77
2018-10-12	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNE	15.7300	-88.5843	0.01	0.00053	0.053	0.01	I	5.1	3.33	370.08	370.12
2018-10-12	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNN	15.7300	-88.5843	0.01					5.1	3.33	370.08	370.12
2018-10-12	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.00179	0.179	0.02	I	5.1	3.28	363.59	363.62
2018-10-12	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.00178	0.178	0.02	I	5.1	3.28	363.59	363.62
2018-10-28	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00119	0.119	0.01	I	5.1	1.60	177.17	177.24
2018-10-28	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.00140	0.140	0.01	I	5.1	1.11	122.70	122.80
2018-10-28	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.00233	0.233	0.02	I	5.1	1.11	122.70	122.80
2018-10-28	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.00528	0.528	0.05	I	5.1	1.60	177.16	177.23
2018-10-28	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.00487	0.487	0.05	I	5.1	1.60	177.16	177.23
2018-10-28	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNE	15.7300	-88.5843	0.01					5.1	2.87	318.83	318.87
2018-10-28	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNN	15.7300	-88.5843	0.01					5.1	2.87	318.83	318.87
2018-10-28	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.00079	0.079	0.01	I	5.1	3.16	351.21	351.25
2018-10-28	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.00102	0.102	0.01	I	5.1	3.16	351.21	351.25
2019-02-01	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNE	15.3182	-91.5025	1.87	0.30214	30.214	3.08	IV	5.5	1.00	110.86	111.00
2019-02-01	GI	INSIVUMEH	HUEH	HNN	15.3182	-91.5025	1.87	0.24055	24.055	2.45	IV	5.5	1.00	110.86	111.00
2019-02-01	GI	INSIVUMEH	RETA	HNE	14.5247	-91.6950	0.21	0.20500	20.500	3.01	IV	5.5	0.79	87.63	87.61
2019-02-01	GI	INSIVUMEH	RETA	HNN	14.5247	-91.6950	0.21	0.29126	29.126	2.97	IV	5.5	0.79	87.63	87.61
2019-02-01	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNE	14.5600	-89.3413	0.96	0.00267	0.267	0.03	I	5.5	3.08	341.37	341.41
2019-02-01	GI	INSIVUMEH	CHIE	HNN	14.5600	-89.3413	0.96	0.00368	0.368	0.04	I	5.5	3.08	341.37	341.41
2019-02-01	GI	INSIVUMEH	PETF	HNE	16.9163	-89.8667	0.12	0.02289	2.289	0.23	II-III	5.5	3.25	360.78	360.82
2019-02-01	GI	INSIVUMEH	PETF	HNN	16.9163	-89.8667	0.12	0.01545	1.545	0.16	I	5.5	3.25	360.78	360.82
2019-02-01	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNE	15.7300	-88.5843	0.01	0.00747	0.747	0.08	I	5.5	3.91	433.92	433.96
2019-02-01	GI	INSIVUMEH	IZAB	HNN	15.7300	-88.5843	0.01	0.00028	0.028	0.00	I	5.5	3.91	433.92	433.96

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh* [https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

Anexo 2. **S-file del evento sísmico registrado el día 07 de septiembre de 2013**

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis\_seisan/2013-09-07.out Page 1 of 1

```

2013 9 7 0013 28.2 L 14.537 -92.311 67.6 GUA 10 0.9 6.6LGUA 5.7CGUA 1
GAP=299 1.39 10.8 11.1 18.8 0.4833E+02 -0.2248E+02 0.2615E+02E
ACTION:UP 19-07-19 22:08 OP:dacr STATUS: ID:20130907001230d I
OLDACT:UP 19-07-07 21:23 OP:DACR STATUS: ID:20130907001230d 3
OLDACT:UP 19-07-07 10:50 OP:dacr STATUS: ID:20130907001230d 3
OLDACT:UP 19-07-07 10:21 OP:dacr STATUS: ID:20130907001230d 3
OLDACT:UP 19-07-07 10:20 OP:dacr STATUS: ID:20130907001230d 3
OLDACT:REG 19-07-07 10:10 OP:dacr STATUS: ID:20130907001230d 3
2013-09-07 MW6.4 Near Coast Of Chiapas, Mexico.352486.seed 6
STAT SP IPHASW D HRMM SECON CODA AMPLIT PERI AZIMU VELO AIN AR TRES W DIS CAZ7
RETA HZ P 013 41.72 376 130 -0.0710 66.4 91
RETA HN S 3 013 52.26 130 -0.16 2 66.4 91
RETA HN IAML 014 5.35 72.4e4 0.88 66.4 91
HUEH HZ P 013 49.00 245 112 0.3410 123 45
HUEH HE S 3 014 5.24 112 0.59 2 123 45
HUEH HE IAML 014 13.68 82.8e4 2.43 123 45
MT03 HZ P 014 11.80 412 97 -0.7710 318 92
MT03 HE S 014 46.51 97 -0.6910 318 92
MT03 HE IAML 015 5.79 60408.8 1.31 318 92
CHIE HZ P 014 12.52 400 97 0.1610 320 89
CHIE HE S 3 014 44.69 97 -2.15 2 320 89
CHIE HE IAML 015 6.47 86042.2 1.65 320 89
SNET HZ P 014 15.83 371 96 0.3710 346 105
SNET HN S 3 014 54.11 96 1.77 2 346 105
SNET HN IAML1 015 3.01 44.5e4 0.40 346 105
PETF HZ P 014 18.81 449 96 0.46 9 371 45
PETF HE S 3 014 56.21 96 -1.29 2 371 45
PETF HE IAML 015 32.59 61133.6 0.73 371 45
IZAB HZ P 014 24.26 458 95 -0.31 9 422 71
IZAB HN S 3 015 5.30 95 -3.27 2 422 71
IZAB HN IAML 015 53.16 12.8e4 1.43 422 71
PACA HZ P 014 28.25 400 95 0.06 9 447 105
PACA HE S 3 015 16.29 95 1.28 2 447 105
PACA HE IAML 015 39.41 40.7e4 0.61 447 105
CNCH HZ P 014 35.43 419 94 0.18 8 504 106
CNCH HE S 3 015 30.24 94 2.66 2 504 106
CNCH HE IAML 015 46.08 40.2e4 0.74 504 106
TGUH BZ P 014 39.66 462 94 -0.94 8 546 95
TGUH B2 S 015 38.67 94 1.56 8 546 95
TGUH B2 IAML 016 19.80 28807.4 1.05 546 95

```

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh*[https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

Anexo 3. **S-file del evento sísmico registrado el día 16 de junio de 2016**

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis_seisan/2014-06-16.out															Page	
2014	616	1004	28.9	L	15.225	-92.023	0.0	GUA	7	1.4	5.7	LGUA	5.3	CGUA	1	
GAP=199			2.57		11.2	19.6	24.3	0.8300E+02				-0.5798E+02		-0.6991E+01E		
ACTION:UP	19-07-19	23:00	OP:dacr	STATUS:										ID:20140616100331d	I	
OLDACT:UP	19-07-07	11:22	OP:dacr	STATUS:										ID:20140616100331d	3	
OLDACT:UP	19-07-07	11:09	OP:dacr	STATUS:										ID:20140616100331d	3	
OLDACT:UP	19-07-07	11:05	OP:dacr	STATUS:										ID:20140616100331d	3	
OLDACT:REG	19-07-07	10:52	OP:dacr	STATUS:										ID:20140616100331d	3	
2014-06-16 MW5.0 Mexico-Guatemala Border Region.917218.seed															6	
STAT	SP	IPHASW	D	HRMM	SECON	CODA	AMPLIT	PERI	AZIMU	VELO	AIN	AR	TRES	W	DIS	CAZ7
HUEH	HZ	IP		10	4	38.60	197				36		-2.1810	56.8	80	
HUEH	HE	IS	4	10	4	44.90					36		-5.11	0	56.8	80
HUEH	HE	IAML		10	4	52.50	55.0e4	1.03							56.8	80
RETA	HZ	IP		10	4	43.76	213				31		-0.7410	85.2	156	
RETA	HN	IS	3	10	4	54.51					31		-2.12	2	85.2	156
RETA	HN	IAML		10	4	59.70	22.3e4	0.61							85.2	156
CCIG	BZ	IP		10	4	50.16	249				31		0.2710	118	354	
CCIG	BE	IS	3	10	5	4.62					31		-1.61	2	118	354
CCIG	BE	IAML		10	5	10.67	96057.9	1.11							118	354
PETF	HZ	IP		10	5	13.38	398				26		0.2410	297	51	
PETF	HN	IS	3	10	5	48.54					26		0.92	2	297	51
PETF	HN	IAML		10	5	56.22	73497.6	0.65							297	51
CHIE	HZ	IP		10	5	13.94	285				26		0.3210	298	104	
CHIE	HN	IS	4	10	5	52.12					26		3.65	0	298	104
CHIE	HN	IAML		10	5	59.02	41359.8	0.56							298	104
SNET	HZ	IP		10	5	21.75	398				26		2.2110	346	119	
SNET	HE	IS	3	10	6	2.33					26		3.33	2	346	119
SNET	HE	IAML		10	6	7.70	15933.5	0.94							346	119
TGUH	BZ	IP		10	5	42.42	422				26		-0.03	8	528	104
TGUH	B2	IS	3	10	6	40.94					26		1.15	2	528	104
TGUH	B2	IAML		10	7	1.96	4949.0	0.93							528	104

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh* [https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

Anexo 4. **S-file del evento sísmico registrado el día 07 de julio de 2014**

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis_seisan/2014-07-07.out															Page 1 o	
2014	7	7	1123	57.4	L	14.593	-92.523	73.3	GUA	6	0.7	6.8	LGUA	5.8	CGUA	1
GAP=302			0.75			8.3	19.1	13.1	0.9128E+02			0.3200E+01			0.1075E+02E	
ACTION:UP	19-07-19	23:10	OP:dacr	STATUS:											ID:20140707112255d	I
OLDACT:UP	19-07-07	11:17	OP:dacr	STATUS:											ID:20140707112255d	3
OLDACT:REG	19-07-07	10:54	OP:dacr	STATUS:											ID:20140707112255d	3
2014-07-07 MW6.9 Near Coast Of Chiapas, Mexico.115265.seed																
STAT	SP	IPHASW	D	HRMM	SECON	CODA	AMPLIT	PERI	AZIMU	VELO	AIN	AR	TRES	W	DIS	CAZ7
RETA	HZ	IP		1124	13.87	517						123	0.0510	89.5	95	
RETA	HN	IS	3	1124	25.03							123	-1.56	2	89.5	95
RETA	HN	IAML		1124	28.39		88.2e4	0.78							89.5	95
HUEH	HZ	IP		1124	19.89	427						112	0.1410	136	54	
HUEH	HE	IS	3	1124	37.85							112	0.70	2	136	54
HUEH	HE	IAML		1124	53.95		87.7e4	2.28							136	54
CHIE	HZ	IP		1124	44.57	544						97	0.0210	343	90	
CHIE	HN	IS	4	1125	24.53							97	3.23	0	343	90
CHIE	HN	IAML		1126	1.66		20.4e4	2.42							343	90
SNET	HZ	IP		1124	47.89	510						97	0.14	9	369	105
SNET	HE	IS	3	1125	25.60							97	-1.39	2	369	105
SNET	HE	IAML		1125	33.62		24.3e4	0.38							369	105
PETF	HZ	IP		1124	49.02	430						96	-0.20	9	384	48
PETF	HE	IS	4	1125	29.60							96	-0.00	0	384	48
PETF	HE	IAML		1126	4.56		24.0e4	0.74							384	48
CNCH	HZ	IP		1125	7.30							95	-0.23	8	527	105
CNCH	HE	IS	3	1126	5.11							95	2.91	2	527	105
CNCH	HE	IAML		1126	12.58		24.3e4	1.16							527	105

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh* [https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

Anexo 5. **S-file del evento sísmico registrado el día 28 de agosto de 2014**

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis\_seisan/2014-08-28.out Page 1 of 1

```

2014 828 0827 46.2 L 14.050 -91.580 43.1 GUA 11 1.3 5.3LGUA 5.5CGUA 1
GAP=246 1.79 10.6 15.7 21.9 0.1181E+03 -0.1051E+03 0.6288E+01E
ACTION:UP 19-07-19 23:15 OP:dacr STATUS: ID:20140828082641 I
OLDACT:UP 19-07-07 11:50 OP:dacr STATUS: ID:20140828082641 3
OLDACT:UP 19-07-07 11:35 OP:dacr STATUS: ID:20140828082641 3
OLDACT:UP 19-07-07 11:34 OP:dacr STATUS: ID:20140828082641 3
OLDACT:REG 19-07-07 10:54 OP:dacr STATUS: ID:20140828082641 3
2014-08-28_MW5.2_Guatemala.914542.seed 6
STAT SP IPHASW D HRMM SECON CODA AMPLIT PERI AZIMU VELO AIN AR TRES W DIS CAZ7
CRIN HZ P 828 57.20
CRIN HN IS 3 829 52.09
CRIN HN IAML 830 14.62 11850.2 0.96
RETA HZ IP 827 54.96 332 141 -0.2410 32.0 12
RETA HN IS 3 828 3.07 141 0.82 2 32.0 12
RETA HN IAML 828 5.10 48.1e4 1.06 32.0 12
HUEH HZ IP 828 6.01 215 101 0.0110 122 13
HUEH HE IS 828 21.02 101 -0.4510 122 13
HUEH HE IAML 828 29.26 24.5e4 1.36 122 13
CCIG BZ IP 828 19.37 353 95 0.1810 229 350
CCIG BN IS 3 828 46.26 95 1.32 2 229 350
CCIG BN IAML 828 56.46 22575.2 1.11 229 350
MT03 HZ IP 828 22.26 387 94 -0.7410 259 86
MT03 HN IS 3 828 49.41 94 -2.30 2 259 86
MT03 HN IAML 829 7.81 4245.5 2.49 259 86
CHIE HZ IP 828 23.16 382 94 0.1010 263 82
CHIE HE IS 3 828 51.10 94 -0.73 2 263 82
CHIE HE IAML 829 9.84 6461.2 1.90 263 82
SNET HZ IP 828 25.04 306 94 -0.0410 280 102
SNET HE IS 3 828 55.94 94 0.51 2 280 102
SNET HE IAML 829 9.50 39355.0 0.51 280 102
PETF HZ IP 828 35.00 398 93 0.3710 359 34
PETF HE IS 3 829 20.02 93 7.59 2 359 34
PETF HE IAML 829 32.93 15701.2 1.08 359 34
PACA HZ IP 828 39.26 313 93 1.40 9 381 103
PACA HN IS 3 829 21.41 93 3.23 2 381 103
PACA HN IAML 829 41.73 402.0 0.39 381 103
CNCH HZ IP 828 44.77 453 92 -0.14 9 438 104
CNCH HE IS 3 829 31.92 92 1.21 2 438 104
CNCH HE IAML 829 46.81 24968.7 0.75 438 104
TGUH BZ IP 828 49.57 470 92 -1.25 8 485 92
TGUH B2 IS 4 829 47.49 92 6.24 0 485 92
TGUH B2 IAML 830 18.81 3090.8 1.84 485 92

```

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh*[https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

Anexo 6. **S-file del evento sísmico registrado el día 17 de diciembre de 2015**

```

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis_seisan/2015-12-17.out
Pa

2015 1217 1950 6.2 L 15.628 -92.591 72.9 GUA 12 1.2 6.5LGUA 5.8CGUA 1
GAP=252 2.21 12.9 18.3 29.1 0.9784E+02 0.9453E+02 0.2734E+03E
ACTION:UP 19-07-19 09:18 OP:dacr STATUS: ID:20151217194853 I
OLDACT:UP 19-07-19 09:15 OP:DACR STATUS: ID:20151217194853 3
OLDACT:UP 19-07-19 09:08 OP:dacr STATUS: ID:20151217194853 3
OLDACT:UP 19-07-19 09:07 OP:dacr STATUS: ID:20151217194853 3
OLDACT:UP 19-07-19 09:06 OP:dacr STATUS: ID:20151217194853 3
OLDACT:REE 19-07-06 21:07 OP:dacr STATUS: ID:20151217194853 3
OLDACT:REG 19-07-06 20:29 OP:dacr STATUS: ID:20151217194853 3
mini.seed 6
STAT SP IPHASW D HRMM SECON CODA AMPLIT PERI AZIMU VELO AIN AR TRES W DIS CAZ7
TACO HN IAML 1952 30.39 44488.9 3.16
CCIG BZ P 1950 20.71 391 124 -2.2610 87.2 34
CCIG BE S 1950 37.17 124 1.1110 87.2 34
CCIG BN IAML 1950 45.39 103.3e4 0.66 87.2 34
HUEH HZ P 1950 28.07 316 114 1.2110 122 106
HUEH HE S 3 1950 41.97 114 -1.01 2 122 106
HUEH HE IAML 1950 59.91 86.2e4 1.60 122 106
RETA HZ P 1950 28.97 555 108 -1.0610 156 142
RETA HE S 3 1950 48.69 108 0.07 2 156 142
RETA HN IAML 1950 59.66 39.4e4 1.26 156 142
GUNB HZ P 1950 45.65 510 100 1.0510 267 115
GUNB HE S 1951 14.17 100 -0.3910 267 115
GUNB HE AMP 1951 52.45 20.3e4 3.04 267 115
PETF HZ P 1950 50.43 426 98 -0.1910 324 64
PETF HE S 3 1951 22.16 98 -3.11 2 324 64
PETF HN IAML 1951 37.74 48.0e4 0.79 324 64
NUBE HZ P 1950 55.39 516 97 0.0610 358 122
NUBE HN S 3 1951 30.49 97 -3.17 2 358 122
NUBE HN IAML 1952 18.64 40262.9 3.79 358 122
CHIE HZ P 1950 56.58 494 97 0.05 9 369 108
CHIE HE S 3 1951 34.33 97 -1.46 2 369 108
CHIE HN IAML 1952 20.33 16.0e4 1.48 369 108
CEDA HZ P 1951 0.81 525 96 0.96 9 399 120
CEDA HE S 3 1951 38.12 96 -3.58 2 399 120
CEDA HN IAML 1952 5.89 16.9e4 1.34 399 120
JAYA HZ P 1951 0.60 535 96 0.28 9 403 122
JAYA HE S 3 1951 40.41 96 -2.12 2 403 122
JAYA HN IAML 1952 0.78 10.6e4 1.06 403 122
SNET HZ P 1951 3.30 96 0.39 9 421 120
SNET HN S 4 1951 42.65 96 -4.50 0 421 120
SNET HN IAML 1951 50.58 32269.0 3.54 421 120
PAVA HZ P 1951 6.74 448 95 0.47 9 447 118
PAVA HE S 1951 52.49 95 -0.64 9 447 118
PAVA HE IAML 1953 3.96 10.6e4 2.22 447 118

```

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh* [https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

## Anexo 7. S-file del evento sísmico registrado el día 15 de junio de 2016

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis_seisan/2016-06-15.out															Page 1 of 1								
2016	615	1346	54.3	L	13.918	-91.797	48.4	GUA	14	0.9	5.8	LGUA	5.6	CGUA	1								
GAP=253															1.14	9.8	10.5	27.9	0.8217E+02	0.8907E+00	0.8349E+02E		
ACTION:UP 19-07-19 23:53 OP:dacr STATUS:															ID:20160615134555	I							
OLDACT:UP 19-07-07 12:07 OP:dacr STATUS:															ID:20160615134555	3							
OLDACT:UP 19-07-07 12:06 OP:dacr STATUS:															ID:20160615134555	3							
OLDACT:UP 19-07-07 12:05 OP:dacr STATUS:															ID:20160615134555	3							
OLDACT:UP 19-07-07 12:04 OP:dacr STATUS:															ID:20160615134555	3							
OLDACT:REG 19-07-07 10:55 OP:dacr STATUS:															ID:20160615134555	3							
2016-06-15_mw5.4_Guatemala.6137.seed															6								
STAT	SP	IPHASW	D	HRMM	SECON	CODA	AMPLIT	PERI	AZIMU	VELO	AIN	AR	TRES	W	DIS	CAZ7							
RETA	HZ	IP		1347	6.97	320					114		0.1510	68.0	9								
RETA	HN	IS	3	1347	15.69						114		-0.89	2	68.0	9							
RETA	HN	IAML		1347	18.76		67.7e4	0.76						68.0	9								
HUEH	HZ	IP		1347	18.54	240					97		-0.0010	158	12								
HUEH	HE	IS	3	1347	36.40						97		-1.04	2	158	12							
HUEH	HE	IAML		1347	46.22		48.0e4	0.97						158	12								
GUNB	HZ	IP		1347	20.58	273					96		-0.1510	174	64								
GUNB	HE	IS	3	1347	41.49						96		0.16	2	174	64							
GUNB	HE	IAML		1347	48.64		11.3e4	0.83						174	64								
NUBE	HZ	IP		1347	25.11	476					94		-0.6410	218	90								
NUBE	HE	IS	3	1347	46.47						94		-3.79	2	218	90							
NUBE	HE	IAML		1347	51.79		36600.9	1.44						218	90								
JAYA	HZ	IP		1347	29.89	371					94		0.0510	256	96								
JAYA	HN	IS	3	1347	56.95						94		-0.59	2	256	96							
JAYA	HN	IAML		1347	59.01		39862.8	0.75						256	96								
CEDA	HZ	IP		1347	30.93	297					94		0.5410	260	93								
CEDA	HE	IS	3	1347	59.00						94		0.48	2	260	93							
CEDA	HE	IAML		1348	5.05		79808.8	1.90						260	93								
CCIG	BZ	IP		1347	31.68	323					94		0.0510	264	352								
CCIG	BN	IS	3	1348	1.44						94		0.70	2	264	352							
CCIG	BN	IAML		1348	10.05		63936.8	0.93						264	352								
CHIE	HZ	IP		1347	32.33	369					93		-0.2810	274	75								
CHIE	HN	IS	3	1348	5.41						93		2.92	2	274	75							
CHIE	HN	IAML		1348	12.07		16539.7	1.23						274	75								
SNET	HZ	IP		1347	33.51	359					93		0.4510	279	95								
SNET	HE	IS	3	1348	1.64						93		-1.65	2	279	95							
SNET	HE	IAML		1348	27.39		23784.8	2.44						279	95								
PAVA	HZ	IP		1347	37.38	420					93		0.2910	310	94								
PAVA	HE	IS	3	1348	12.56						93		2.10	2	310	94							
PAVA	HE	IAML		1348	38.96		37056.2	1.17						310	94								
PACA	HZ	IP		1347	46.20	443					92		0.45	9	379	97							
PACA	HE	IS	3	1348	27.34						92		1.46	2	379	97							
PACA	HE	IAML		1348	38.26		8767.8	0.96						379	97								
PETF	HZ	IP		1347	46.72	426					92		-0.08	9	391	32							
PETF	HE	IS	3	1348	30.36						92		2.62	2	391	32							
PETF	HE	IAML		1348	46.32		34419.6	0.73						391	32								
CNCH	HZ	IP		1347	52.39	471					92		-0.30	9	435	99							
CNCH	HN	IS	3	1348	39.61						92		1.40	2	435	99							
CNCH	HN	IAML		1348	52.06		18469.0	0.63						435	99								
TGUH	BZ	IP		1347	58.46	470					92		-1.05	8	489	88							
TGUH	B2	IS	3	1348	50.83						92		0.47	2	489	88							
TGUH	B2	IAML		1349	38.03		4819.1	1.58						489	88								

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh* [https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

## Anexo 8. S-file del evento sísmico registrado el día 15 de julio de 2016

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis\_seisan/2016-06-15.out Page 1 of 1

```

2016 615 1346 54.3 L 13.918 -91.797 48.4 GUA 14 0.9 5.8LGUA 5.6CGUA 1
GAP=253 1.14 9.8 10.5 27.9 0.8217E+02 0.8907E+00 0.8349E+02E
ACTION:UP 19-07-19 23:53 OP:dacr STATUS: ID:20160615134555 I
OLDACT:UP 19-07-07 12:07 OP:dacr STATUS: ID:20160615134555 3
OLDACT:UP 19-07-07 12:06 OP:dacr STATUS: ID:20160615134555 3
OLDACT:UP 19-07-07 12:05 OP:dacr STATUS: ID:20160615134555 3
OLDACT:UP 19-07-07 12:04 OP:dacr STATUS: ID:20160615134555 3
OLDACT:REG 19-07-07 10:55 OP:dacr STATUS: ID:20160615134555 3
2016-06-15_mw5.4_Guatemala.6137.seed 6
STAT SP IPHASW D HRMM SECON CODA AMPLIT PERI AZIMU VELO AIN AR TRES W DIS CAZ7
RETA HZ IP 1347 6.97 320 114 0.1510 68.0 9
RETA HN IS 3 1347 15.69 114 -0.89 2 68.0 9
RETA HN IAML 1347 18.76 67.7e4 0.76 68.0 9
HUEH HZ IP 1347 18.54 240 97 -0.0010 158 12
HUEH HE IS 3 1347 36.40 97 -1.04 2 158 12
HUEH HE IAML 1347 46.22 48.0e4 0.97 158 12
GUNB HZ IP 1347 20.58 273 96 -0.1510 174 64
GUNB HE IS 3 1347 41.49 96 0.16 2 174 64
GUNB HE IAML 1347 48.64 11.3e4 0.83 174 64
NUBE HZ IP 1347 25.11 476 94 -0.6410 218 90
NUBE HE IS 3 1347 46.47 94 -3.79 2 218 90
NUBE HE IAML 1347 51.79 36600.9 1.44 218 90
JAYA HZ IP 1347 29.89 371 94 0.0510 256 96
JAYA HN IS 3 1347 56.95 94 -0.59 2 256 96
JAYA HN IAML 1347 59.01 39862.8 0.75 256 96
CEDA HZ IP 1347 30.93 297 94 0.5410 260 93
CEDA HE IS 3 1347 59.00 94 0.48 2 260 93
CEDA HE IAML 1348 5.05 79808.8 1.90 260 93
CCIG BZ IP 1347 31.68 323 94 0.0510 264 352
CCIG BN IS 3 1348 1.44 94 0.70 2 264 352
CCIG BN IAML 1348 10.05 63936.8 0.93 264 352
CHIE HZ IP 1347 32.33 369 93 -0.2810 274 75
CHIE HN IS 3 1348 5.41 93 2.92 2 274 75
CHIE HN IAML 1348 12.07 16539.7 1.23 274 75
SNET HZ IP 1347 33.51 359 93 0.4510 279 95
SNET HE IS 3 1348 1.64 93 -1.65 2 279 95
SNET HE IAML 1348 27.39 23784.8 2.44 279 95
PAVA HZ IP 1347 37.38 420 93 0.2910 310 94
PAVA HE IS 3 1348 12.56 93 2.10 2 310 94
PAVA HE IAML 1348 38.96 37056.2 1.17 310 94
PACA HZ IP 1347 46.20 443 92 0.45 9 379 97
PACA HE IS 3 1348 27.34 92 1.46 2 379 97
PACA HE IAML 1348 38.26 8767.8 0.96 379 97
PETF HZ IP 1347 46.72 426 92 -0.08 9 391 32
PETF HE IS 3 1348 30.36 92 2.62 2 391 32
PETF HE IAML 1348 46.32 34419.6 0.73 391 32
CNCH HZ IP 1347 52.39 471 92 -0.30 9 435 99
CNCH HN IS 3 1348 39.61 92 1.40 2 435 99
CNCH HN IAML 1348 52.06 18469.0 0.63 435 99
TGUH BZ IP 1347 58.46 470 92 -1.05 8 489 88
TGUH B2 IS 3 1348 50.83 92 0.47 2 489 88
TGUH B2 IAML 1349 38.03 4819.1 1.58 489 88

```

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh*[https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

## Anexo 9. S-file del evento sísmico registrado el día 14 de julio de 2017

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis_seisan/2017-06-14.out															Page 1 of 1	
2017	614	0729	3.4	L	14.793	-92.189106.7	GUA	13	1.1	6.5	LGUA	5.8	CGUA	1		
GAP=243																
			1.33		11.1	14.9	15.7	0.1079E+03		-0.8629E+02		0.6263E+01E				
ACTION:UP 19-07-19 23:57 OP:dacr STATUS:															ID:20170614072805	I
OLDACT:UP 19-07-07 12:19 OP:DACR STATUS:															ID:20170614072805	3
OLDACT:UP 19-07-07 12:18 OP:DACR STATUS:															ID:20170614072805	3
OLDACT:UP 19-07-07 12:17 OP:DACR STATUS:															ID:20170614072805	3
OLDACT:REG 19-07-07 10:55 OP:dacr STATUS:															ID:20170614072805	3
2017-06-14 mww6.9 Guatemala.244183.seed																6
STAT	SP	IPHASW	D	HRMM	SECON	CODA	AMPLIT	PERI	AZIMU	VELO	AIN	AR	TRES	W	DIS	CAZ7
RETA	HZ	IP			729	20.05	514				148		-0.2410	60.9	119	
RETA	HE	IS	4		729	32.16					148		-1.33	0	60.9	119
RETA	HE	IAML			729	50.01		81.9e4	8.16						60.9	119
HUEH	HZ	IP			729	23.50	304				136		-0.1510	94.0	52	
HUEH	HN	IS	3		729	39.14					136		-0.32	2	94.0	52
HUEH	HN	IAML			729	52.83		83.4e4	1.85						94.0	52
CCIG	BZ	IP			729	31.32	381				119		0.6710	165	2	
CCIG	BN	IS	3		729	50.13					119		-1.80	2	165	2
CCIG	BN	IAML			729	58.98		33.2e4	1.42						165	2
GUNB	HZ	IP			729	34.83	452				114		-0.0910	200	96	
GUNB	HN	IS	3		730	1.47					114		1.95	2	200	96
GUNB	HN	IAML			730	15.96		31.4e4	1.43						200	96
NUBE	HZ	IP			729	43.31	515				107		-0.2710	278	110	
NUBE	HN	IS	3		730	11.39					107		-3.55	2	278	110
NUBE	HN	IAML			730	17.95		18.7e4	1.86						278	110
CHIE	HZ	IP			729	47.08	413				105		0.0710	308	94	
CHIE	HE	IS	3		730	20.38					105		-0.67	2	308	94
CHIE	HE	IAML			730	48.75		21.2e4	2.55						308	94
CEDA	HZ	IP			729	48.68	456				105		0.5410	321	110	
CEDA	HN	IS	3		730	27.86					105		4.81	2	321	110
CEDA	HN	IAML			730	54.85		52.3e4	1.29						321	110
SNET	HZ	IP			729	51.30	512				104		0.2510	342	111	
SNET	HN	IS	3		730	29.18					104		0.94	2	342	111
SNET	HN	IAML			730	41.54		20.9e4	0.13						342	111
PAVA	HZ	IP			729	54.51	519				102		-0.16	9	371	108
PAVA	HE	IS	3		730	34.76					102		0.08	2	371	108
PAVA	HE	IAML			730	57.54		27.9e4	1.08						371	108
IZAB	HZ	IP			729	57.39	472				101		-0.51	9	401	75
IZAB	HN	IS	4		730	49.23					101		8.80	0	401	75
IZAB	HN	IAML			731	30.21		419.0	1.47						401	75
PACA	HZ	IP			730	3.67	464				100		0.17	9	442	109
PACA	HN	IS	3		730	55.38					100		4.99	2	442	109
PACA	HN	IAML			731	22.16		25.9e4	1.67						442	109
CNCH	HZ	IP			730	9.97					99		-0.54	8	499	109
CNCH	HN	IS	3		731	4.55					99		1.67	2	499	109
CNCH	HN	IAML			731	17.04		18.8e4	0.59						499	109
TGUH	BZ	IP			730	14.70	518				98		-0.41	8	536	98
TGUH	BZ	IS	3		731	9.53					98		-1.54	2	536	98
TGUH	BZ	IAML			732	18.72		36891.9	2.13						536	98

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh*[https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

Anexo 10. **S-file del evento sísmico registrado el día 08 de septiembre de 2017**

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis\_seisan/2017-09-08.out Page 1 of 1

```

2017 9 8 0449 21.9 L 14.788 -93.641 92.8 GUA 10 1.1 8.1WGUA 1
GAP=314 2.75 17.4 19.5 54.3 0.9445E+02 0.5842E+03 0.2506E+03E
ACTION:UP 19-07-20 00:16 OP:dacr STATUS: ID:20170908044820 I
OLDACT:UP 19-07-20 00:13 OP:dacr STATUS: ID:20170908044820 3
OLDACT:UP 19-07-20 00:08 OP:dacr STATUS: ID:20170908044820 3
OLDACT:UP 19-07-07 20:38 OP:dacr STATUS: ID:20170908044820 3
OLDACT:UP 19-07-07 20:35 OP:dacr STATUS: ID:20170908044820 3
OLDACT:REG 19-07-07 10:55 OP:dacr STATUS: ID:20170908044820 3
2017-09-08 Mw8.1 Near Coast Of Chiapas, Mexico.149865.seed 6
STAT SP IPHASW D HRMM SECON CODA AMPLIT PERI AZIMU VELO AIN AR TRES W DIS CAZ7
RETA HZ P 449 52.97 109 -0.2410 212 98
RETA HE S 450 18.43 109 0.8210 212 98
HUEH HZ P 449 57.07 107 0.0310 237 75
HUEH HN S 450 23.29 107 -1.1210 237 75
HUEH HN IAML 451 1.78 92.0e4 1.09 237 75
NUBE HZ P 450 20.40 99 0.32 9 428 103
NUBE HN S 451 7.70 99 2.27 9 428 103
NUBE HN IAML 452 49.53 17.3e4 4.78 428 103
MT03 HZ P 450 24.41 98 -0.29 9 463 95
MT03 HE S 451 15.62 98 1.97 9 463 95
MT03 HE IAML 452 29.29 15.4e4 1.61 463 95
CHIE HZ P 450 24.68 98 0.31 9 464 93
CHIE HN S 451 12.20 98 -0.86 9 464 93
CHIE HN IAML 452 20.20 53.7e4 1.94 464 93
PETF HZ P 450 23.11 98 -1.38 9 468 59
PETF HN S 451 14.58 98 1.31 9 468 59
PETF HN IAML 452 8.53 68.2e4 2.47 468 59
JAYA HZ P 450 25.16 98 0.53 9 470 105
JAYA HE S 451 11.65 98 -1.89 9 470 105
JAYA HN IAML 452 11.11 49.9e4 1.65 470 105
CEDA HZ P 450 25.28 98 0.47 9 471 103
CEDA HN S 451 11.95 98 -1.90 9 471 103
CEDA HN IAML 452 36.07 132.8e4 2.24 471 103
SNET HZ P 450 28.05 97 0.37 8 491 104
SNET HE S 451 18.17 97 -0.79 8 491 104
SNET HE IAML 452 3.68 37.7e4 2.71 491 104
PAVA HN IAML 453 1.62 41.1e4 1.99 521 103

```

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh* [https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

Anexo 11. S-file del evento sísmico registrado el día 01 de febrero de 2019

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis\_seisan/2019-02-01.out

Page 1 of 2

```

2019 2 1 1614 11.4 L 14.654 -92.498 66.8 GUA 26 0.9 5.2CGUA 6.0WGUA 1
SPEC AVERAGE MO 18.1 ST102.9 OM 6.6 f00.341 R6.0425 AL 0.00 WI 20.0 MW 6.0 3
SPEC SD MO 0.5 ST159.5 OM 0.6 f00.255 R3.8266 AL WI MW 0.3 3
GAP=174 1.39 8.1 6.9 12.8 0.2925E+02 0.4323E+00 0.7723E+01E
ACTION:UP 19-03-04 15:40 OP:laa STATUS: ID:20190201161411 L I
OLDACT:UPD 19-02-12 22:02 OP:ralv STATUS: ID:20190201161411 L 3
OLDACT:UP 19-02-02 05:11 OP:ralv STATUS: ID:20190201161411 L 3
OLDACT:UP 19-02-01 17:21 OP:aerp STATUS: ID:20190201161414 3
OLDACT:REE 19-02-01 16:24 OP:laa STATUS: ID:20190201161414 3
SPEC THIGBH Z MO 18.1 ST 88.0 OM 7.1 f00.325 R4.0985 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.0 3
SPEC THIGBH Z T161428 K 0.000 GD 74.6 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC RETAHH Z MO 17.3 ST362.0 OM 6.1 f00.985 R1.3523 AL-0.00 WI 20.0 MW 5.5 3
SPEC RETAHH Z T161437 K 0.000 GD 110 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC QUEOEH Z MO 17.7 ST647.4 OM 6.4 f00.904 R1.4735 AL-0.00 WI 20.0 MW 5.7 3
SPEC QUEOEH Z T161444 K 0.000 GD 127 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC SOKIEH Z MO 18.5 ST 19.1 OM 7.2 f00.148 R9.0000 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.3 3
SPEC SOKIEH Z T161445 K 0.000 GD 136 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC HUEHHH Z MO 18.4 ST127.6 OM 7.1 f00.294 R4.5306 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.2 3
SPEC HUEHHH Z T161448 K 0.000 GD 146 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC CCIGBH Z MO 19.2 ST 20.2 OM 7.7 f00.091 R 14.64 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.7 3
SPEC CCIGBH Z T161459 K 0.000 GD 195 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC GUMIEH Z MO 18.1 ST139.9 OM 6.6 f00.392 R3.3980 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.0 3
SPEC GUMIEH Z T1615 3 K 0.000 GD 213 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC GCG4EH Z MO 18.1 ST 64.6 OM 6.6 f00.299 R4.4548 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.0 3
SPEC GCG4EH Z T1615 7 K 0.000 GD 222 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC AVCBEH Z MO 18.3 ST 41.8 OM 6.7 f00.230 R5.7913 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.1 3
SPEC AVCBEH Z T1615 7 K 0.000 GD 251 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC TGIGBH Z MO 18.4 ST 72.2 OM 6.8 f00.255 R5.2235 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.2 3
SPEC TGIGBH Z T161510 K 0.000 GD 252 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC JUAMEH Z MO 18.1 ST 20.8 OM 6.4 f00.214 R6.2243 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.0 3
SPEC JUAMEH Z T161524 K 0.000 GD 310 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC MT03HH Z MO 17.8 ST 4.9 OM 6.1 f00.160 R8.3250 AL-0.00 WI 20.0 MW 5.8 3
SPEC MT03HH Z T161532 K 0.000 GD 345 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC CHIEHH Z MO 17.8 ST 17.7 OM 6.1 f00.246 R5.4146 AL-0.00 WI 20.0 MW 5.8 3
SPEC CHIEHH Z T161533 K 0.000 GD 346 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC LALIEH Z MO 17.1 ST 66.4 OM 5.4 f00.638 R2.0878 AL-0.00 WI 20.0 MW 5.4 3
SPEC LALIEH Z T161539 K 0.000 GD 373 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC PETFHH Z MO 18.6 ST 6.3 OM 6.9 f00.091 R 14.64 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.4 3
SPEC PETFHH Z T161539 K 0.000 GD 382 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC HUIGBH Z MO 17.5 ST 28.8 OM 5.7 f00.371 R3.5903 AL-0.00 WI 20.0 MW 5.6 3
SPEC HUIGBH Z T161546 K 0.000 GD 412 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
SPEC SCIGBH Z MO 18.5 ST 21.1 OM 6.6 f00.157 R8.4841 AL-0.00 WI 20.0 MW 6.3 3
SPEC SCIGBH Z T1616 5 K 0.000 GD 501 VS 3.60 DE 3.00 Q0440.0 QA 0.70 Q1 1.00 3
2019-02-01-1613-14.GUA 109 00 01 6
STAT SP IPHASW D HRMM SECON CODA AMPLIT PERI AZIMU VELO AIN AR TRES W DIS CAZ7
THIG BZ EP 161422.692 150 0.4810 33.3 41
RETA HZ EP 161427.005 248 120 -0.1410 87.7 99
RETA HN ES 3 161439.432 120 -0.01 2 87.7 99
STG8 HZ EP 161428.006 218 117 -1.1810 98.9 84
QUEO EZ EP 161430.191 147 114 -0.2910 109 77
QUEO EE ES 3 161444.754 114 -0.62 2 109 77
SOKI EZ EP 161431.342 322 112 -0.7410 119 81
HUEH HZ EP 1 161432.997 245 110 0.30 7 130 55
HUEH HE IS 3 161449.949 110 0.62 2 130 55
QUIS EZ EP 161437.114 307 105 0.2910 167 65
QUIS EE ES 3 161457.996 105 1.33 2 167 65
FG8 BZ EP 1 161436.958 241 104 -0.22 7 170 98
FG8 BE ES 3 161455.657 104 -1.65 2 170 98
FG12 BZ EP 1 161438.270 254 103 -0.27 7 181 97
FG12 BN ES 3 161457.980 103 -1.75 2 181 97
FG13 BZ EP 1 161438.709 229 103 0.08 7 183 98
CCIG BZ EP 2 161440.838 224 103 1.72 5 184 12
CCIG BN ES 3 1615 3.063 103 2.30 2 184 12
ESSJ EZ EP 1 161439.969 345 102 0.12 7 196 114
ESSJ EE ES 3 1615 3.361 102 1.31 2 196 114
GUMI EZ EP 1 161441.570 281 101 0.11 7 203 90
GUMI EN ES 3 1615 6.040 101 1.11 2 203 90

```

Continuación del anexo 11.

File: /home/diego/tesis/tesis-DIEGO... analisis_seisan/2019-02-01.out										Page 2 of 2		
GCG4	EZ	EP	1	161443.626	297			101	1.17	7	212	92
GCG4	EE	ES	1	1615	7.294			101	0.61	7	212	92
AVCB	EZ	EP	1	161447.315	284			99	1.18	7	242	68
AVCB	EZ	ES	3	161512.945				99	-0.29	2	242	68
TGIG	BZ	EP	2	161445.957				99	-0.09	5	244	344
JUAM	EZ	EP		161453.301	312			97	0.0610		303	96
JUAM	EN	ES	3	161530.832				97	4.94	2	303	96
NUBE	HZ	EP	1	161454.076	318			97	0.23	7	305	106
MT03	HZ	EP	1	161458.213	296			96	-0.16	7	339	94
MT03	HZ	ES	3	161534.657				96	-0.37	2	339	94
CHIE	HZ	EP	C	161458.184				96	0.1010		340	91
LALI	EZ	EP		1615	1.733	285		96	0.81	9	367	110
LALI	EE	ES	1	161539.042				96	-0.52	7	367	110
PETF	HZ	EP	1	1615	2.188	263		96	-0.08	7	377	48
HUIG	BZ	EP	1	1615	6.144			95	0.14	7	407	288
IZAB	HZ	EP	1	1615	9.491			95	-0.20	7	437	74
IZAB	HN	ES	3	161555.798				95	0.62	2	437	74
SCIG	BZ	EP	C	161516.350				94	-0.85	8	497	16
NISHNEZ	EP			161517.658	342			94	-1.51	8	511	75

Fuente: Insivumeh. *Asesoría y acompañamiento en la elaboración del plan estratégico del Insivumeh* [https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217\\_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf](https://insivumeh.gob.gt/wp-content/uploads/2019/12/20191217_Informe-de-Avance-del-INSIVUMEH.pdf). Consulta: 20 de diciembre de 2019.

