

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Determinar la viabilidad de la implementación de un sistema de alerta temprana ante sismos en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Juan Sebastián Mendoza Tres para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala,

2021

Determinar la viabilidad de la implementación de un sistema de alerta temprana ante sismos en Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



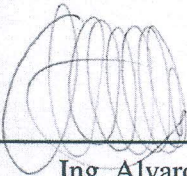
Determinar la viabilidad de la implementación de un sistema de alerta temprana ante sismos en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Juan Sebastián Mendoza Tres para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

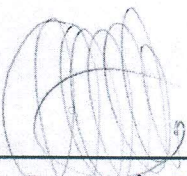
Guatemala,

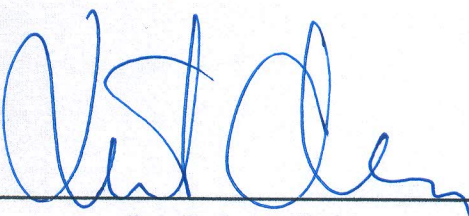
2021

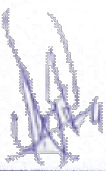
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Alvaro Rubio

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Alvaro Rubio

(f) 
Ing. Roberto Godo

(f) 
Ing. Omar Flores Beltetón

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de diciembre de 2021.

PREFACIO

Existen diferentes formas de salvar vidas, como futuro ingeniero me gusta pensar en maneras de ayudar y de crear una Guatemala mas segura. Al hablar de seguridad no solo se hace mención a reducir el crimen, en este caso se refiere a evaluar una herramienta para ver si es posible su funcionalidad en Guatemala y reducir el impacto de un sismo en el país.

El motivo del trabajo es tocar un tema que no es muy conocido, ni investigado en Guatemala, como lo es la alarma sísmica. Sabiendo que Guatemala se encuentra en constante riesgo sísmico debido a su ubicación geográfica es un tema que me llamó mucho la atención. El último terremoto que causó grandes daños y pérdidas fue el terremoto de 1976, este dejó más de 25000 muertos y dejó a otra gran cantidad de personas sin un hogar. Como ingeniero civil es fácil llegar a la conclusión de que gran cantidad de construcciones no fueron realizadas de la forma correcta por un ingeniero ya que en el país existe mucha pobreza, decir que la solución es que toda la población tenga construcciones sismo resistentes no es una solución realista. Una alarma sísmica suena como una solución más viable si en caso se lograra adaptar a Guatemala. Al mencionar una alerta sísmica se hace mención a un sistema de alerta temprana que incluye un conjunto de sismógrafos que detectan el sismo, programas con algoritmos para la determinación de la magnitud del sismo y la toma de decisiones para sonar la alarma sísmica, por último un sistema de aviso para la población.

Esta idea podría ayudar a salvar muchas vidas, pero no por sí sola. De la mano con la alerta se deberán de trabajar protocolos de seguridad para que la gente sepa cómo reaccionar a la hora de un sismo. Se tendrá que educar al pueblo para saber qué es la alarma, por qué suena y qué deben de hacer al escucharla.

Entidades gubernamentales tendrán que comprometerse a darle su debido mantenimiento al equipo. Así mismo se deberá de seguir innovando y buscando soluciones para seguir mejorando la seguridad dentro de la ciudad de Guatemala.

Dicho esto, quiero concluir con un agradecimiento. A mi familia, quiero agradecerle por su constante apoyo, por no dejar que me rindiera nunca y por estar a mi lado durante estos 5 años de universidad. A mis catedráticos, quiero agradecerles su pasión por la cátedra, por darnos la confianza de acercarnos a ellos y preguntar las veces que fueran necesarias. A Alvaro Rubio, quiero agradecerle su tiempo y ayuda para la realización del trabajo de graduación. A Omar Flores, le agradezco su ayuda para conseguir la información necesaria para este trabajo. A Otoniel Echeverría, por ser un excelente catedrático y por su constante apoyo con el trabajo de graduación. A Roberto Godo, por brindarnos los mejores recursos dentro de la universidad y velar por el bien de sus estudiantes. A la Universidad del Valle de Guatemala, por estos 5 años de estudio aprendiendo de los mejores profesionales de Guatemala.

CONTENIDO

	Página
PREFACIO	IV
LISTA DE GRÁFICOS	IX
RESUMEN	x
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
III. JUSTIFICACIÓN	3
IV. OBJETIVOS	4
A Objetivo general	4
B Objetivos específicos	4
V. ALCANCE	5
VI. Marco contextual	6
A Contexto de Guatemala	6
1 Social	6
2 Económico	6
3 Geográfico	6
4 Tectónico	6
5 Marco histórico	7
B Contexto de México	7
VII. Marco teórico	8
A Sismos	8
1 Clasificación de los sismos según AGIES	8
B Consecuencias de un sismo	9
1 Deslaves	10
2 Erupciones	10
3 Tsunamis	10
C Placas tectónicas	10
1 Límites divergentes	11
2 Zonas de subducción	11
D Fallas	11
E Suelos	12
F Ondas sísmicas	13

1	Ondas internas	13
2	Ondas superficiales	14
G	Alarma sísmica	15
1	Tecnología actual	15
2	Estaciones acelerográfica	15
H	SASMEX	16
I	Red de sismógrafos del INSIVUMEH	18
1	Red de banda ancha	18
2	Red de periodo intermedio	18
3	Sixaola	19
4	Algoritmos	20
5	Naciones Unidas	21
J	Instituciones guatemaltecas	22
1	INE	22
2	INSIVUMEH	22
3	CONRED	22
K	Dónde entra una alarma sísmica en una smart city	23
VIII. Marco procedimental		24
A	Riesgos sísmicos	24
1	Placas	24
2	Fallas	24
3	Historial sísmico	27
4	Volcanes	28
B	Descripción de las herramientas	31
1	Google Earth Pro	31
2	QGIS	31
3	MathCAD	32
IX. Resultados		32
A	Recopilación de información en mapas	32
B	FODA	35
1	Fortalezas	35
2	Oportunidades	36
3	Debilidades	36
4	Amenazas	36
X. Análisis de sismos en Guatemala		37
A	Sismo de 1995	37
B	Terremoto de 1976	38
C	Terremoto de 1902	38
D	Terremoto de 1942	39

XI. CONCLUSIONES	44
XII. RECOMENDACIONES	45
XIII. BIBLIOGRAFÍA	46
XIV. ANEXOS	48

LISTA DE GRÁFICOS

	Gráficos	Página
1	Placas tectónicas del mundo	6
2	Guatemala dentro del anillo de fuego	8
3	Índice de sismicidad	9
4	Placas tectónicas en Guatemala	10
5	Fallas de compresión	12
6	Ondas P y S	14
7	Estaciones sísmicas de México	16
8	Diagrama de operación	17
9	Red sísmica Banda ancha	18
10	Red sísmica periodo intermedio	19
11	Red sísmica Sixaola	20
12	Estadística de sismos	22
13	Placas en el territorio guatemalteco	24
14	Fallas principales	25
15	Fallas secundarias de Guatemala	25
16	Efectos en el muro	26
17	Efectos en la casa	26
18	Sismos en los últimos 3 años	27
19	Sismos según su año de ocurrencia	28
20	Volcanes en Guatemala	29
21	Volcanes	29
22	Índice de sismicidad en Guatemala	30
23	Sismos ocurridos y registrados por la INE	31
24	Sismos de magnitud mayor a 5 en la escala Richster en los últimos 3 años	32
25	Sismos de magnitud mayor a 5 en la escala Richter	33
26	Volcanes de Guatemala	33
27	Sismos de magnitud mayor a 5 en la escala Richter	34
28	Ubicación de los sismos y los sismógrafos	34
29	Terremotos históricos en Guatemala	35
30	Resultados para velocidades de onda de 2000 m/s	39
31	Resultados para velocidades de onda de 3000 m/s	40
32	Resultados para velocidades de onda de 4000 m/s	40
33	Sismos en el área de subducción	42
34	Divisiones de la zona de subducción	42
35	Modelo Qgis 1	48
36	Modelo Qgis 2	48
37	Modelo Qgis 3	49
38	Modelo Qgis 4	49

39 Google Earth 50

RESUMEN

La propuesta de esta tesis va enfocada hacia un proyecto a futuro en Guatemala. El sistema de alerta temprana es un proyecto atractivo, sin embargo es algo que no cuenta con muchos estudios previos en Guatemala. México el país vecino a Guatemala, cuenta con un sistema de alerta temprana, SASMEX.

La alerta sísmica SASMAX se diseñó para escuchar el sismo 50 segundos antes de que llegue el sismo. (Cuenca, 1998) En este estudio se comparan escuelas con y sin alerta sísmica. Pues el objetivo es ver el impacto de la alarma en dichos casos. En ninguno de los casos se registran accidentes graves, lo único que se registra son ataques nerviosos. En el caso donde se activa la alarma sísmica manualmente se registran 27 casos nerviosos y en el caso donde se registra la alarma 72 segundos antes del sismo solo hubo un ataque de crisis nerviosa. Una de las observaciones es que a la hora de ejecutar el plan de emergencia por sismos del establecimiento es que ejecutar el plan durante el sismo se dificulta debido al movimiento y el estrés de los individuos. En cambio en el caso donde se registró la alarma 72 segundos antes del sismo, comentan que el plan de evacuación se realizó de manera sencilla y rápida. Este estudio me lleva a pensar qué sucederá en Guatemala a la hora de un terremoto, o qué hubiera sido si en el terremoto de 1956, los guatemaltecos hubiesen contado con 72 segundos para evacuar sus casas y las áreas de peligro.

Se busca contar con un sistema de alerta temprana como la que tiene México para poder estar preparados segundos antes de que se sienta el movimiento de la tierra. Este traería diversos beneficios como disminuir el impacto del sismo en cuanto al número de fatalidades que podría haber. Existen cantidades de investigaciones donde se proponen estructuras sísmo resistentes para la seguridad de la gente dentro de sus hogares, edificios, puentes, entre otras estructuras. Sin embargo el sector más afectado del país serían aquellos que no cuenten con espacios sísmo resistentes, el sector pobre del país. Según un artículo publicado por el PNUD el 90.6 por ciento de los Guatemaltecos viven en pobreza, 62.4 por ciento en pobreza media, 29.6 por ciento en pobreza extrema y el 3.6 por ciento en pobreza severa. (PNUD, 2021) Dejando por un lado la ingeniería y enfocándonos en la ubicación de las comunidades pobres, uno puede ver que estas viven en barrancos, faldas de volcanes u otros lugares donde un sismo y sus secuelas representan un grave riesgo.

Guatemala es un país situado dentro de tres placas tectónicas, con historial sísmico, está en constante riesgo. Según el Instituto Nacional de Estadística en 2018 hubo un total de 1078 sismos donde el epicentro fue en Guatemala, no se toma en cuenta el valor de los sismos fuera de Guatemala aunque se hayan sentido también en el país. La actividad sísmica es constante por lo que en cualquier se puede repetir lo sucedido en 1976. (INE, 2018)

I. INTRODUCCIÓN

Un sistema de alerta temprana para sismos suena como una excelente idea cuando se trata Guatemala, un país expuesto a alta actividad sísmica. Para un proyecto tan grande como lo es una alarma sísmica se debe de hacer mucha investigación y análisis de sistemas ya existentes como lo es el SASMEX. SESMEX es el sistema de alerta temprano de México. Este es la primera alarma sísmica funcional de todo el mundo.

Estando ubicada sobre tres placas tectónicas, Guatemala cuenta con una larga lista de terremotos. Siendo el más conocido el terremoto del 1976. Este sismo de 7.5 en la escala Richter dejó a 25000 muertos. Este no es el único terremoto que ha ocurrido en Guatemala, también está el terremoto de 1942, 1902, 1999, entre otros. Al tener en consideración el historial sísmico de Guatemala pensar en una alarma sísmica es ideal.

Este trabajo tiene la finalidad de realizar una investigación para establecer el riesgo sísmico de Guatemala y de dónde provienen estos riesgos. Así mismo se desea respaldar esta investigación con una hoja de cálculo donde se pueda ver un análisis superficial de cómo funcionaria la alarma sísmica en Guatemala, si es que esta funcionara. Para esto el trabajo se apoya en el sistema mexicano, SASMEX. De este se buscan cosas como la logística detrás del sistema. Como también se buscan algoritmos funcionales para el análisis de sismos y la funcionalidad de la alarma. Por último, se buscan recomendaciones generales del distanciamiento entre sismógrafos o a que distancia debe de ocurrir el sismo para que la alarma funcione. Cabe mencionar, que a pesar de que la alarma sísmica de México es funcional, en ocasiones para algunos sismos se ha reportado que esta no emite la alerta con suficiente tiempo. Para verificar que la alarma sísmica sea funcional se evaluara únicamente para la ciudad capital de Guatemala. Para que esta sea aceptada se busca que se emita la alarma con un tiempo de 60 segundos antes de que llegue el sismo.

El trabajo tiene tres componentes diferentes: El primer componente es la observación. Se observó una problemática dentro del país para la cual se desea evaluar una solución. La segunda parte consta de una investigación. Se desea investigar la problemática para definir el riesgo sísmico de Guatemala, la forma en que una alarma sísmica opera y si esta funcionase en Guatemala. La última parte consistió en utilizar programas como Google Earth y QGIS para mapear sismos, placas tectónicas y volcanes. El último programa fue MathCad, el cual se utilizó para la elaboración de una hoja de cálculo.

II. ANTECEDENTES

La propuesta de esta tesis va enfocada hacia un proyecto a futuro en Guatemala. El sistema de alerta temprana es un proyecto atractivo, sin embargo es algo que no cuenta con muchos estudios previos en Guatemala. México el país vecino a Guatemala, cuenta con un sistema de alerta temprana, SASMEX.

La alerta sísmica SASMAX se diseñó para escuchar el sismo 50 segundos antes de que llegue el sismo. (Cuenca, 1998) En este estudio se comparan escuelas con y sin alerta sísmica. Pues el objetivo es ver el impacto de la alarma en dichos casos. En ninguno de los casos se registran accidentes graves, lo único que se registra son ataques nerviosos. En el caso donde se activa la alarma sísmica manualmente se registran 27 casos nerviosos y en el caso donde se registra la alarma 72 segundos antes del sismo solo hubo un ataque de crisis nerviosa. Una de las observaciones es que a la hora de ejecutar el plan de emergencia por sismos del establecimiento es que ejecutar el plan durante el sismo se dificulta debido al movimiento y el estrés de los individuos. En cambio en el caso donde se registró la alarma 72 segundos antes del sismo, comentan que el plan de evacuación se realizó de manera sencilla y rápida. Este estudio me lleva a pensar qué sucederá en Guatemala a la hora de un terremoto, o qué hubiera sido si en el terremoto de 1956, los guatemaltecos hubiesen contado con 72 segundos para evacuar sus casas y las áreas de peligro.

Se busca contar con un sistema de alerta temprana como la que tiene México para poder estar preparados segundos antes de que se sienta el movimiento de la tierra. Este traería diversos beneficios como disminuir el impacto del sismo en cuanto al número de fatalidades que podría haber. Existen cantidades de investigaciones donde se proponen estructuras sísmo resistentes para la seguridad de la gente dentro de sus hogares, edificios, puentes, entre otras estructuras. Sin embargo el sector más afectado del país serian aquellos que no cuenten con espacios sísmo resistentes, el sector pobre del país. Según un artículo publicado por el PNUD el 90.6 por ciento de los Guatemaltecos viven en pobreza, 62.4 por ciento en pobreza media, 29.6 por ciento en pobreza extrema y el 3.6 por ciento en pobreza severa.(PNUD, 2021) Dejando por un lado la ingeniería y enfocándonos en la ubicación de las comunidades pobres, uno puede ver que estas viven en barrancos, faldas de volcanes u otros lugares donde un sismo y su secuelas representan un grave riesgo.

Guatemala un país situado dentro de tres placas tectónicas, con historial sísmico, está en constante riesgo. Según el Instituto Nacional de Estadística en 2018 hubieron un total de 1078 sismos donde el epicentro fue en Guatemala, no se toma en cuenta el valor de los sismos fuera de Guatemala aunque se hayan sentido también en el país. La actividad sísmica es constante por lo que en cualquier se puede repetir lo sucedido en 1976. (INE, 2018) El objetivo final es dejar un documento donde se evidencia si el sistema de alerta temprana es viable. Ayudándonos de fuentes bibliográficas y de herramientas como QGIS podremos realizar el análisis para definir si es o no viable el sistema.

III. JUSTIFICACIÓN

El fin de la investigación es buscar una Guatemala más segura, protegiéndonos de catástrofes naturales, tales como un sismo. Los terremotos son un temblor rápido y repentino de la tierra, provocado por el rompimiento y desplazamiento de una roca subterránea a medida que libera energía acumulada durante largo tiempo.(READY, 2020) Un terremoto suele causar mucho daño en las estructuras, sin embargo, conforme avanzan los años, la ingeniería ha ido avanzando y se han desarrollado métodos mas seguros para prevenir el fallo de las estructuras.

Los principales afectados a la hora de un sismo es la clase baja, ya que habitan en terrenos peligrosos tales como barrancos, faldas de volcanes, etc. De la misma forma una persona de escasos recursos utiliza materiales no adecuados para la construcción de su vivienda, realizada por ellos mismos. Como ejemplo cercano tenemos la tragedia del Cambray II, donde ocurrió un deslave dejando socavados a los individuos que habitaban en la parte inferior del barranco. Este evento no se dio debido a un sismo, sin embargo es algo que puede suceder como efecto de un sismo. Tanto este suceso como las constantes noticias de terremotos alrededor del mundo han servido como inspiración para esta investigación.

La finalidad de la alarma sísmica es proteger al pueblo mediante un sistema de alerta temprana. Se busca definir si una alarma sísmica sería viable en Guatemala. De esta forma si se encuentra que es viable considerarlo como una opción para crear una Guatemala más segura para todos sus habitantes.

El objetivo final es dejar un documento donde se evidencia si el sistema de alerta temprana es viable. Ayudándonos de fuentes bibliográficas y de herramientas como QGIS podremos realizar el análisis para definir si es o no viable el sistema.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Definir la viabilidad de un sistema de alerta temprana para sismos en el área metropolitana de la ciudad de Guatemala.

B. Objetivos específicos

- Definir los riesgos sísmicos en Guatemala debido a su geografía, placas tectónicas y tipos de suelos.
- Identificar las ventajas y desventajas de una alarma sísmica.
- Desarrollar un documento para fundamentar la viabilidad de un sistema de alerta temprana, para el área metropolitana de la ciudad de Guatemala.

V. ALCANCE

Como parte de los objetivos de este trabajo se tiene que definir la viabilidad de una alarma sísmica en Guatemala. Para este se determinará el riesgo sísmico al cual está expuesto Guatemala. Como segundo punto se desean conocer las ventajas y desventajas de la alarma. Por último se desea crear un documento para calcular el tiempo de anticipación con el que la alarma emite la alerta. Para el cálculo de los tiempos se analizarán cuatro sismos históricos, ocurridos en Guatemala.

El proyecto se encuentra limitado a la cantidad de sismógrafos con los que cuenta Guatemala. Otra limitante es la cantidad de sismos que se analizarán. Debido a la gran cantidad de sismos que ocurren en Guatemala no se podrán analizar todos, nos limitaremos al análisis de cuatro terremotos que han ocurrido en Guatemala. Se utilizarán algoritmos ya conocidos y funcionales para el análisis de la alarma sísmica.

Para la realización de este trabajo se utilizaron diferentes programas. Se inicio utilizando Google Earth para ingresar los sismos y sismógrafos con sus respectivas coordenadas. Se procedió a pasar esta información a Qgis para crear los mapas y presentar la información. Por último se utilizó Math Cad para la elaboración de la hoja de cálculo.

VI. Marco contextual

A. Contexto de Guatemala

1. Social. Según datos de la INE, del censo del 2018, la cantidad total de habitantes en Guatemala era de catorce millones, novecientos uno mil, doscientos ochenta y seis. Solamente en Guatemala como departamento hay tres millones quince mil ochenta y un personas. Guatemala es el departamento de guatemalteco con mas habitantes según el último censo. (INE, 2018)

2. Económico. Según Cindy Espina, escritora de elPeriodico, debido a la pandemia el número de personas que viven en pobreza y en pobreza extremaa ah aumentado, esto basado en datos de la Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL). (Espina, 2020)

Según datos de la ONU el 21.8 por ciento de la población estará en pobreza extrema y el 59.9 por ciento estará en pobreza. Dejando a la mayor parte de la población en pobreza. (Espina, 2020)

3. Geográfico. Guatemala se encuentra en una zona donde tres placas se unen; la placa de Cocos, la placa del Caribe y la placa de Norteamérica. Según INGUAT hay 37 volcanes en Guatemala, tres de estos estando mas activos de lo que han estado históricamente. Guatemala se encuentra dentro de lo que se conoce como Ring of fire". Se le conoce como Ring of fire a un área de volcanes activos y un área de alta actividad sísmica.

4. Tectónico. El territorio guatemalteco esta ubicado sobre tres placas tectónicas, la placa de Cocos, la placa de Norteamérica y la placa del Caribe. Entre la placa del Caribe y la de Norteamérica ocurre un movimiento divergente. El movimiento entre la placa de Cocos y del Caribe es de subducción. La placa de Cocos es la que se mete bajo la placa del Caribe. Las zonas de subducción son las áreas donde ocurren la mayor parte de los sismos y los de mayor magnitud. La zona de subducción se encuentra a 50km frente a las costas del Oceano Pacifico. (INSIVUHEH, 2021)

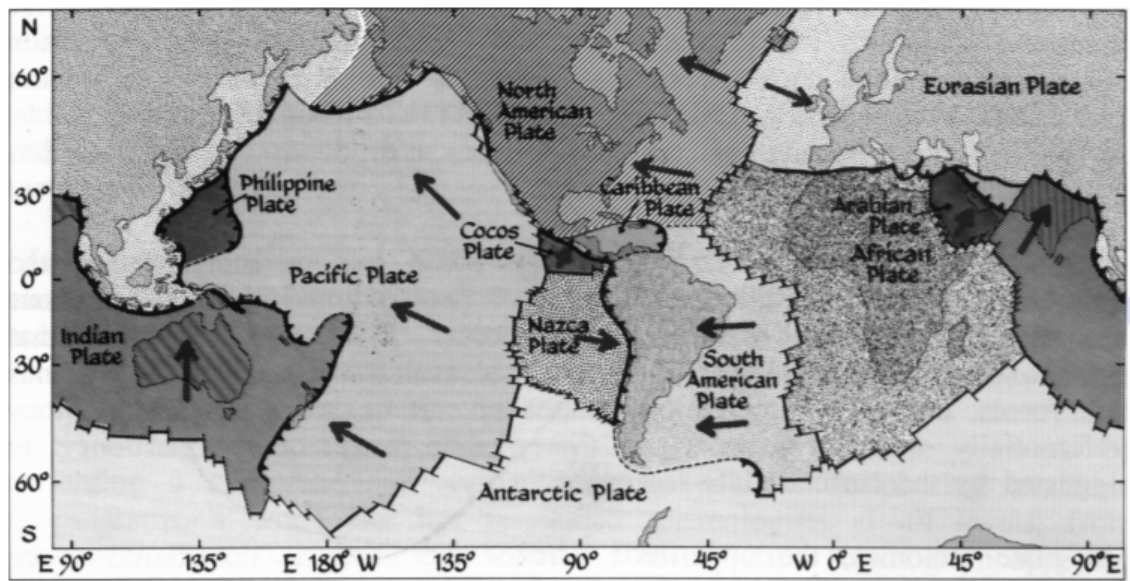


Figura 1. Placas tectónicas del mundo

(INSIVUMEH, 2016)

5. Marco histórico. A lo largo de su historia Guatemala ha sido víctima de varios sismos.

- 4 de febrero de 1976: El terremoto del 76 fue de magnitud 7.5 y tuvo una profundidad de 5 kilómetros. Dejo un total de 25000 fallecidos.
- 6 de agosto 1942: El sismo fue de magnitud de 8.3 con una profundidad de 60 kilómetros.
- 18 de abril de 1902: El terremoto fue de magnitud 7.5. Causo daños principalmente en los departamentos de Quetzaltenango y Solola.
- 7 noviembre del 2012: Fue un terremoto de magnitud 7.2 en la escala Ritchter.
- 11 de junio 1999: Ocurrió un sismo de magnitud 6.1. Ocurrió en la falla del Motagua, en el extremo oriental.
- 10 enero 1998: Ocurrió un sismo de magnitud 5.8 en la escala Richter. Este sismo inició una serie de secuelas que terminaron el 20 de enero.
- 19 de diciembre de 1995: El terremoto de Tukurú, se registró de una magnitud de 5.3 en la escala Richter. Murio únicamente una persona y se reportaron varias heridas por derrumbes a causa del sismo.

(INSIVUMEH, 2016)

A parte de los sismos mencionados previamente existen otros grandes sismos ocurridos en el territorio nacional o cerca de sus fronteras han causado daños severos.

B. Contexto de México

México se encuentra al norte de Guatemala, siendo estos países vecinos. Al ser países vecinos Guatemala y México comparten mucha historia y características. En ambos países se habla el español dado los españoles conquistaron ambas culturas. Ambos países tienen fuertes raíces mayas. Sin embargo para motivos de la tesis lo que nos interesa son sus características geográficas. México se encuentra amenazado por lo que es el área de subducción entre la placa de Cocos y la de el Caribe. Los sismos de subducción son los más peligrosos debido a sus altas magnitudes, sus periodos largos y la alta ocurrencia de estos. Luego tienen lo que son los sismos interplaca, que ponen a México en peligro debido a la poca distancia de la ciudad y del punto de ocurrencia.

(Eduardo Reinoso, 2009)

VII. Marco teórico

A. Sismos

Los sismos son una serie de vibraciones repentinas en la tierra provocadas por un movimiento brusco en las capas internas. Estos tienen una alta probabilidad de ocurrencia dentro del territorio nacional. (READY, 2020) Dentro del trabajo cuando se hace mención a un sismo hacemos referencia a todos los sismos mayores a 5 grados en la escala Richter.

Según el INSIVUMEH, actualmente con los avances en la ciencia no se puede predecir los sismo.

Para hablar de sismos hay que saber acerca del hipocentro y el epicentro. El epicentro es el punto donde se origina el sismo en la superficie de la tierra, este debe ser directamente sobre el hipocentro. El hipocentro es el punto exacto en el interior de la tierra donde se origina el sismo. (Tarbuck, 2014)

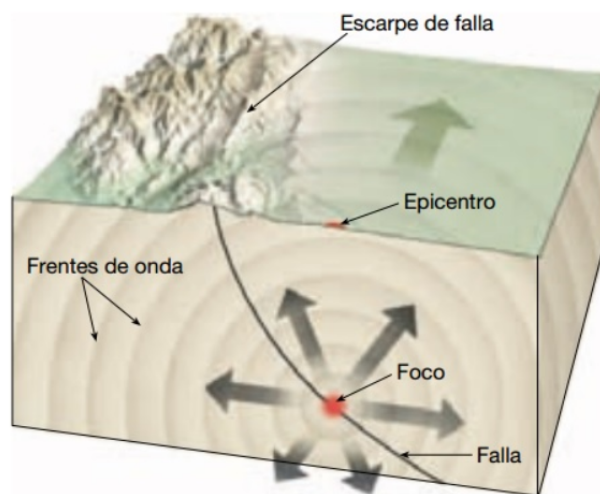


Figura 2. Guatemala dentro del anillo de fuego

(Tarbuck, 2014)

1. Clasificación de los sismos según AGIES.

- Sismo básico: Es aquel que en un periodo de 50 años tiene un 10 por ciento de probabilidad nominal de ser excedido.
- Sismo severo: Es aquel que en un periodo de 50 años tiene un 5 por ciento de probabilidad nominal de ser excedido.
- Sismo extremo: Es aquel que en un periodo de 50 años tiene un 2 por ciento de probabilidad nominal de ser excedido.

(Agies, 2018)

En el código de diseño AGIES NSE 2 en la sección 4.5.3 ajuste por intensidades sísmicas especiales, se creó un mapa donde indican el índice de sismicidad a utilizar dependiendo del área en donde se realizara la construcción en Guatemala.

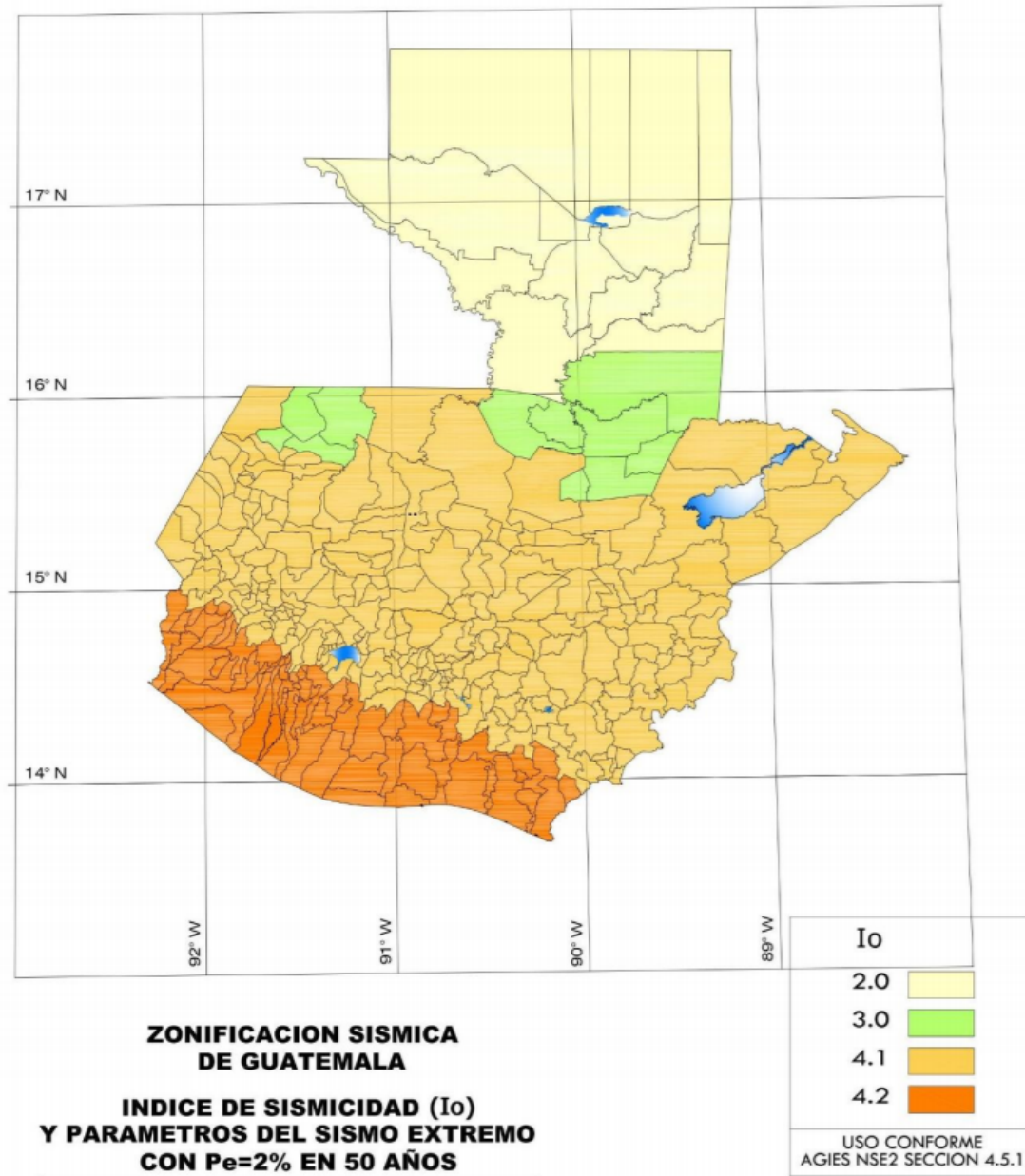


Figura 3. Índice de sismicidad

(Agies, 2018)

Como se puede observar en la imagen en la parte baja del país se es donde se tiene un índice mayor, de 4.2. Así mismo la parte inferior es la mas cercana a la falla de subducción, lugar donde la mayor parte de los sismos fuertes ocurren.

B. Consecuencias de un sismo

Un sismo puede ser el causante de otros desastres naturales. Entre estos los deslaves, erupciones volcánicas y tsunamis.

1. Deslaves. Guatemala es un país con una geografía diversa. Cuenta con montañas volcanes, barrancos e incluso áreas planas. También cuenta con climas variados, en donde en parte del año hay frío y llueve y otras épocas son calurosas. Por otra parte, como ya se mencionó previamente Guatemala s un país con un alto nivel de sismicidad.

Los deslaves es una caída de tierra o rocas de forma lenta o rápida, que destruye o deja soterrado todo en su camino. Estos se pueden producir en el pie de las montañas o volcanes o en la parte inferior de los barrancos. El último incidente grande en Guatemala fue el deslave en el Cambray II. (SNGRE, 2020)

2. Erupciones. La expulsión de gases y lava (roca derretida) de un volcán es conocido como una erupción volcánica. Las expulsiones suelen darse después de un sismo o simplemente como una forma de liberar energía. Estas erupciones pueden varias ya que hay diferentes tipos de volcanes. Un volcán dormido es aquel que no hace erupción mientras que uno vivo es aquel que constantemente hace erupción. Un claro ejemplo de un volcán activo es el volcán Pacaya. (IFRC, 2006)

3. Tsunamis. Un tsunami es una secuencia de olas grandes, estas suelen ser causadas por sismos, erupciones volcánicas, impacto de rocas espaciales como asteroides o deslizamientos marinos. Estas olas suelen alcanzar velocidades entre 20 y 30 millas/hora. Estos desastres naturales suelen causar la muerte a personas y animales, suelen dañar edificaciones y dejan grandes daños.

C. Placas tectónicas

La litófera está constituida como un rompecabezas de masas rocosas que se encuentran en constante movimiento. Estas grandes masas rocosas suelen tener un espesor aproximado de 100 km. Las placas tectónicas se encuentran en constante movimiento desde hace cientos de años. Los diferentes movimientos de las placas crean diferentes límites entre ellas, entre están; divergencia, convergencia y transformante. (Moratalla, 2008)



Figura 4. Placas tectónicas en Guatemala

(EIRD, 2008)

1. Límites divergentes. En los límites divergentes las placas se alejan la una de la otra, se les suele conocer también como límites de Placas, límites Divergentes o límites Constructivos. Estas suelen separarse debido al alto movimiento de las corrientes ascendentes de magma. Estas mismas corrientes al ser expulsadas suelen causar cordilleras volcánicas submarinas. En las zonas de expansión se encuentran las dorsales oceánicas más grandes.

- Dorsal del Atlántico
- Dorsal del Índico
- Dorsal del Pacífico

2. Zonas de subducción. Las zonas de subducción son aquellas donde las placas chocan entre ellas. Una de estas placas es forzada hacia abajo de la otra placa regresando al interior del manto donde la roca se derrite. Las zonas de subducción son las área donde los peores sismos han ocurrido. existen tres tipos de subducción.

- Subducción de corteza oceánica sobre corteza oceánica.
- Subducción de corteza oceánica sobre corteza continental.
- Subducción de corteza continental sobre corteza continental.

D. Fallas

Una falla es una fractura en la corteza de la tierra en la cual ocurren movimiento de las placas tectónicas. Existen tres tipos de fallas, normales, de desplazamiento e inversas. Los sismos suelen ocurrir en estas áreas debido a la energía que se produce a la hora del movimiento de los cuerpos rocosos. Estas llegan a un punto donde liberan la energía provocando las ondas que causan los sismos.(RSN, 2019) Algunos ejemplos de fallas en Guatemala son;

- Falla Polochic: También se le conoce como Cuilco-Chixoy-Polochic. Esta viene desde la costa este de Guatemala hasta Chiapas en México. Pasa por el valle de Cuilco, Chixoy y Polochic. Esta falla ya no está muy activa, sin embargo aún existe el riesgo de que se produzcan terremotos en el área.
- Falla Motagua: La falla se encuentra en la Sierra las Minas y es casi perfectamente paralela al río Motagua. La falla es paralela a la falla del Polochic.
- Falla Jocotán: Esta falla inicia en Guatemala y termina en Honduras.
- Falla Jalpatagua: La falla inicia en Jutiapa y llega hasta El Salvador.

Existen diferentes tipos de fallas, están las fallas por compresión y las fallas por tracción.

Las fallas por compresión son aquellas que están sometidas a tres fuerzas. La primera fuerza actuante sobre esta sería la fuerza de la gravedad o la del peso. Todo aquel peso que esté sobre el

terreno donde pase la falla estará afectando a la falla. La segunda fuerza es la del campo tectónico, esta es la fuerza de empuje que existe. Para ser una falla por compresión teóricamente la línea que corta el terreno deberá ser a 45 grados, dejando un terreno sobre el otro. Debido a que los suelos no son homogéneos entonces el valor no es exactamente 45 grados sino que varía por valores cercanos a ese. La fuerza del campo tectónico será aquella efectuada por el terreno superior sobre el terreno inferior como se verá en la siguiente imagen. Por último está la fuerza resistente que genera el otro pedazo de tierra inferior hacia la masa de tierra superior. (Llano, 1975)

MECANICA DE SUELOS

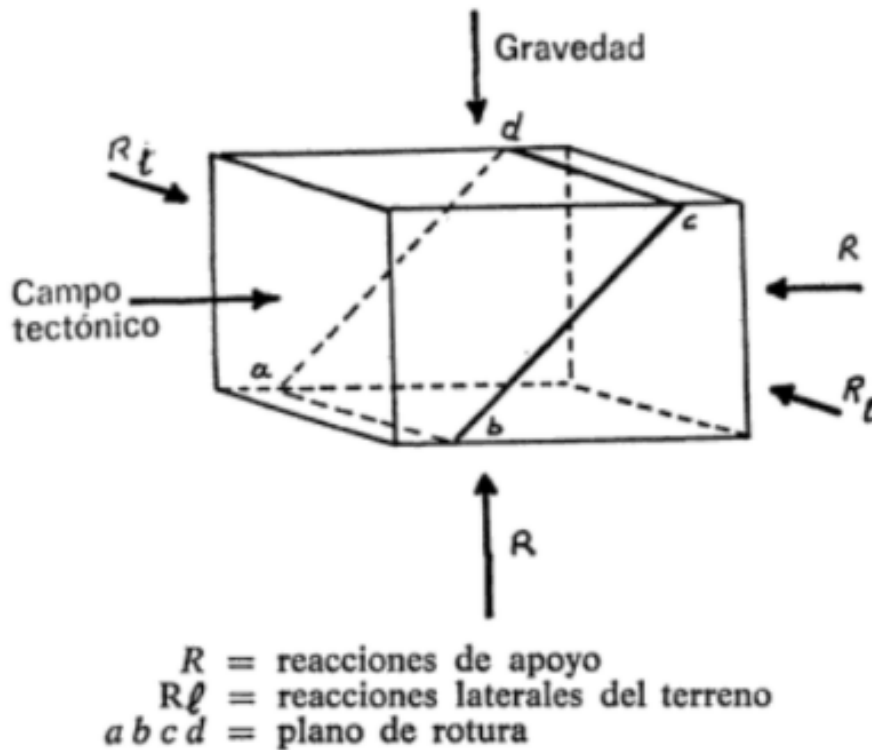


Figura 5. Fallas de compresión

(Llano, 1975)

El otro tipo de fallas es por tracción. Estas son derivadas de las fallas por compresión. Lo que sucede es que al estar sometidas a grandes cargas el terreno superior se desliza y se hunde. (Llano, 1975)

E. Suelos

Existen diferentes tipos de suelos y diferentes formas de clasificarlos. La primera es por tipos de granos. Existen lo que son los limos, arcillas, arenas y gravas.

- Arcillas: Son aquellos granos con un diámetro de 0.002 mm.
- Limos: Aquellos con un diámetro mayor a 0.002 mm y menor a 0.005 mm.
- Arenas: Cuentan con un diámetro mayor a 0.005 mm a 2 mm.
- Gravas: El diámetro de estas se encuentra dentro del rango de 2 mm hasta 64 mm.

Dependiendo de los tipos de granos que se encuentran en el suelo es la clasificación del suelo. Para esta existen diferentes métodos. uno de los métodos mas conocidos es el Sistema Unificado De Clasificación De Suelos. (Villalaz, 2005)

El método de Allen Hazen es uno de los métodos más conocidos, este utiliza lo que se conoce como el diámetro efectivo y el coeficiente de uniformidad. El diámetro efectivo del suelo es aquel 10 por ciento de partículas más fino y el 90 por ciento más grueso. Luego se tiene el coeficiente de uniformidad que es aquel D_{10}/D_{60} donde el D_{60} es el diámetro en milímetros donde el 60 por ciento de la partículas son menores que ese diámetro y el D_{10} corresponde al diámetro efectivo. (Villalaz, 2005)

Para poder definir a un suelo como bien graduado este debe de contar con un coeficiente de uniformidad mayor de 4 en el caso de gravas y de 6 en el caso de arenas. El coeficiente de curvatura debe de estar entre 1 y 6. El coeficiente de curvatura es una relación entre la cantidad de granos y los diámetros de cada uno. La fórmula para calcular el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura son:

- Coeficiente de uniformidad: $C_u = D_{60}/D_{10}$
- Coeficiente de curvatura: $C_c = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$

Los suelos bien graduados, suelen tener mejor uso en la ingeniería que los suelos uniformes. (Villalaz, 2005)

F. Ondas sísmicas

Las ondas son oscilaciones que se propagan desde un punto a otro a través de medios sólidos o líquidos, transportando energía. Las ondas se pueden clasificar en internas o superficiales. Dentro de las ondas internas tenemos las primarias (P) y las secundarias (s). Dentro de las superficiales tenemos las ondas Love (L) y las ondas Rayleigh (R). (C & de México. Instituto de Geofísica, 1994)

1. Ondas internas. Se les llama ondas internas ya que se mueven dentro del sólido. Estas se pueden ver afectadas por las condiciones del suelo. En suelos blandos las ondas sísmicas tienden a ampliarse de forma grande, y en suelos duros estas apenas se amplían. (C & de México. Instituto de Geofísica, 1994)

a. Ondas primarias

Las ondas primarias son las ondas que viajan más rápido. De aquí proviene el nombre primarias. El desplazamiento de las ondas primarias es longitudinal. Estas ondas no suelen ser las perceptibles por el hombre, debido a su movimiento. Estas cuentan con una velocidad dentro del rango de 2000 m/s a 4000 m/s para suelos de sedimento. Para suelos de roca la velocidad es de 5000 m/s. (Condie, 2015)

b. Ondas secundarias

Luego tenemos las ondas secundarias, al igual que las primarias su nombre se debe a que son las segundas ondas en llegar. Es decir las ondas secundarias tienen una velocidad inferior a las primarias. Debido a su movimiento estas ondas suelen generar esfuerzos de cortante. Estas ondas son las perceptibles por el hombre y son las que causan los daños a la hora de un sismo. La velocidad de estas ondas es menor que la de las ondas primarias. La velocidad de estas es aproximadamente un 58 por ciento de las ondas primarias. (C & de México. Instituto de Geofísica, 1994)

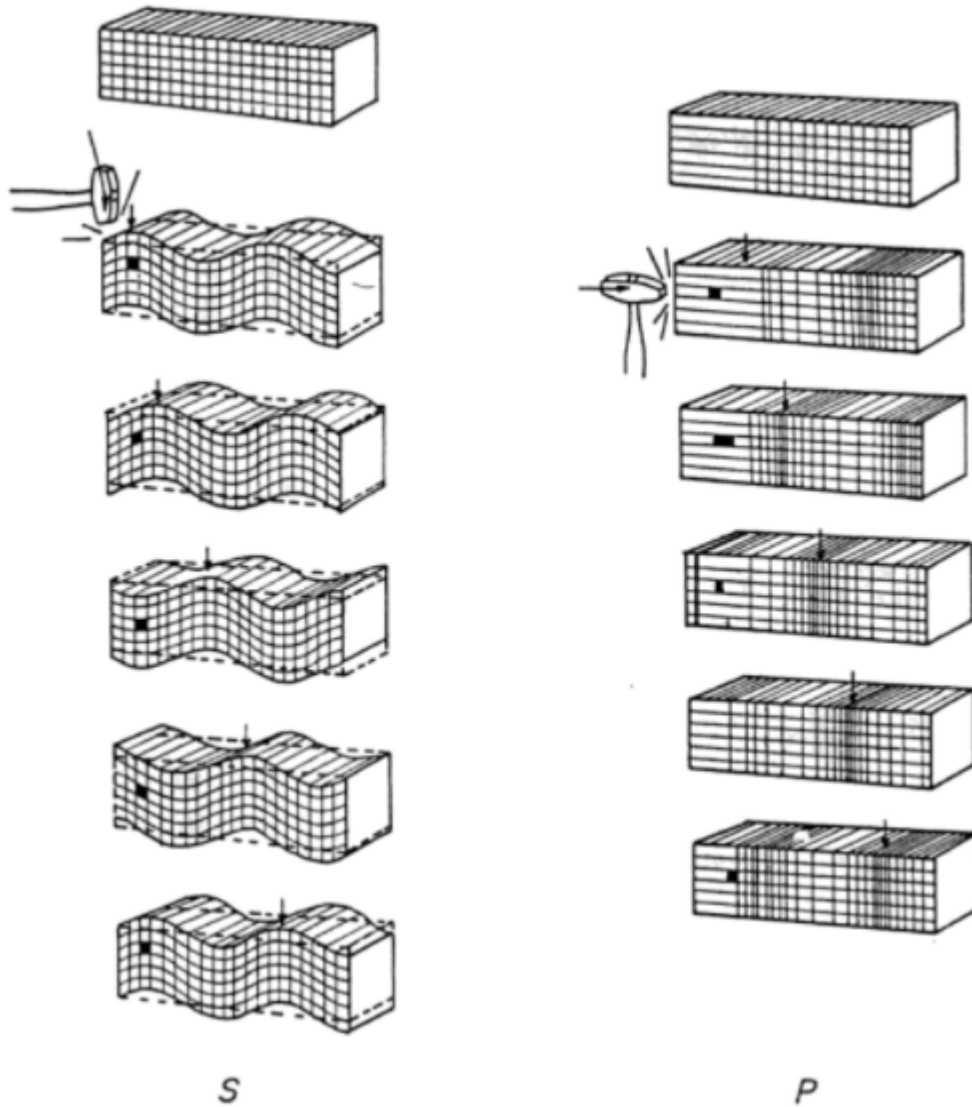


Figura 6. Ondas P y S

2. Ondas superficiales. Al contrario con las ondas sísmicas las ondas superficiales viajan a través de la superficie de un sólido. Estas se dividen en dos: las ondas Love (L) y las ondas Rayleigh (R). La velocidad de estas ondas es del 90 por ciento de las ondas secundarias. (C & de México. Ins-tituto de Geofísica, 1994)

a. Ondas Love

Las ondas Love cuenta con un movimiento similar a las ondas s, este es perpendicular a la zona de propagación. Sin embargo lo que diferencia a estas de las ondas S es que estas se mueven en el plano de la superficie de la tierra.(C & de México. Instituto de Geofísica, 1994)

b. Ondas Rayleigh

Las ondas Rayleigh cuentan con un movimiento de oleaje. Estas se mueven de forma superficial y son más lentas que las ondas internas. El nombre de estas ondas viene del científico que las descubrió en 1885, Lord Rayleigh.(C & de México. Instituto de Geofísica, 1994)

G. Alarma sísmica

Una alarma sísmica es aquella que brinda un aviso temprano de un sismo. Para entrar a considerarse como una alarma sísmica esta debe de cumplir con ciertos requisitos especificados en este documento.

1. Tecnología actual. Actualmente en Guatemala existen sistemas de alerta temprana, que funcionan y anuncian el sismo aproximadamente unos 5 segundos antes de que suceda. (Por tema de evitar difamación no se mencionará directamente a la empresa.)

a. Acelerógrafos

Según la Red Nacional de Acelerógrafos (RENAC), los acelerógrafos permiten la obtención de las medidas de las aceleraciones en un punto determinado por medio de un gráfico llamado acelerograma. En el acelerograma se muestran las aceleraciones del suelo en las direcciones de norte-sur y de este a oeste. (RENAC, 2021)

b. Acelerograma

En 1932 en California se creó lo que hoy conocemos como acelerograma. Al registro de las aceleraciones tomadas por un acelerógrafo se le llama acelerógrama. Este da una relación de las aceleraciones con respecto al tiempo de el movimiento en el suelo. Con estos acelerógramas es posible realizar varios cálculos. Mucho antes del acelerógrama ya se registraban las aceleraciones de los sismos de forma cualitativa. (Posada, 2013)

2. Estaciones acelerográfica. Estas se pueden colocar en diversas áreas. Un edificio pudiese contar con un acelerógrafo personal para uso propio.

Una estación de campo para el SASMEX únicamente cuenta con dos cosas, un acelerógrafo tri axial y un sistema de comunicación. El acelerografo cumple con la función de detectar el sismo y obtener las aceleraciones que causa el mismo. Por otro lado el sistema de comunicación es para comunicar la información a la siguiente etapa. Inicialmente la tecnología utilizada para el SASMEX fue construida por CIRES, eran digitalizadores con resolución de 10 bits y 50 Hz. Hoy en día estos digitalizadores cuentan con una resolución de 12 bits y 100Hz. La ultima generación de digitalizadores en la que estaba trabajando CIRES en el 2018 trabajaban con 24 bits de resolución y 100 Hz. (J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018)

Para la determinación del número de acelerógrafos y la ubicación de cada uno se necesitará rea-

lizar estudios de la zona. En áreas de alto riesgo sísmico o para proyectos masivos es recomendado que se hagan los estudios par la ubicación y la cantidad de acelerógrafos. (Bolt, 1981)

H. SASMEX

SASMEX es el primer sistema de alerta temprana del mundo, este sistema se encuentra en México. SASMEX fue fundado en México en 1993, dos años después de que iniciara su etapa de prueba en 1991. Inicialmente se titulaba solo SAS y estaba ubicada únicamente en la ciudad de México. La idea de crear SASMEX o SAS como se conocía al principio surgió después del terremoto de 1985.(J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018)

La función de SAS era dar una alerta temprana a la población de la capital. En 1991 cuando inició su etapa de prueba, el sistema contaba con únicamente 12 sensores, distribuidos en la costa de Guerrero. Para que se emitiese la alerta dos o más sensores debían de percibir movimientos de magnitudes mayores a Mb 5.5. Si se cumplía con esto entonces se emitía una alerta. El motivo de la ubicación se debe a que el ultimo sismo de magnitud Mb mayor a 7 ocurrió en esta área en 1911, por lo que se asumió en el área había una gran acumulación de estrés.(J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018)

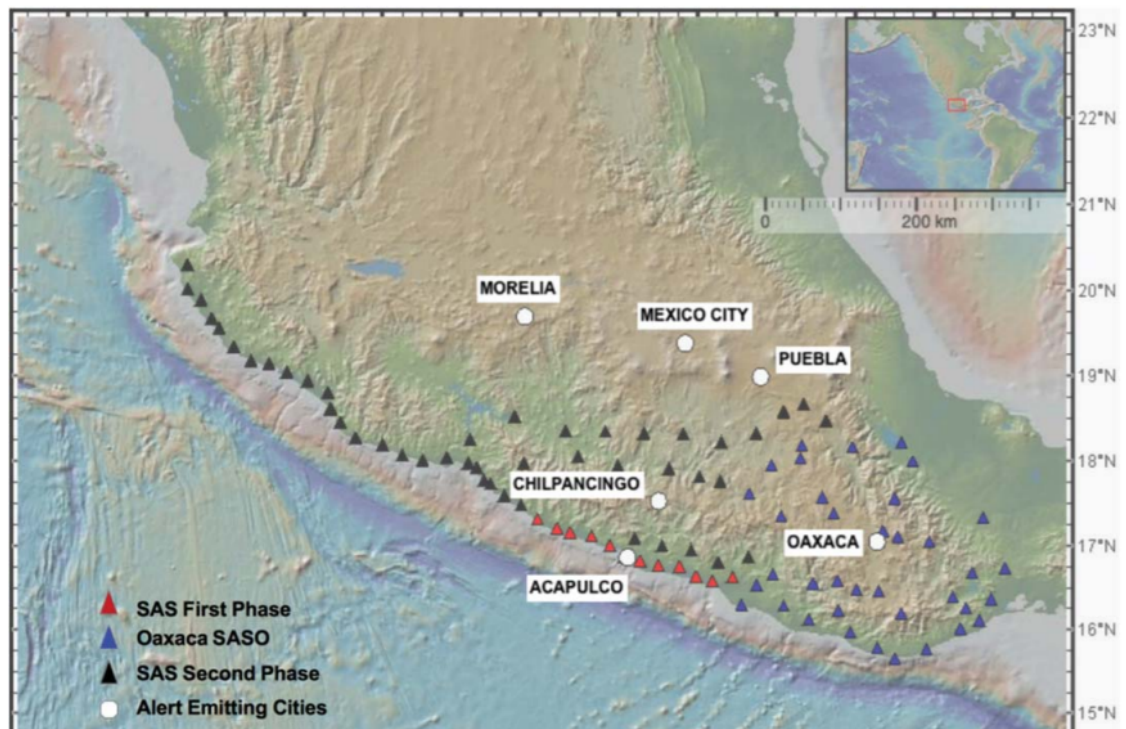


Figura 7. Estaciones sísmicas de México

(J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018)

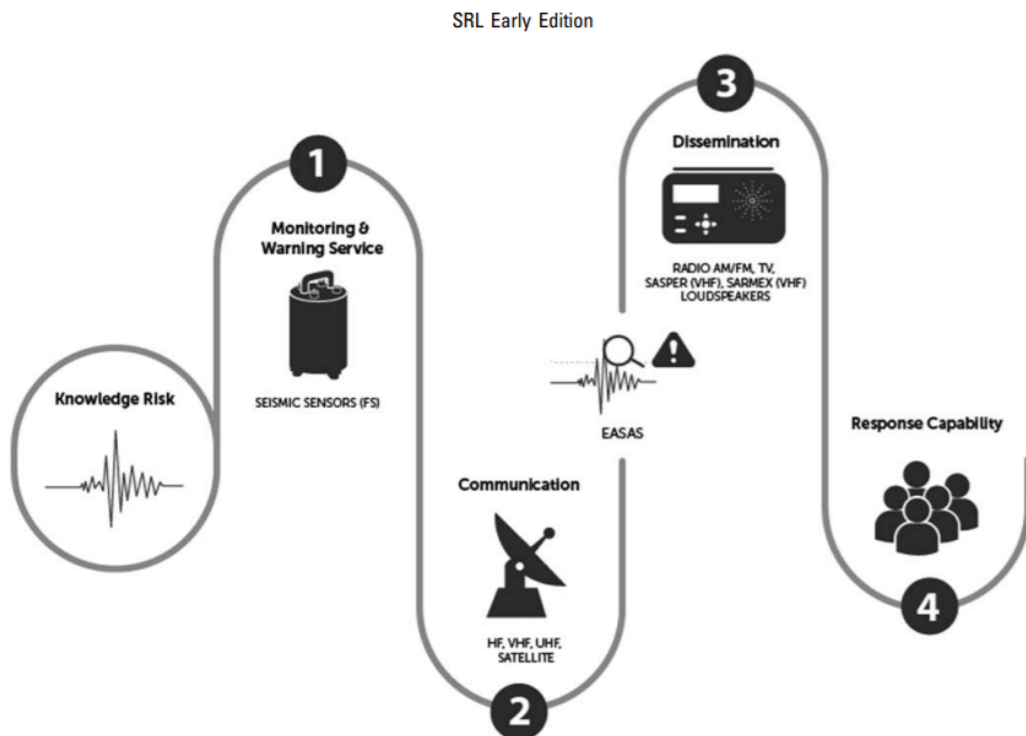
En la imagen se puede observar las diferentes etapas de SASMEX. Muestra lo que es SAS, lo que es Oaxaca SASO y lo que fue la segunda fase de la SAS. Estas tres juntas forman lo que se conoce hoy en día como SASMEX. También en la misma imagen se observan las 6 ciudades que

cuentan con el sistema de alerta temprana, las ciudades son; Ciudad de México, Oaxaca, Acapulco, Chilpancingo y Morelia. (J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018)

El sistema SASMEX está conformado por cuatro partes principales;

- Estaciones de sensores sísmicos.
- Sistema de comunicación.
- Nodos de control.
- Algoritmo de toma de decisiones, que detecta los rangos y la magnitud del sismo.

(J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018)



(J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018)

En la Figura 4 se puede ver la representación del diagrama de operaciones de la alerta temprana SASMEX.

El sistema SASMEX recomienda que exista un distanciamiento mínimo entre las estaciones sísmógrafos no mayor a 25 km. También se recomienda que la distancia de ocurrencia de los sismos y el área de la alarma sea de mínimo 200 Km, esto con la finalidad de que la alarma suene con un tiempo de anticipación adecuado para que la gente se pueda refugiar. (J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018)

I. Red de sismógrafos del INSIVUMEH

Guatemala cuenta con tres diferentes sismógrafos. La organización encargada de estos es el Insivu-meh. Estos están repartidos alrededor de todo el país. Son tres tipos de redes sismográficas; la red de banda ancha, la red de periodo intermedio y la red sixaola.

1. Red de banda ancha. Son instrumentos diseñados para medir la velocidad del suelo en un variado rango de frecuencias desde los mil hertz hasta varios cientos de segundos. Son instrumentos sensibles, por lo que miden eventos muy pequeños. Una red de estos sensores nos permite ubicar en tiempo y espacio el sismo. Estos aparatos cuentan con una desventaja, los aparatos se saturan de manera muy rápida por lo que se necesitan otros aparatos para poder obtener datos fidedignos.

Actualmente existen cinco estaciones de banda ancha. Estos se encuentran en Huehuetenango, Petén, Izabal, Chiquimula y Retalhuleu. Cada una de las estaciones cuenta con un sismómetro y un acele-rómetro. Estas se conectan con la estación central por medio de satélites.

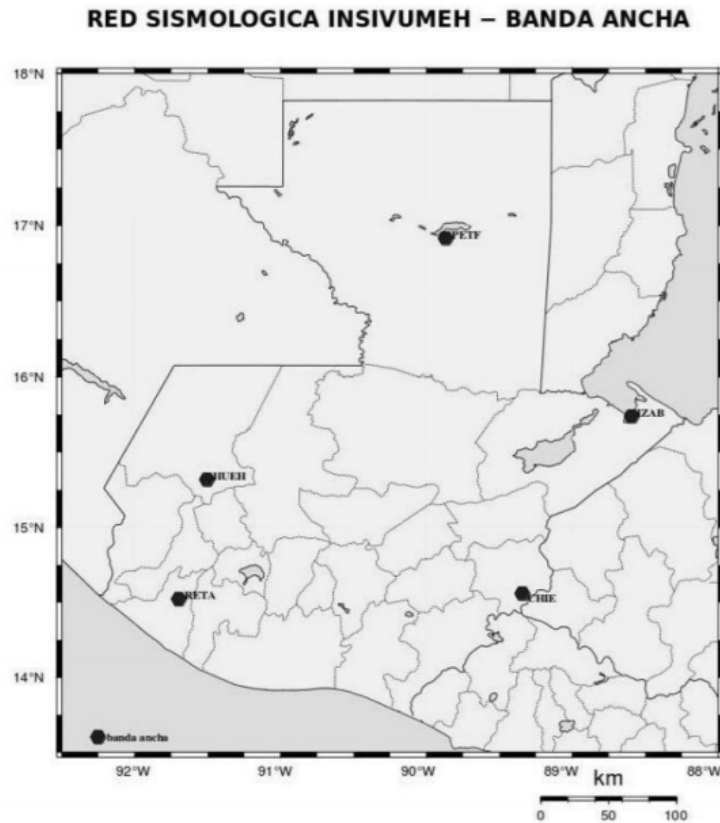


Figura 9. Red sísmica Banda ancha

(INSIVUMEH, 2021)

2. Red de periodo intermedio. Existen cinco estaciones de periodo intermedio. Estas se encuentran en Peten, San Marcos, Guatemala, Santa Rosa y Alta Verapaz.

RED SISMOLOGICA INSIVUMEH – PERIODO INTERMEDIO

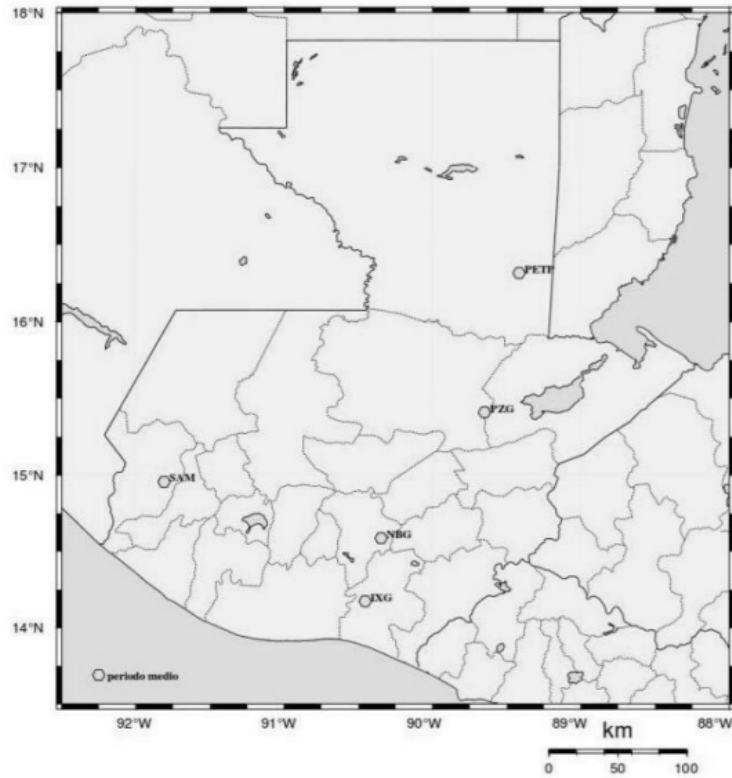


Figura 10. Red sísmica periodo intermedió

(INSIVUMEH, 2021)

3. Sixaola. Estas estaciones son las mas modernas con las que actualmente cuenta Guatemala. Son mas compactas por lo que son de mas fácil manipulación. Estas se conectan por medio de internet. Actualmente hay 15 estaciones alrededor del país. Una de sus mayores ventajas es que miden las ondas de norte-sur, este-oeste y en los ejes verticales. Su aplicación va enfocada al monitoreo volcánico, monitoreo de campos geotérmicos, mediciones del ruido sísmico y de la amplificación del suelo.

RED SISMOLOGICA INSIVUMEH – SIXAOLA

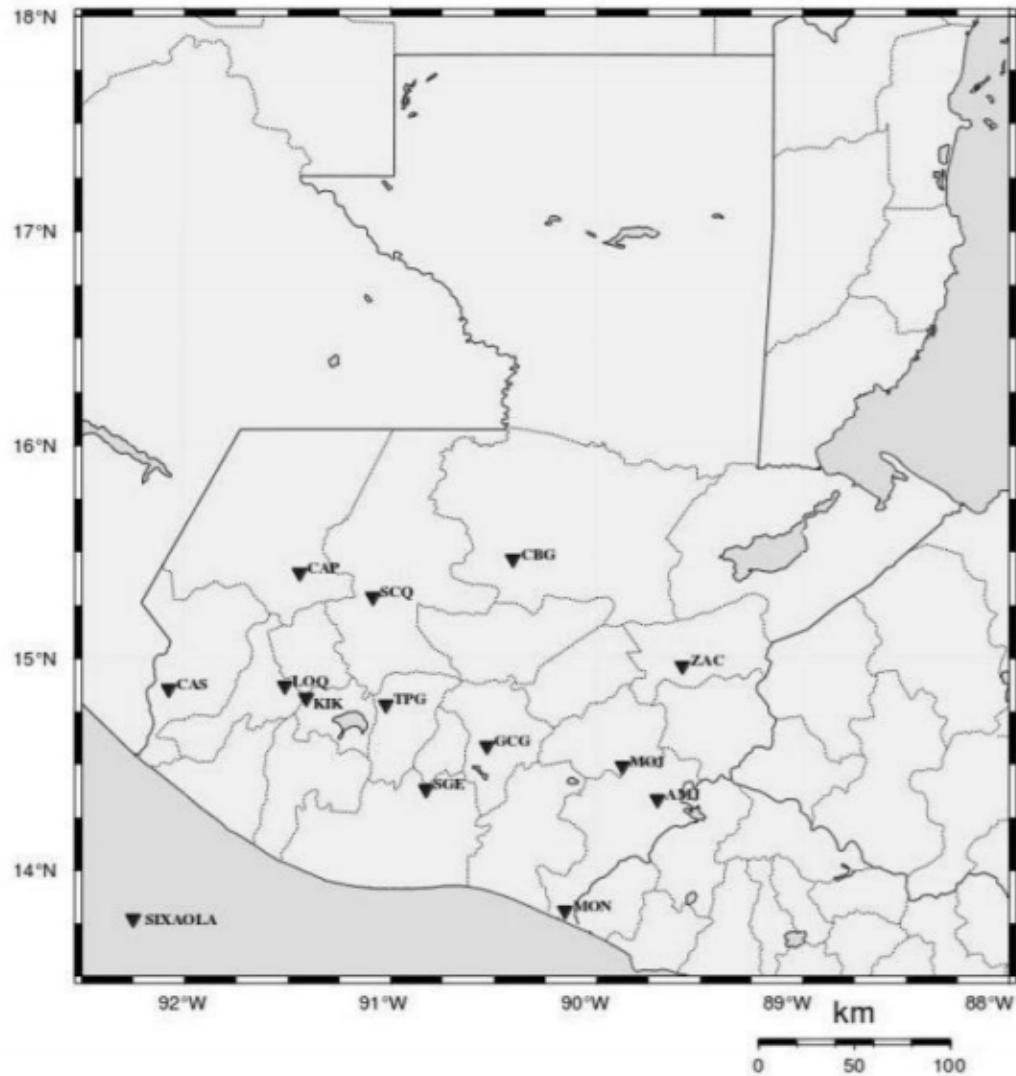


Figura 11. Red sísmica Sixaola

(INSIVUMEH, 2021)

4. Algoritmos. Según la Real Academia Española en su edición del 2021 un algoritmos se define como un conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema.

Actualmente existen dos algoritmos distintos funcionales para SASMEX.

- 3 second of the p-wave and Coda
- ts-tp

a. 3 seconds of the P-Wave Coda

Este algoritmo se basa en los primeros 3 segundos de la primera onda, las P-waves. El algoritmo se creo pensando inicialmente en lo que son los sismos en las fallas. México se encuentra a mas de 200 Km de la zona de subducción por lo que le funciona el algoritmo ts-tp. Sin embargo si uno se ubica en áreas cercanas a las fallas este algoritmo no funciona ya que las ondas S y el movimiento del sismo llegan al mismo tiempo. En cambio este algoritmo utiliza los primeros tres segundos de las ondas P para determinar la magnitud del sismo y emitir la alarma. Este algoritmo es funcional para ciudades que se ubiquen a 40 Km del área donde se produce el sismo, en este caso la falla. (A. C. Gerardo Suarez, 2018b)

Este algoritmo utiliza dos parámetros para poder calcular la magnitud del sismo, el primero es la aceleración acumulativa cuadrática y el segundo es un parámetro que mide la forma de la aceleración acumulativa cuadrática. La recaudación de la información que necesita el algoritmo se obtiene de los primeros tres segundos desde que llega la onda p a la estación. (A. C. Gerardo Suarez, 2018b)

b. ts-tp

Este algoritmo se basa en la recopilación de información en el intervalo de ts-tp. El ts-tp hace referencia al intervalo de tiempo desde que se registran las ondas primarias hasta que se registren las ondas secundarias. La aceleración de las ondas P es medida por su componente vertical. (A. C. Gerardo Suarez, 2018a)

El algoritmo ts-tp no es capaz de calcular el epicentro ni el hipocentro como tampoco el movimiento de la tierra. Este espera a que dos estaciones vecinas reporten el sismo para hacer el análisis y ver si reportar el sismo en la alarma. (A. C. Gerardo Suarez, 2018a)

El proceso de detección de las ondas P y S, usa tres componentes ortogonales; X, Y y Z. Una vez recolecta la información y detecta el movimiento de las ondas S este procede a calcular la magnitud del sismo. En algunos casos debido a altos niveles de ruido a los alrededores algunas estaciones se anulan hasta que el ruido regrese a niveles dentro de sus parámetros. (A. C. Gerardo Suarez, 2018a)

Inicialmente el algoritmo emitía alertas cuando la magnitud estaba dentro del rango $5.5 < M_w < 6$. En muchas ocasiones la alerta no hubiese sido emitida debido a problemas. Por lo que se decidió cambiar esto y que solo se emitiera la alarma cuando $M_w > 5.8$ (magnitud mayor a 5.8). Realizando las pruebas con 89 sismos registrados entre 1985 y 2017. Se descubrió que un 89 por ciento de los sismos se calcularon por el algoritmo con una magnitud correcta, el resto estaba sobrado o el resultado de la magnitud era menor al real. Se descubrió que entre más separados están las estaciones que reportan el sismo más discrepancia hay entre el cálculo de la magnitud de estas. (A. C. Gerardo Suarez, 2018a)

c. Otros métodos de cálculo para tiempo de reacción son: el método del variograma, este método se basa en la recolección de varios puntos de información para el calculo. Funciona por medio de una interpolación lineal o por medio de ajuste de polinomios cúbicos.

Así mismo también existe el método del compás, este método es muy parecido al (Ts-Tp). Se basa en el cálculo del tiempo por medio de la diferencia de llegada entre las ondas primarias y secundarias. Sin embargo este método es más lento que el (Ts-Tp). (Sabionne, 2012)

5. Naciones Unidas. Para poder considerarse una alerta temprana ante cualquier fenómeno natural, las Naciones Unidas pide que esta cumpla con cuatro condiciones;

- Conocer el riesgo del fenómeno al que se encuentran.
- Monitoreo adecuado y servicios de aviso.
- Medios efectivos de diseminación de la alarma.
- Un tiempo adecuado de reacción para la población.

Si el sistema no cumple con estas condiciones entonces las Naciones Unidas no reconocerán el sistema de alerta temprana. (J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018)

J. Instituciones guatemaltecas

Guatemala cuenta con diversas instituciones para diferentes actividades. Entre estas están la INE, INSIVUMEH y CONRED.

1. INE. La INE es el instituto nacional de estadística de Guatemala. Es la entidad encargada de todas las estadísticas del país. En esta podemos encontrar estadísticas de la población hasta las estadísticas de los sismos.

Origen de Epicentro	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Total	755	712	1368	1041	900	980	905	1400	1754	872	2300	1219	1735	1616	792	932	866	1078
Guatemala	13	21	65	16	15	30	23	28	370	28	19	16	53	52	26	39	17	18
El Progreso	1	1	5	1	0	2	2	3	2	1	3	0	6	2	3	4	4	0
Sacalepéquez	12	31	11	5	4	4	6	8	3	4	6	5	16	14	7	4	8	12
Chimaltenango	8	6	16	14	20	12	11	11	8	1	6	2	11	17	8	19	17	12
Escuintla	162	162	463	237	205	205	269	380	279	224	163	215	286	288	185	189	202	205
Santa Rosa	35	69	67	62	56	66	68	80	138	92	1731	88	155	92	44	46	51	52
Sololá	0	4	5	6	8	2	6	6	6	3	1	2	8	10	7	7	5	10
Totonicapán	1	2	3	2	2	2	3	2	3	1	1	0	4	3	2	2	1	5
Quezaltenango	4	8	14	6	7	9	12	11	5	11	6	10	63	34	5	10	13	24
Suchilépéquez	32	30	95	49	51	49	91	95	86	61	46	55	71	72	34	67	89	79
Retalhuleu	57	62	115	97	65	87	120	143	104	83	85	83	179	115	42	78	97	103
San Marcos	2	4	20	15	12	8	22	23	22	10	12	12	69	45	11	9	13	40
Huehuetenango	2	6	9	5	15	13	4	8	16	14	5	8	50	25	23	12	6	6
Quiché	5	15	19	9	16	11	9	15	13	11	17	5	50	53	25	26	27	17
Baja Verapaz	3	7	10	6	5	3	5	2	3	0	3	2	15	12	10	7	6	3
Alta Verapaz	4	4	8	11	20	12	6	17	19	4	8	5	14	19	14	9	7	5
Petén	0	0	1	1	3	5	0	0	4	1	0	0	3	1	6	3	1	0
Itzamal	0	2	4	4	4	3	4	8	6	3	0	7	5	5	3	6	5	1
Zacapa	3	4	0	9	10	3	2	10	4	6	8	2	8	13	7	13	4	5
Chiquimula	1	1	1	2	8	4	0	3	4	1	1	11	4	3	8	3	2	4
Jalapa	3	4	8	7	4	13	3	3	10	3	2	1	4	5	7	2	2	2
Jutiapa	11	22	25	29	38	33	12	29	46	14	21	33	33	20	17	29	18	13
Territorio de Belice	78	0	0	1	0	2	0	0	119	1	0	0	2	0	2	0	0	0
Territorio de El Salvador	0	84	109	140	118	155	88	175	8	82	85	112	144	117	59	70	70	65
Territorio de Honduras	255	2	9	10	12	8	4	11	172	4	4	21	12	13	11	7	4	4
Territorio de México	12	22	41	34	22	37	30	55	16	45	26	30	75	124	36	39	33	43
Océano Pacífico	15	58	87	89	77	69	34	84	59	69	41	228	192	200	91	80	58	74
Fuera del mapa	36	61	138	174	103	113	91	190	229	95	0	266	203	251	99	152	106	276

Figura 12. Estadística de sismos

(INE, 2018)

En la tabla anterior se muestran los sismos desde el 2001 hasta el 2018. Se muestra el total de sismos en el año y luego muestra el total de los sismos por la ubicación del epicentro del sismo.

2. INSIVUMEH. El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología fue creado después del terremoto del 4 de febrero de 1976. EL objetivo de esta institución es de generar y difundir información geocientífica, a través de la recolección y el procesamiento de datos para la toma de decisiones que contribuyan al beneficio de la población.(INSIVUMEH, 2021)

3. CONRED. La Coordinadora nacional para la reducción de desastres, es la encargada de coordinar con las instituciones públicas, privadas, nacionales e internacionales, la gestión de riesgos.(CONRED, 2021)

K. Dónde entra una alarma sísmica en una smart city

Los ámbitos de aplicación de las ciudades inteligentes son:

- El medio ambiente: Tener una ciudad tecnológica que obtenga poder de sistemas de energía renovable. Así mismo que esta ciudad ahorre energía. Que tenga una buena administración y saneamiento del agua. Promover el uso de carros eléctricos.(De Sociedades & Herrero, 2016)
- Sanidad: Tener un mejor manejo de datos de sanitarios y de pacientes. Así como tener alarmas para personas de la tercera edad para cuando se caigan o salgan de ruta.(De Sociedades & Herrero, 2016)
- Urbanismo: Sistemas de alumbrado público que optimicen la energía y que utilicen energía renovable. Un buen manejo del tránsito. Mejoras en el transporte público e incentivar el uso del mismo. Tener estructuras inteligentes. (De Sociedades & Herrero, 2016)
- Administración y gobierno: Tener wifi público gratuito, contar con plataformas de pago en línea y tener sistemas de administración electrónicos. Este es uno de los retos de la UE para el presente año. (De Sociedades & Herrero, 2016)
- Seguridad: Se desea tener un centro que administre la seguridad como el que tiene en Madrid. Este es tan eficaz que ha reducido los tiempos de respuesta de la policía a 8 minutos. Cabe mencionar que no solo trabaja con la policía. Tener un ambiente seguro de cualquier catastro dentro de la ciudad. (De Sociedades & Herrero, 2016)
- Turismo: Contar con un área que incentive el turismo. Así mismo contar con un ambiente seguro para el turismo. Brindarle un transporte sencillo para aquellos que estén de turistas. La mayoría de los requisitos para estar dentro de las ciudades son tecnológicos. Si podemos ver muchos de estos requerirán los sensores. Según muestra en sus datos la fundación Endesa, España es el país donde más se está intentando desarrollar en el tema de Smart cities.(De Sociedades & Herrero, 2016)

VIII. Marco procedimental

A. Riesgos sísmicos

Para poder definir los riesgos sísmicos debemos de enumerar todos aquellos componentes naturales capaces de ocasionar un sismo, como actividad volcánica, movimiento de placas o movimientos en las fallas.

1. Placas. Guatemala está ubicado sobre tres placas tectónicas: la placa de Cocos, placa del Caribe y la placa de Norteamérica. Se cuenta con la placa de Norteamérica con un movimiento hacia el sur occidente, la de Cocos con un movimiento hacia el suroccidente y la del Caribe hacia el oriente. La placa de Cocos y la de Norteamérica tienen lo que se conoce como un movimiento de subducción donde la placa de Cocos se hunde bajo la placa de Norteamérica. (Mexico, 2020)

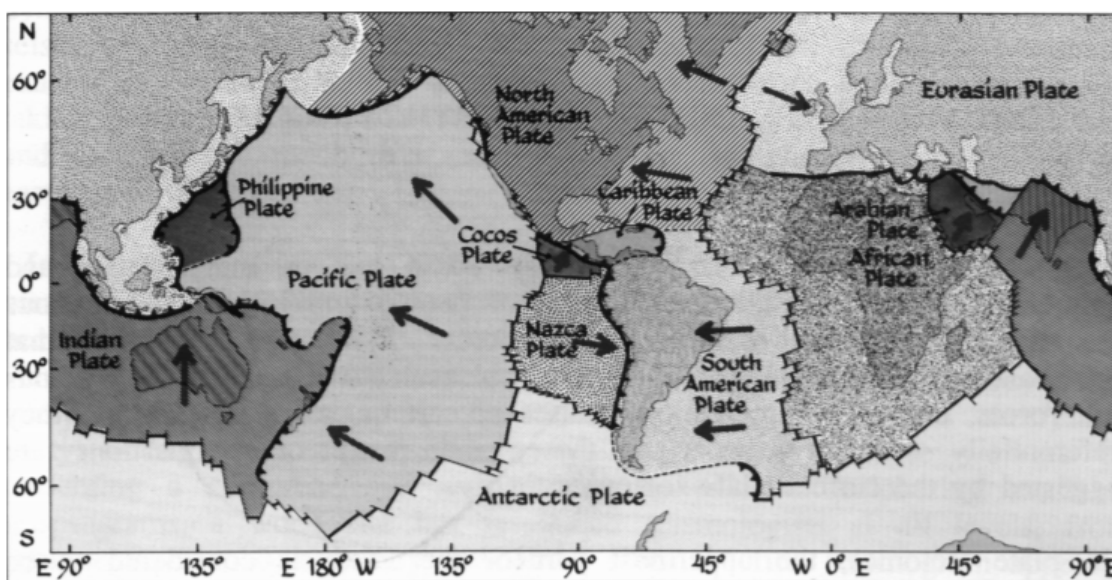


Figura 13. Placas en el territorio guatemalteco

2. Fallas. Guatemala cuenta con una innumerable cantidad de fallas, algunas han sido descubiertas y otras siguen sin ser identificadas. Para la determinación de los riesgos sísmicos en Guatemala nos debemos guiar por aquellas que ya han sido identificadas y mapeadas. Dentro de las fallas principales conocidas hasta el 2021 tenemos:

- Falla Polochic, también se le conoce como Cuilco-Chixoy-Polochic.
- Falla Motagua
- Falla Jocotán
- Falla Jalpatagua

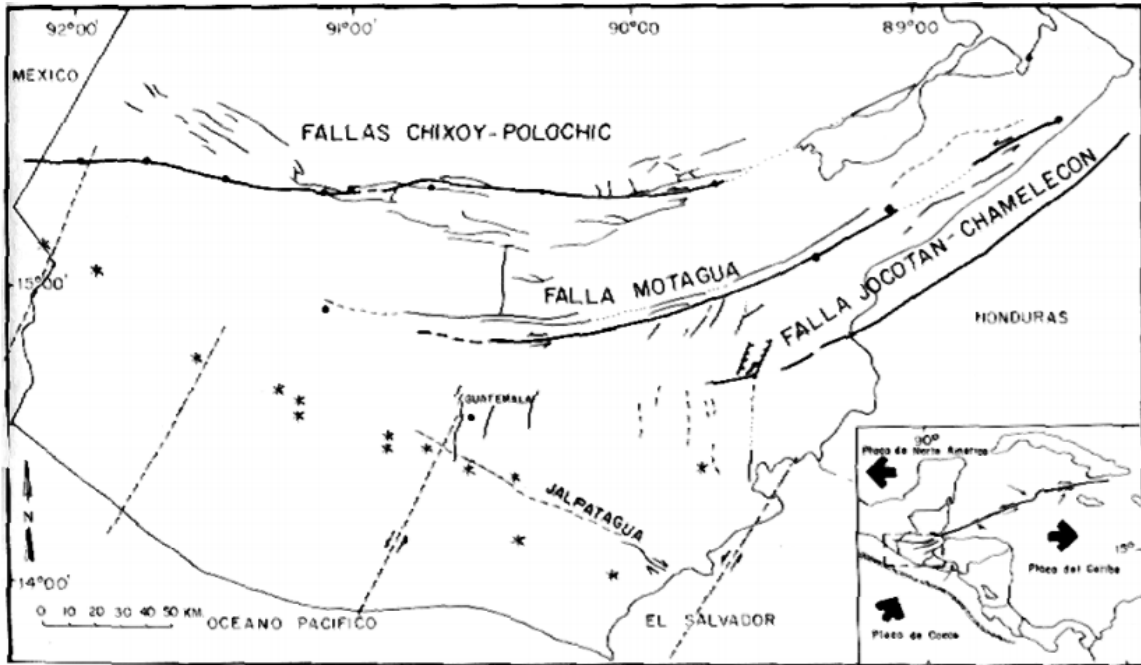


Figura 14. Fallas principales

(INSIVUMEH, 2021)

De la misma forma en que las fallas primarias pueden causar sismos, también tenemos las secundarias que representan el mismo riesgo. algunas de las fallas secundarias que mas amenazan el área metropolitana de Guatemala son:

- Falla de Mixco
- Falla de Santa Catarina Pinula
- Falla de Palencia

El mayor riesgo que estas fallas representan es la cercanía a la capital. Existen poblados, gente que habita exactamente sobre estas fallas. Uno ejemplo perfecto de esto es la colonia Villas del Rosario en la zona 4 de Mixco.

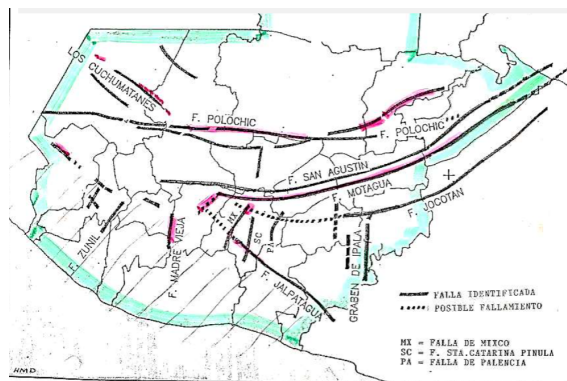


Figura 15. Fallas secundarias de Guatemala

(Monzon, 2018)

La siguiente imagen fue tomada en la zona 4 de Mixco en la colonia Villas del Rosario. Estos daños fueron causados por un movimiento en la falla de Mixco.



Figura 16. Efectos en el muro



Figura 17. Efectos en la casa

3. Historial sísmico. Se desarrollo un mapa con los sismos mayores a una magnitud de 5 en la escala de Ritchster. Se toman únicamente estos sismos ya que son los mas propensos a causar serios daños a la infraestructura y a la población. Si se tomasen todos los sismos ocurridos en los últimos 3 años se saturaría el mapa con datos irrelevantes, ya que estos no son los sismos que se buscan analizar.



Figura 18. Sismos en los últimos 3 años

Dentro del mapa podemos observar la placa de Norteamérica, en la parte norte del país, si nos vamos al sur del país encontramos la placa de Cocos y por último la placa del Caribe. Luego los sismos de color azul son aquellos que ocurrieron del 10/4/2018 hasta el 9/4/2019. Los sismos de color verde pertenecen al periodo del 10/4/2019 hasta el 9/4/2020. Por último están los sismos del 10/4/2020 hasta el 9/4/2021 que se representan con un punto rojo. Todos los sismos que se muestran en el mapa son de magnitud mayor a 5. En el mapa 1 no se observan bien los diferentes sismos, el motivo de este mapa es darnos una idea de donde se ubica el epicentro de los sismos de magnitud mayor a 5 en Guatemala.



Figura 19. Sismos según su año de ocurrencia

En el mapa dos podemos ver de cerca lo que viene siendo la distribución de los sismos. En los últimos 3 años ha habido un total de 29 sismos mayores a 5 grados en la escala de Richter. Estos sismos han ocurrido en la zona sur del país. Muchos de estos sismos ocurren dentro de las placas y no tanto en los bordes de las mismas.

4. Volcanes. El anillo de fuego que pasa sobre Guatemala es un cinturón de los volcanes más activos del mundo. En este toman, también ocurren el 90 por ciento de los sismos del mundo y el 80 por ciento de los terremotos más grandes del mundo. Guatemala como tal cuenta con 288 volcanes o estructuras que se reconocen vienen de origen volcánico. 8 de estos cuentan con un historial de actividad volcánica. Actualmente 4 de estos han tenido actividad dentro de los últimos años siendo estos el Pacaya, Santiaguito, Tacaná y Fuego. La actividad volcánica es uno de las principales causas de los sismos alrededor del mundo. A esto se debe que el 90 por ciento de los sismos ocurran en el anillo de fuego mostrado en la figura uno, también se debe a que la mayor parte de volcanes se encuentra cerca de los límites de las placas donde estas chocan con otras y forman volcanes.

No.	Nombre	Latitud Norte	Latitud Oeste	Altura MSNM	Dep.	Actividad
1	Tacana	15°8'	92°7'	4092	San Marcos	1855, 1878, 1900-1903, 1949-1950, 1986-1987
2	Tajumulco	15°03'	91°54'	4220	San Marcos	
3	Siete Orejas	14°49'	91°37'	3370	Quetzaltenango	
4	Santa María	14°45'	91°33'	3772	Quetzaltenango	1902-1903
5	Santiaguito	14°44'	91°34'	2500	Quetzaltenango	1922-2000
6	Cerro Quemado	14°48'	91°31'	3197	Quetzaltenango	1765, 1818
7	Tolimán	14°37'	91°11'	3150	Sololá	
8	Atitlán	14°35'	91°11'	3537	Sololá	1469, 1505, 1579, 1663, 1826, 1856
9	San Pedro	14°39'	91°16'	3020	Sololá	
10	Acatenango	14°30'	90°53'	3976	Chimaltenango/ Sacatepéquez	1924 - 1926, 1972
11	Fuego	14°29'	90°53'	3763	Sacatepéquez/ Escuintla	1524-1531, 1542-1551, 1581-1587, 1614-1629, 1686, 1699-1717, 1730-1737, 1799, 1826-1829, 1855-1860, 1880, 1896, 1932, 1944-1977, 1987, 1999
12	Agua	14°28'	90°45'	3766	Sacatepéquez/ Escuintla	
13	Pacaya	14°23'	90°36'	2552	Escuintla	1565, 1623, 1651-1699, 1775, 1805, 1846, 1885, 1961-2000
14	Tecuamburro	14°10'	90°25'	1840	Santa Rosa	
15	Moyuta	14°02'	90°06'	1662	Jutiapa	
16	Junay	14°42'	90°00'	2176	Jalapa	
17	Las Flores	14°18'	90°00'	1600		
18	Suchitán	14°24'	89°47'	2042	Jutiapa	
19	Chingo	14°07'	89°44'	1775	Jutiapa	
20	Ixtepeque	14°25'	89°41'	1292		
21	Ipaia	14°33'	89°38'	1650	Chiquimula/ Jutiapa	

Figura 20. Volcanes en Guatemala

(INSIVUMEH, 2000)



Figura 21. Volcanes

En la Figura 18 se observa una tabla donde se detallan los 21 volcanes de Guatemala. En esta se puede ver el nombre, las coordenadas, el departamento en el que se ubican, la altura sobre el nivel del mar y los años en los que estos han tenido actividad volcánica hasta el año 2000.

Con la información presentada en las imágenes y mapas anteriores podemos observar el contexto de Guatemala. Podemos ver cómo es que esta país tan pequeño se encuentra sometido a un constante riesgo sísmico, ya sea por movimientos en las fallas, por movimientos en las placas tectónicas o por actividad volcánica.

Teniendo en cuenta el Mapa No. 2 podemos analizar el mapa de índices sísmicos de Guatemala, y ver que en el país se reconoce que existe un riesgo sísmico y en dónde existe este riesgo sísmico desde hace años.

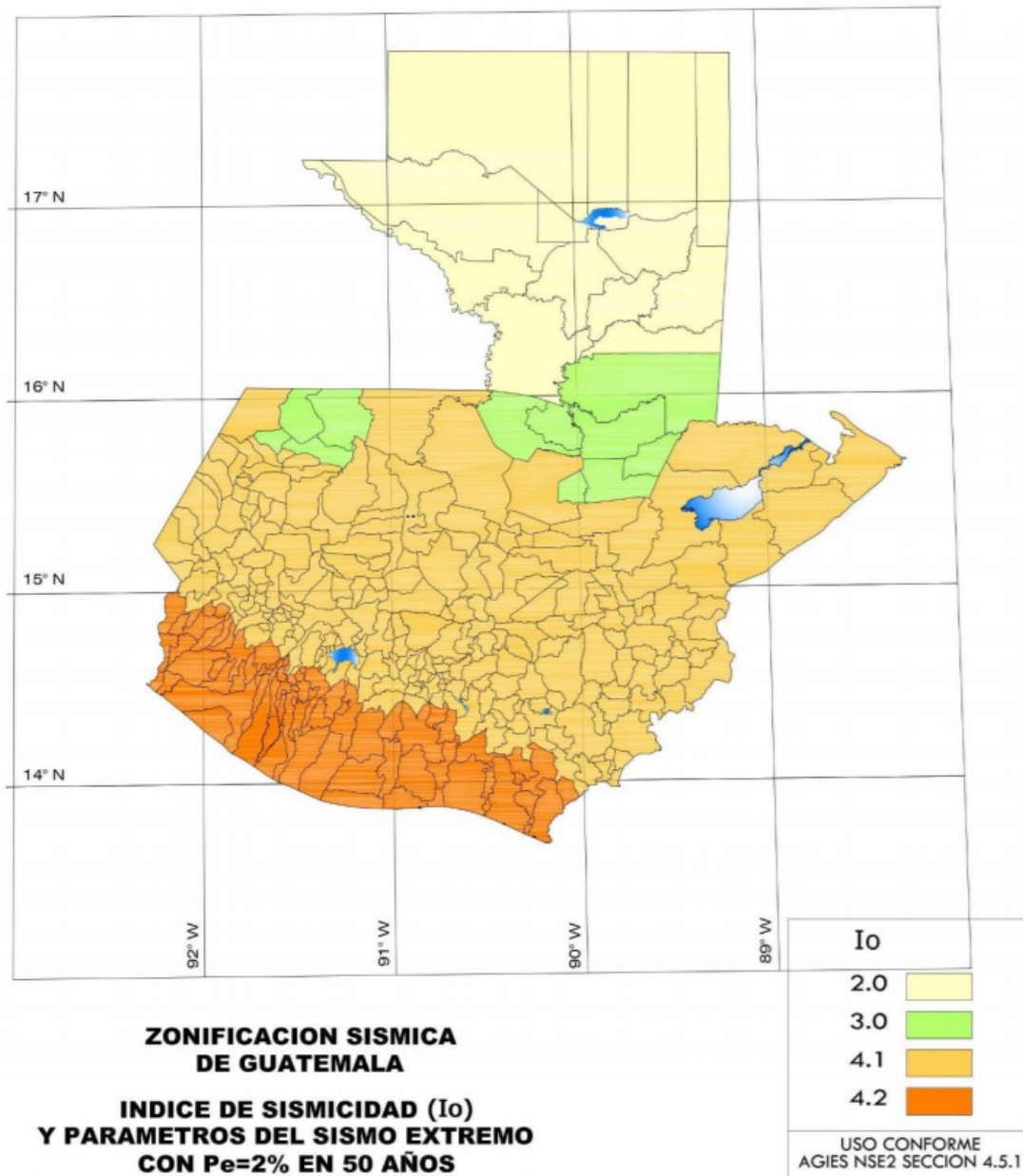


Figura 22. Índice de sismicidad en Guatemala

(Agies, 2018)

La parte de mayor riesgo sísmico es la parte sur de Guatemala. En el Agies encontramos la Figura 19, este es un mapa que define los índices sísmicos para el diseño de edificaciones en Guatemala. Si comparamos la Figura 19 con la Figura 13 podemos ver cómo la parte sur es la que se encuentra cerca de la placa de Cocos, el área de subducción y viendo el Mapa No. 2 vemos que la mayor parte de los sismos con una magnitud mayor a 5 grados en la escala de Richster se encuentran por esas áreas. No solo eso si no que la cadena de volcanes en Guatemala también se encuentra al sur del país por lo que esto también contribuye a la alta sismicidad en esta área. En la Figura 20 podemos observar la totalidad de sismo ocurridos, separado por su área de ocurrencia desde el 2001 hasta el 2018.

Origen de Epicentro	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Total	755	712	1368	1041	900	980	905	1400	1754	872	2300	1219	1735	1615	792	932	866	1078
Guatemala	13	21	65	16	15	30	23	28	370	28	19	16	53	52	26	39	17	18
El Progreso	1	1	5	1	0	2	2	3	2	1	3	0	6	2	3	4	4	0
Sacatepéquez	12	31	11	5	4	4	6	8	3	4	6	5	16	14	7	4	8	12
Chimaltenango	8	6	16	14	20	12	11	11	8	1	6	2	11	17	8	19	17	12
Escuintla	162	162	483	237	205	205	269	380	279	224	163	215	286	298	185	189	202	205
Santa Rosa	35	89	67	62	56	86	68	80	138	92	1731	88	155	92	44	46	51	52
Sololá	0	4	5	6	8	2	6	6	6	3	1	2	8	10	7	7	5	10
Totonicapán	1	2	3	2	2	2	3	2	3	1	1	0	4	3	2	2	1	5
Quezaltenango	4	8	14	6	7	9	12	11	5	11	6	10	63	34	5	10	13	24
Suchitepéquez	32	30	95	49	51	49	91	95	86	61	46	55	71	72	34	67	89	79
Retalhuleu	57	62	115	97	65	87	120	143	104	83	85	83	179	115	42	78	97	103
San Marcos	2	4	20	15	12	8	22	23	22	10	12	12	69	45	11	9	13	40
Huehuetenango	2	6	9	5	15	13	4	8	16	14	5	8	50	25	23	12	6	6
Quiché	5	15	19	9	16	11	9	15	13	11	17	5	50	53	25	26	27	17
Baja Verapaz	3	7	10	6	5	3	5	2	3	0	3	2	15	12	10	7	6	3
Alta Verapaz	4	4	8	11	20	12	6	17	19	4	8	5	14	19	14	9	7	5
Petén	0	0	1	1	3	5	0	0	4	1	0	0	3	1	6	3	1	0
Itzabal	0	2	4	4	4	3	4	8	6	3	0	7	5	5	3	6	5	1
Zacapa	3	4	0	9	10	3	2	10	4	6	8	2	8	13	7	13	4	5
Chiquimula	1	1	1	2	8	4	0	3	4	1	1	11	4	3	8	3	2	4
Jalapa	3	4	8	7	4	13	3	3	10	3	2	1	4	5	7	2	2	2
Jutiapa	11	22	25	29	38	33	12	29	46	14	21	33	33	20	17	29	18	13
Territorio de Belice	78	0	0	1	0	2	0	0	119	1	0	0	2	0	2	0	0	0
Territorio de El Salvador	0	84	109	140	118	155	68	175	8	82	85	112	144	117	59	70	70	65
Territorio de Honduras	255	2	9	10	12	8	4	11	172	4	4	21	12	13	11	7	4	4
Territorio de México	12	22	41	34	22	37	30	55	16	45	26	30	75	124	36	39	33	43
Océano Pacífico	15	58	87	89	77	69	34	84	59	69	41	228	192	200	91	80	58	74
Fuera del mapa	36	61	138	174	103	113	91	190	229	95	0	266	203	251	99	152	106	276

Figura 23. Sismos ocurridos y registrados por la INE

(INE, 2018)

B. Descripción de las herramientas

Las herramientas a utilizarse para el desarrollo del trabajo son Google Earth pro, QGIS y Excel.

1. Google Earth Pro. Google Earth Pro es un programa que funciona por medio del internet. Este programa muestra el globo terráqueo y nos permite viajar de forma virtual a todo el mundo. De la misma forma es una herramienta donde se pueden ingresar coordenadas y esta devuelve un punto georeferenciado que se puede utilizar en otros programas con características similares. Con este programa podemos ubicar dos puntos y sacar una distancia dentro de ellos.

Dentro del trabajo de investigación esta herramienta será utilizada para poder sacar puntos georeferenciados y luego poder pasarlos al programa QGIS. De la misma forma sera útil para sacar las distancias dentro de los puntos que representen los sismos, estaciones y la ciudad. Estas distancias serán útiles para el análisis de viabilidad de la alarma.

2. QGIS. Como siguiente herramienta tenemos el programa conocido como QGIS. Este programa será utilizado para la elaboración de mapas como los que se pueden observar en las figuras 18, 19 y 21. Este es un programa que nos permite ingresarle información georeferenciada que se obtiene de programas como Google Earth Pro. Este programa nos ayudara a representar la información de forma ordenada.

3. MathCAD. MathCad es un programa que permite realizar análisis matemáticos. En este uno puede definir variables e ingresar fórmulas para realizar hojas de cálculo. Este programa se utilizará con el fin de presentar los cálculos realizados de forma ordenada y descriptiva para que el lector entienda el proceso que se realizó.

IX. Resultados

A. Recopilación de información en mapas



Figura 24. Sismos de magnitud mayor a 5 en la escala Richster en los últimos 3 años

Con el primer mapa únicamente se intenta plantear la ubicación de Guatemala dentro de las placas tectónicas y donde han ocurrido los sismos mayores a 5 grados en la escala Richter. Se trabaja únicamente con los sismos de 5 grados o mayores ya que son los sismos que tienden a causar daños representativos.

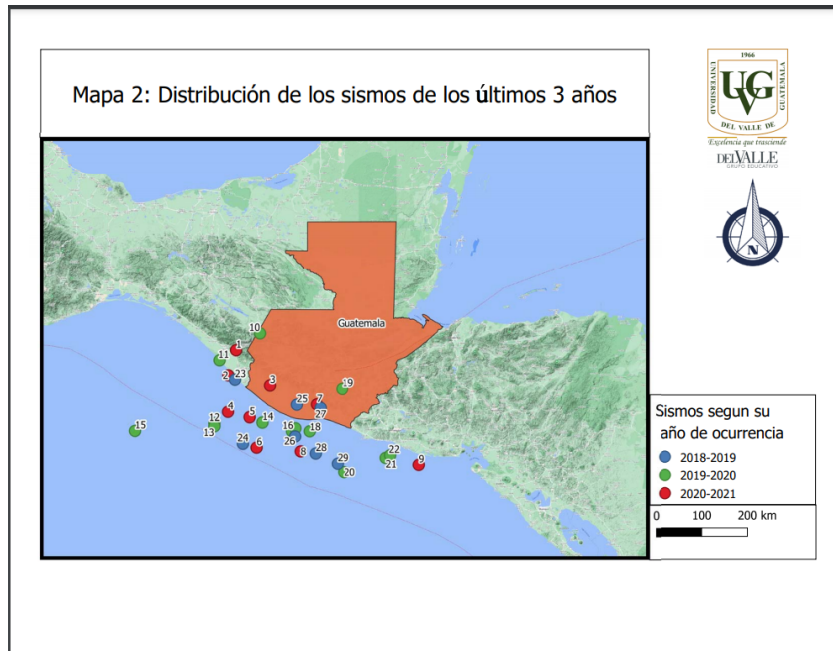


Figura 25. Sismos de magnitud mayor a 5 en la escala Richter

En el mapa dos se puede ver la ubicación de estos sismos. Se separan los sismos por año de ocurrencia. El año de ocurrencia no es un dato relevante únicamente esta para darse al idea de cuantos sismos mayores a 5 grados ocurren anualmente. Estos sismos en ocasiones no se sienten y en otras si, esto puede ser debido a varios factores, como el hipocentro del sismo. El hipocentro se diferencia del epicentro ya que para el hipocentro tomamos en consideración la profundidad del sismo. En el mapa únicamente se muestra el epicentro. Los sismos fueron numerado para poder darle una nomenclatura a estos y poder hacer referencia a cada uno de ellos.

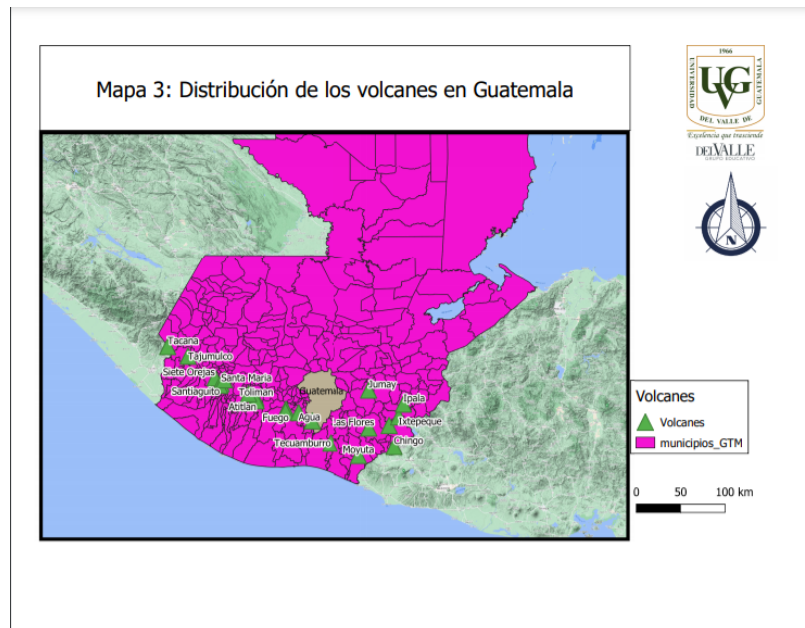


Figura 26. Volcanes de Guatemala

Uno de los causantes de los sismos es la actividad volcánica. Una explosión volcánica puede generar un sismo, es por eso que en el Mapa No. 3 se localizaron los volcanes de Guatemala. Este grupo de volcanes pertenece al anillo de fuego o también conocido como ring of fire. El anillo de fuego es donde se encuentran la mayor cantidad de volcanes activos del mundo.

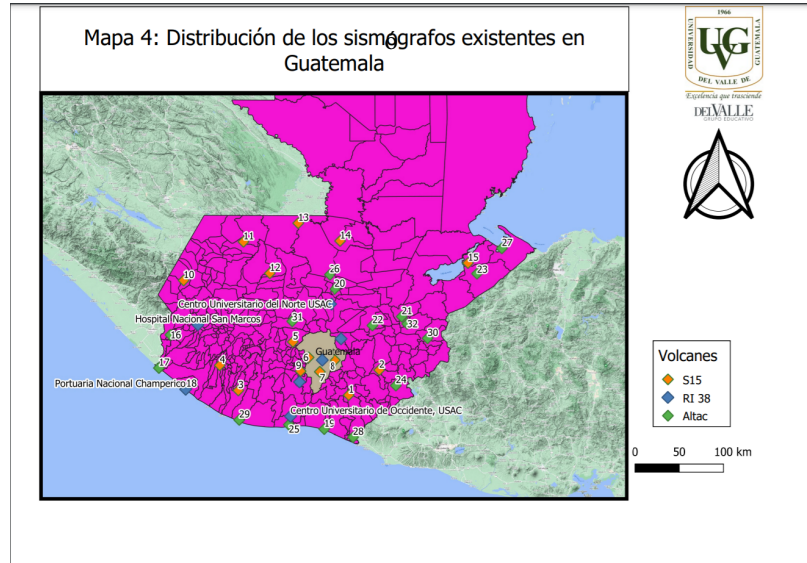


Figura 27. Sismos de magnitud mayor a 5 en la escala Richter

Guatemala cuenta con sismógrafos existentes y funcionales al año 2021. A la fecha cuentan con 40 sismógrafos existentes. En el mapa se muestra la distribución de los sismógrafos en todo el país. Como se puede observar estos se encuentran bien distribuidos alrededor del país.

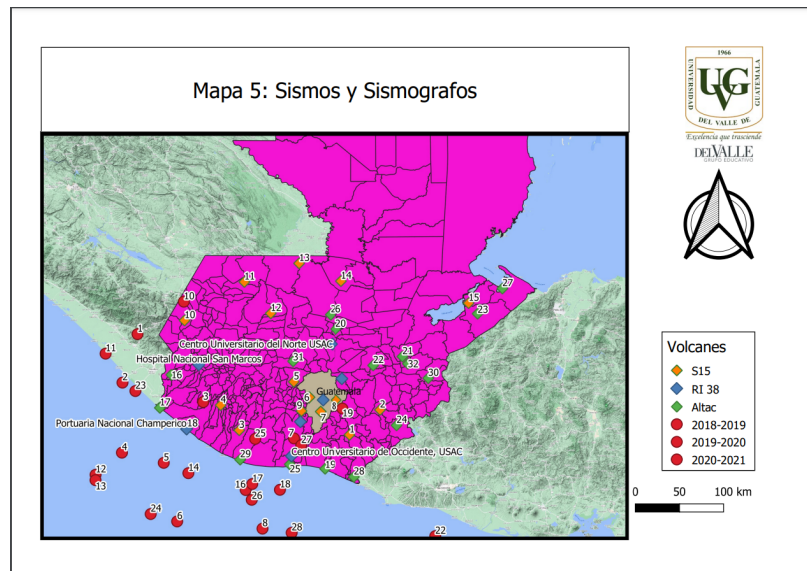


Figura 28. Ubicación de los sismos y los sismógrafos

En el Mapa No. 5 se muestran los sismos de Guatemala y la ubicación de los sismógrafos. El motivo de mostrar estos junto es poder analizar si la ubicación actual de los sismógrafos es útil ante la

mayoría de sismos. Al decir útil, se hace referencia a que la ubicación ayudará a la alarma sísmica o si esta ubicación no es apropiada. Se debe comprender que existen otros motivos por los cuales el sismógrafo se encuentra en la ubicación actual ya que estos se colocaron sin intenciones de una alarma sísmica.

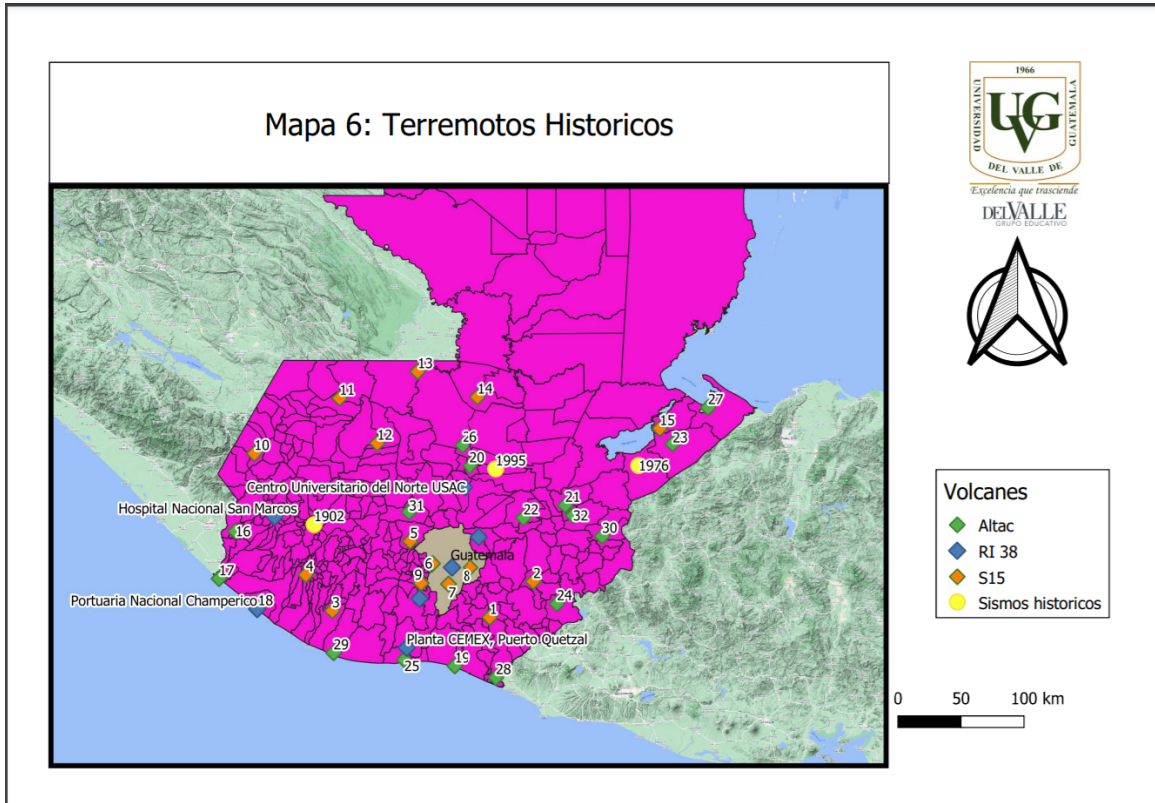


Figura 29. Terremotos históricos en Guatemala

Por último, se muestra un mapa que apoya los cálculos realizados. Dentro del mapa podemos observar las estaciones sismográficas funcionales como también podemos observar tres de los terremotos que han sucedido en Guatemala. El motivo de este mapa es ilustrar los terremotos con los cuales se realizaron los cálculos para evaluar el tiempo, con el cual se hubiera emitido la alarma y el tiempo que se tendría de reacción.

B. FODA

1. Fortalezas.

- Personal: Dentro del país se cuenta con personal capacitado para la recolección de datos y análisis del mismo. Así mismo estos expertos pueden evaluar de forma mas precisa si es viable la implementación de un sistema de alerta temprana.
- La Ciudad de Guatemala cuenta con suelos de tipo sedimento: La ventaja que estos suelos brindan es que no amplifican las ondas sísmicas como seria el caso de Ciudad de México por estar sobre agua, ni tampoco se tienen las velocidades de ondas altas como es el caso de los

suelos rocosos. En un suelo rocoso las velocidades rondan los 5000 m/s. Las velocidades en suelos de sedimento ronda en un rango de 2000 m/s a los 4000 m/s.

- Trabajo en equipo: Instituciones como la Universidad de San Carlos de Guatemala cuenta con sismógrafos de su propia índole. Cuentan con un proyecto conocido como RI-38. Si se trabaja en conjunto con INSIVUMEH se podría trabajar la instalación de mas sismógrafos.

2. Oportunidades.

- Sismógrafos: Guatemala ya cuenta con una red de sismógrafos para la recolección de datos de los eventos sísmicos. Esta red ayuda a iniciar un proceso de investigación para evaluar si es posible y viable la implementación de un sistema de alerta temprana.
- Cercanía a México: México es el primer país en implementar una alarma sísmica funcional. Se puede estudiar el sistema sísmico mexicano para empaparse del tema y observar que es lo que hace que el sistema de alerta temprana sea funcional.

3. Debilidades.

- Distancia entre sismógrafos: Actualmente los sismógrafos se encuentran distribuidos alrededor del país sin tener una distancia estratégica entre ellos. Reduciendo la distancia entre los sismógrafos se podría reducir el tiempo en que la alarma se toma en funcionar.
- Cantidad de sismógrafos: De la mano con la distancia de sismógrafos va la cantidad de sismógrafos. Actualmente los sismógrafos que se tienen no son suficientes para lograr una alarma sísmica exitosa. Aumentando la cantidad de sismógrafos se lograría reducir la distancia entre el origen del sismo y el sismógrafo, por lo cual se podría emitir la alarma mas rápido y aumentar el tiempo de reacción.
- México: A diferencia de México, Guatemala tiene riesgo sísmico en todo el país. Por esto hacemos referencia de que los sismos ocurren por todo el país exceptuando Petén, ya que esta es un área no muy sísmica. México cuenta con la ventaja de que su mayor riesgo sísmico es el límite de subducción en la costa del Pacífico. Esto les representa una ventaja porque en vez de cubrir todo el país de sismógrafos ellos cubrieron únicamente el área de la costa y con esto les basto. Sin embargo también cuentan con un par de sismógrafos distribuidos por otras áreas como se puede ver en la Figura 7.

4. Amenazas.

- Mantenimiento: El sistema debe de tener un mantenimiento apropiado para que funcione adecuadamente. De no llevar el mantenimiento adecuado este podría fallar sin ser notado hasta que llegue el sismo.
- Educación: Se debe de educar a la población guatemalteca. Se debe enseñar a la gente lo que significa el sonido de la alarma, o el mensaje que les entra al teléfono, no solo eso si no que se debe de enseñar a la población a saber actuar cuando escuchan o ven estas alertas. Si no se educa a la gente entonces no se cumplirá con la finalidad de la alarma.
- Geografía: Guatemala se encuentra dentro de tres placas tectónicas. No solo eso si no que también cuenta con varias fallas cercanas a la capital. Esto representa un gran riesgo ya que pueden ocurrir sismos muy cercanos a la capital.

X. Análisis de sismos en Guatemala

Antes de iniciar se debe mencionar que todos los cálculos para los resultados presentados se encuentran en la sección de anexos.

Previo a entrar al análisis quiero mencionar que el método a utilizar para el análisis de datos de la alarma sísmica será el 3 segundos de la coda de la onda p. este es un algoritmo que se creó para implementarse en México ya que es más rápido que el algoritmo inicial que usaban. Se han realizado pruebas con este algoritmo y han demostrado ser exitosas. El motivo por el cual se desea utilizar este algoritmo es dado a la cercanía de la ciudad capital de Guatemala a las fuentes donde ocurren los sismos.

Se analizaron tres terremotos que han ocurrido en el pasado en Guatemala. Estos terremotos son los ocurridos en 1902, 1995 y 1976. Se decidió analizar sismos pasados para poder evaluar lo que hubiera pasado en lugar de inventar ubicaciones para terremotos. Para estos terremotos se tomó que Guatemala tienen suelos de sedimento y por ende se utilizaron velocidades de 2000 m/s a 4000 m/s. Para cada terremoto se analizará con una velocidad de ondas primarias de 2000 m/s, 3000 m/s y de 4000 m/s. Siendo la velocidad de 2000 m/s el caso menos crítico y las velocidades de 4000 m/s el caso más crítico para los suelos en Guatemala.

A. Sismo de 1995

Información del sismo.

- Epicentro: Latitud 15.301 Norte y Longitud -90.154 Oeste
- Magnitud: 5.3 En la escala Richter
- Profundidad: 10 Km
- Estaciones más próximas: Estación No. 20 que se encuentra a aproximadamente 20.58 Km y la estación del Centro Universitario del Norte USAC que se encuentra a 28.50 Km
- Distancia a la zona 1 de Guatemala: 82.61 Km

Al analizar el sismo con las tres velocidades de onda se obtienen tiempos de anticipación que daría la alarma:

- Para una velocidad de 2000 m/s: 53.96 segundos
- Para una velocidad de 3000 m/s: 34.97 segundos
- Para una velocidad de 4000 m/s: 25.48 segundos

B. Terremoto de 1976

Información del sismo.

- Epicentro: Latitud 15.32 Norte y Longitud -89.10 Oeste
- Magnitud: 7.5 En la escala Richter
- Profundidad: 5 Km
- Estaciones más próximas: Estación No. 23 que se encuentra a aproximadamente 32.29 Km y la estación No.15 que se encuentra a 34.99 Km
- Distancia a la zona 1 de Guatemala: 169.67 Km

Al analizar el sismo con las tres velocidades de onda se obtienen tiempos de anticipación que daría la alarma:

- Para una velocidad de 2000 m/s: 125.77 segundos
- Para una velocidad de 3000 m/s: 82.84 segundos
- Para una velocidad de 4000 m/s: 61.38 segundos

C. Terremoto de 1902

Información del sismo.

- Epicentro: Latitud 14.90 Norte y Longitud -91.50 Oeste
- Magnitud: 7.5 En la escala Richter
- Profundidad: 60 Km
- Estaciones más próximas: Estación del Hospital de San Marcos que se encuentra a aproximadamente 31.45 Km y la estación No.4 que se encuentra a 40.82 Km
- Distancia a la zona 1 de Guatemala: 110.70 Km

Al analizar el sismo con las tres velocidades de onda se obtienen tiempos de anticipación que daría la alarma:

- Para una velocidad de 2000 m/s: 72.02 segundos
- Para una velocidad de 3000 m/s: 47.01 segundos
- Para una velocidad de 4000 m/s: 34.51 segundos

D. Terremoto de 1942

Información del sismo.

- Epicentro: Latitud 13.90 Norte y Longitud -90.80 Oeste
- Magnitud: 8.3 En la escala Richter
- Profundidad: 60 Km
- Estaciones mas próximas: Estación No.25 que se encuentra a aproximadamente 5.93 Km y la estación del Centro Universitario del Occidente USAC que se encuentra a 13.84 Km
- Distancia a la zona 1 de Guatemala: 87.44 Km

Al analizar el sismo con las 3 velocidades de onda se obtienen tiempos de anticipación que daría la alarma:

- Para una velocidad de 2000 m/s: 65.45 segundos
- Para una velocidad de 3000 m/s: 42.64 segundos
- Para una velocidad de 4000 m/s: 31.23 segundos

Para el análisis, de los sismos se realizaron 3 integraciones de cada sismo a diferentes velocidades. La primera velocidad de ondas que se analizó es de 2000 m/s.

Resumen de resultados para una velocidad de 2000 m/s.

Sismo	Distancia (Km)	Tiempo (S)
1995	82.61	53.96
1976	169.67	125.77
1902	110.7	72.02
1942	87.44	65.45

Figura 30. Resultados para velocidades de onda de 2000 m/s

Al correr el análisis para una velocidad de onda primaria de 2000 m/s, la alarma resulta exitosa para 3 de los 4 sismos evaluados. Para que la alarma se considere exitosa esta debe de dar aviso con

60 segundos de anticipación. Para el sismo de 1995 y de 1942, se observa que hay una diferencia de 4.83 km y son 12 segundos de diferencia en el tiempo de emisión de la alerta.

Para el sismo de 1942 el sismógrafo mas lejano se encuentra 13.84 km y para el sismo de 1995 el sismógrafo mas cercano se encuentra a 28.50 km. Se puede observar que la distancia de los sismógrafos al epicentro del sismo tiene gran influencia sobre el tiempo de anticipación con el que se emite la alarma. Esto se puede ver en los mapas presentados en anexos.

Sismo	Distancia (Km)	Tiempo (S)
1995	82.61	34.97
1976	169.67	82.84
1902	110.7	47.01
1942	87.44	42.64

Figura 31. Resultados para velocidades de onda de 3000 m/s

Como se puede observar en la imagen para el caso de la velocidad de ondas de 3000 m/s únicamente para el sismo de 1976 hubiese sido funcional la alarma. Para esta velocidad de ondas ya se requiere de mayor distancia entre el epicentro y el área de análisis y se requiere reducir la distancia de los sismógrafos al epicentro.

Sismo	Distancia (Km)	Tiempo (S)
1995	82.61	25.48
1976	169.67	61.38
1902	110.7	34.51
1942	87.44	31.23

Figura 32. Resultados para velocidades de onda de 4000 m/s

Al igual que en el caso anterior, para las velocidades de ondas primarias de 4000 m/s se tiene una efectividad del 25 por ciento. Es decir de los cuatro sismo únicamente para uno de estos sismos hubiese sido funcional la alarma.

Dentro de los factores que mas afectaron esta la distancia del sismo. Dentro de las recomendaciones del SASMEX, esta que se debe de tener un mínimo de 200 km entre el punto evaluado y el epicentro del sismo. Como se puede observar esto no se cumple en ninguno de los sismos evaluados. (J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018) Con esta velocidad la alarma funciona para el sismo de 1942 con 87.44 km de distancia pero no para el sismo de 1995 con 82.61 km. Lo que se observo es que esto es depende de la distancia de los sismógrafos. La distancia de los sismógrafos y del epicentro del sismo también es un factor importante. Entre mas cerca este el sismógrafo del epicentro, mas rápido se emitirá la alarma. Para este simulacro se evaluaron dos sismógrafos, es decir que para que se emitiera la alarma dos sensores debían percibir el sismo. Si se aumenta la cantidad de sismógrafos y se reduce la distancia entre estos, se podrá aumentar el tiempo de reacción de los sismos, ya que se detecta antes el sismo y se emite la alerta mas rápido.

Otra de las sugerencias del sistema SASMEX es distribuir los sismógrafos en las áreas de riesgo y que estos tengan una separación no mayor a 25 km. (J. E.-A. Gerardo Suarez & *et al*, 2018) En el caso de México es fácil distribuir los sismógrafos, ya que ellos únicamente ven el riesgo sísmico en la zona de subducción por lo que colocan sus sismógrafos cerca de la costa del Pacífico. Por otro lado en Guatemala no es tan sencilla la cosa, Guatemala cuenta con riesgo sísmico en todo su territorio a excepción del Petén, que es el área con menor riesgo. Es por eso que Guatemala tendría que distribuir sus sismógrafos en todo el país.

Donde surge la problemática en Guatemala es en la incertidumbre de donde sucederá el sismo. Como se puede observar en los mapas en el anexo y como se define en el marco teórico, Guatemala se encuentra ubicado sobre 3 placas tectónicas, cuenta con 37 volcanes, 3 de los cuales están activos y por ultimo cuenta con 4 fallas principales. Cada uno de estos elementos representa un riesgo sísmico para Guatemala. Dado estas condiciones para poder cubrir la mayor parte de los sismos en Guatemala habría que colocar una cuadrilla de sismografos a cada 25 km, como recomiendan en el sistema SASMEX. Haciendo esto se lograría reducir la distancia entre el epicentro del sismo y la ubicación del sismógrafo. Si se reduce dicha distancia se reduce el tiempo de activación de la alarma, dando mas tiempo de reacción.

México cuenta con una alarma sísmica funciona. Cuentan con la primera alarma sísmica en el mundo funcional. A diferencia de nosotros México únicamente cuenta con riesgo sísmico en la zona de abducción. Esto les beneficia ya que únicamente deben de ubicar sismógrafos en la costa del Pacífico. Con tan solo ubicar sismógrafos en esta área se encuentran cubiertos ante los sismos.

En el segundo congreso nacional de ingeniería sísmica y geotécnica, presentaron un estudio para la alerta sísmica en Guatemala. En este estudio utilizan una muestra de 3630 sismos.

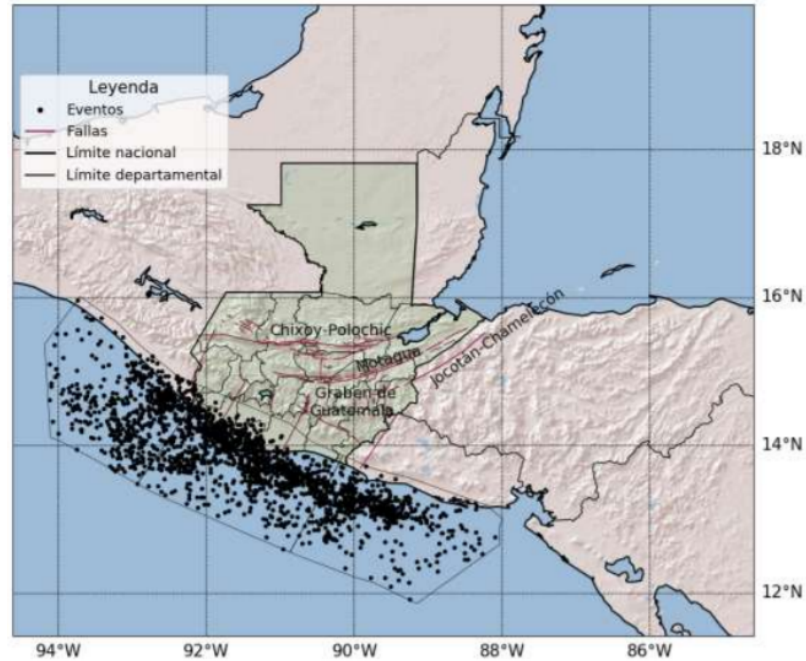


Figura 33. Sismos en el área de subducción

(Ramirez. C, Rubio. G, *et al*, 2021)

Donde dividen en tres áreas la zona de subducción. La primera siendo Subducción oeste que se encuentra mayormente en la costa de México, la segunda siendo subducción central y la tercera siendo subducción este siendo la costa de El Salvador. esta se puede ver en el siguiente mapa.



Figura 34. Divisiones de la zona de subducción

(Ramirez. C, Rubio. G, *et al*, 2021)

Dentro de este estudio se descubrió que los tiempos promedios obtenidos para la subducción oeste son 42.88 s y con una distancia de 250.62 km. Para la subducción centro se tiene una distancia de 119.80 km y un tiempo de 20.93 s. Por último la subducción este con un tiempo 25.46 s y una distancia de 169.02 km.

La gran variación en tiempo de este estudio junto con el realizado en este trabajo puede darse al algoritmo utilizado para la emisión de la alarma. Se debe de evaluar otras variables como las velocidades de ondas utilizadas. Llama la atención que a pesar de superar los 200 km de distancia la alarma sísmica no les cumpla, ya que esta es la recomendada por el sistema sasmex.

XII. CONCLUSIONES

- Guatemala cuenta con un alto riesgo sísmico dado a su geografía. Factores como su ubicación sobre tres placas tectónicas (placa cocos, placa del caribe y placa de Norte América) , el hecho de contar con cuatro fallas geológicas dentro de su área territorial, siendo parte del anillo de fuego, contando con 37 volcanes de los cuales tres están activos, causan que Guatemala se encuentre en constante riesgo sísmico.
- El peligro sísmico en todo el territorio guatemalteco representa la mayor desventaja para Guatemala con la alarma sísmica. Esto ocasiona que haya que distribuir sismógrafos en todo el territorio guatemalteco, y si se desea cumplir con la recomendación del sistema SASMEX se deben colocar en forma de una cuadrilla de 25km x 25km, elevando el costo del sistema.
- Se desarrolló una hoja de cálculo para estimar el tiempo de anticipación con el que se hubiese emitido la alarma para cuatro sismos históricos. Para el cálculo del tiempo se realizaron tres integraciones, la primera integración se hace con una velocidad de ondas primarias de 2000 m/s, la segunda integración se llevó a cabo con una velocidad de onda primaria de 3000 m/s y por último se utiliza una velocidad de onda de 4000 m/s. El cálculo del tiempo se realiza utilizando el algoritmo de 3 seconds of the P-wave coda. Guatemala no cumple con las recomendaciones del sistema SASMEX, siendo estas que los sismógrafos se encuentren a una distancia no mayor de 25 km entre ellos y que haya una distancia aproximada de 200 km entre el epicentro del sismo y el área para el cual la alarma se plantea. Los resultados obtenidos demuestran que la alarma sísmica funciona para un tiempo de reacción menor a 60 segundos. Con las constantes mejoras tecnológicas este tiempo se puede lograr aumentar.

XIII. RECOMENDACIONES

- A estudiantes que deseen retomar el tema se recomienda realizar el cálculo de las velocidades sísmicas tomando en cuenta factores del suelo y considerando el ángulo con el que viajan las ondas a través del suelo.
- A los estudiantes que deseen encontrar las ventajas de la alarma sísmica, se les recomienda evaluar el impacto psicológico que esta tendría sobre las personas a la hora de un terremoto.
- A entidades privadas, tales como universidades que cuentan con departamentos de investigación, se les recomienda participar y trabajar con entidades gubernamentales en la elaboración de la alerta sísmica.
- A instituciones gubernamentales y estudiantes que deseen retomar el tema, se recomienda simular sismos en distintas partes del país. De esta forma podrán evaluar la alarma sísmica ante diferentes escenarios.

A las instituciones gubernamentales se les recomienda evaluar la separación de los sismógrafos. Se recomienda evaluar si reduciendo la separación de los sismógrafos se obtienen mejores resultados con la alarma.
- A instituciones gubernamentales de recopilación de datos, se les recomienda analizar la información y evaluar los puntos de mayor recurrencia sísmica.
- A instituciones gubernamentales, se les recomienda crear procedimientos de acción que funcionen de la mano con la alerta sísmica. Así mismo se les recomienda crear planes de acción en caso la alarma no se emita y empiece el movimiento. Estos procedimientos son recomendados para escuelas, hospitales, comunidades en riesgo y otras áreas públicas.
- A instituciones gubernamentales se le recomienda investigar otras alarmas sísmicas funcionales. En especial se recomienda analizar la alarma sísmica de Japón, ya que esté cuenta con condiciones similares al estar ubicado sobre tres placas tectónicas.
- A instituciones privadas, se les recomienda capacitar al personal y tener un plan de acción con y sin alarma sísmica. De esta forma si se emite la alarma se sabe qué hacer y si inicia el movimiento de igual forma se sabe cómo reaccionar.
- A entidades privadas, tales como universidades que cuentan con departamentos de investigación, se les recomienda participar y trabajar con entidades gubernamentales en la elaboración de la alerta sísmica.
- A entidades privadas y gubernamentales se les recomienda evaluar si la alarma sísmica sería funcional en otras ciudades de Guatemala y no solo en la capital.

XIV. BIBLIOGRAFÍA

- Agies. (2018). *DEMANDAS ESTRUCTURALES Y CONDICIONES DE SITIO. NORMAS DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL PARA GUATEMALA*, 4-1, 4-2.
- Bolt, B. (1981). *Terremotos*. Reverté. <https://books.google.com.gt/books?id=KmHP0lGeQWQC>
- C, J. & de México. Instituto de Geofísica, U. N. A. (1994). *Terremotos y ondas sísmicas*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica. <https://books.google.com.gt/books?id=dImOiZYrpgAC>
- Condie, K. (2015). *Earth as an Evolving Planetary System*. Elsevier Science. <https://books.google.com.gt/books?id=6-X3CAAQBAJ>
- CONRED. (2021). <https://conred.gob.gt/mision-y-vision-2/>. CONRED.
- Cuenca, E. A.(1998). *Evaluación de la alarma sísmica para la ciudad de México desde una perspectiva sociológica*, Consultado en 1998, desde https://5de2b439-c898-4c01-ac7a-df2308207fd6.filesusr.com/ugd/e9f3cc_fb8520a986c347b3bb25ccc565ff6dd3.pdf. SAS-MEX socio
- De Sociedades, A. & Herrero, L. (2016). *Hacia ciudades y territorios inteligentes, resilientes y sostenibles*. Bubok Publishing. <https://books.google.com.gt/books?id=OoK7DQAAQBAJ>
- Eduardo Reinoso, M. A. (2009). Criterios para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas usando como ejemplo el caso de terreno firme de la Ciudad de Mexico. Consultado en 2021, desde http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2009000200001. Mexico
- EIRD. (2008). *Hacia la gestión de riesgo de desastre natural por tsunamis en América Central*. Consultado en 2008, desde https://www.eird.org/esp/revista/No_15_2008/art9.html. foto placas
- Espina, C. (2020). CEPAL: *Pobreza crece dos por ciento en Guatemala*. Consultado en 2020, desde: <https://elperiodico.com.gt/noticias/economia/2020/05/13/cepal-pobreza-crece-dos-porciento-en-guatemala>. Pobreza en Guatemala
- Gerardo Suarez, A. C., J.M Espinosa-Aranda. (2018a). *An Earthquake Early Warning Algorithm based on the P-Wave Energy Released in the ts-tp Interval*. Consultado en 2018, desde https://5de2b439-c898-4c01-ac7a-df2308207fd6.filesusr.com/ugd/e9f3cc_9d09e7de8d694adc806fb382689a99de.pdf. pwave
- Gerardo Suarez, A. C., J.M Espinosa-Aranda. (2018b). *An Fast Earthquake Early Warning Algorithm based on the First 3 s of the P-Wave Coda*. Consultado en 2018, desde https://5de2b439-c898-4c01-ac7a-df2308207fd6.filesusr.com/ugd/e9f3cc_998ab28f84fe4621a67ee1ac3d76677d.pdf. algp3
- Gerardo Suarez, J. E.-A. & ET.AL. (2018). *A Dedicated Seismic Early Warning Network: The Mexican Seismic Alert System (SASMEX)*. Consultado en 2018, desde https://5de2b439-c898-4c01-ac7a-df2308207fd6.filesusr.com/ugd/e9f3cc_f890539e1ee243a5bf90a88373521735.pdf. SASMEX
- IFRC. (2006). *Erupciones Volcanicas*. Consultado en 2006, desde <https://www.ifrc.org/es/introduccion/disaster-management/sobre-desastres/definicion--de-peligro/erupciones-volcanicas/>. erupciones

- INE. (2018). *Indicadores de gestión de riesgo y desastres naturales. Consultado en 2018*, desde <https://www.ine.gob.gt/ine/estadisticas/bases-de-datos/estadisticas-ambientales/>. Sismos, Guatemala
- INSIVUHEH. (2021). *MARCO TECTONICO PARA GUATEMALA*. Consultado en 2021, desde <https://insivumeh.gob.gt/destacados-portada/marco-tectonico-para-guatemala/>. Tectonica de placas
- INSIVUMEH. (2000). <http://www.insivumeh.gob.gt/geofisica/programa.htm>. Volcanes.
- INSIVUMEH. (2016). <http://www.insivumeh.gob.gt/folletos/folletosismo.pdf>. folletosismo.
- INSIVUMEH. (2021). <https://insivumeh.gob.gt/institucional/quienes-somos/>. INSIVUMEH.
- Llano, J. (1975). *Mecánica de suelos*. Editores Técnicos Asociados. https://books.google.com.gt/books?id=oQFZRKlix%5C_EC
- Mexico. (2020). *Evolución de la tectónica en México*. Consultado en 2020, desde <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Evolucion-tectonica-Mexico.html>. tectonica en Mexico
- Monzon, H. (2018). *TRANSCURRENCIA Y FALLAS SECUNDARIAS al centro del país*. Consultado en 2021, desde <http://docplayer.es/90538934-Sobre-la-historia-sismica-de-guatemala.html>. Fallas Guatemala
- Moratalla, N. (2008). *Biología y Geología 1º Bachillerato*. Editorial Editex. <https://books.google.com.gt/books?id=96CwyLCCv18C>
- PNUD. (2021). *La pobreza, reflejo de la exclusión y la inequidad*. Consultado en 2021, desde https://www.gt.undp.org/content/guatemala/es/home/ourwork/povertyreduction/in_depth.html. Pobreza
- Posada, A. J. M.(2013). *SELECCIÓN Y ADECUACIÓN DE ACELEROGRAMAS SÍSMICOS PARA ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS CON EJEMPLOS PARA EL VALLE DE GUATEMALA*. Consultado en 2021, desde http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3607_C.pdf. Acelerograma
- READY. (2020). *Terremotos*. Consultado en 2020, desde <https://www.ready.gov/es/terremotos>. Terremotos
- RENAC. (2021). *¿Qué es un acelerógrafo?* Consultado en 2021, desde <https://www.igepn.edu.ec/red-nacional-de-acelerografos>. Acelerógrafo
- RSN. (2019). *¿Qué es una falla geológica?* Consultado en 2019, desde <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/geologia/244-que-es-una-falla#>. fallas
- SNGRE. (2020). *Deslaves*. Consultado en 2020, desde <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/deslaves/#.deslaves>. deslaves
- Tarback, E. L. (2014). *¿Qué son el hipocentro y el epicentro?* Consultado en 2020, desde <https://rsn.ucr.ac.cr/documentos/educativos/sismologia/2329-que-son-el-hipocentro-y-el-epicentro>. Epicentro
- Villalaz, C. (2005). *Mecánica de suelos y cimentaciones / Mechanics of Grounds and Laying of Foundations*. Limusa. <https://books.google.com.gt/books?id=Db2SQbBHVPQC>

XV. ANEXOS

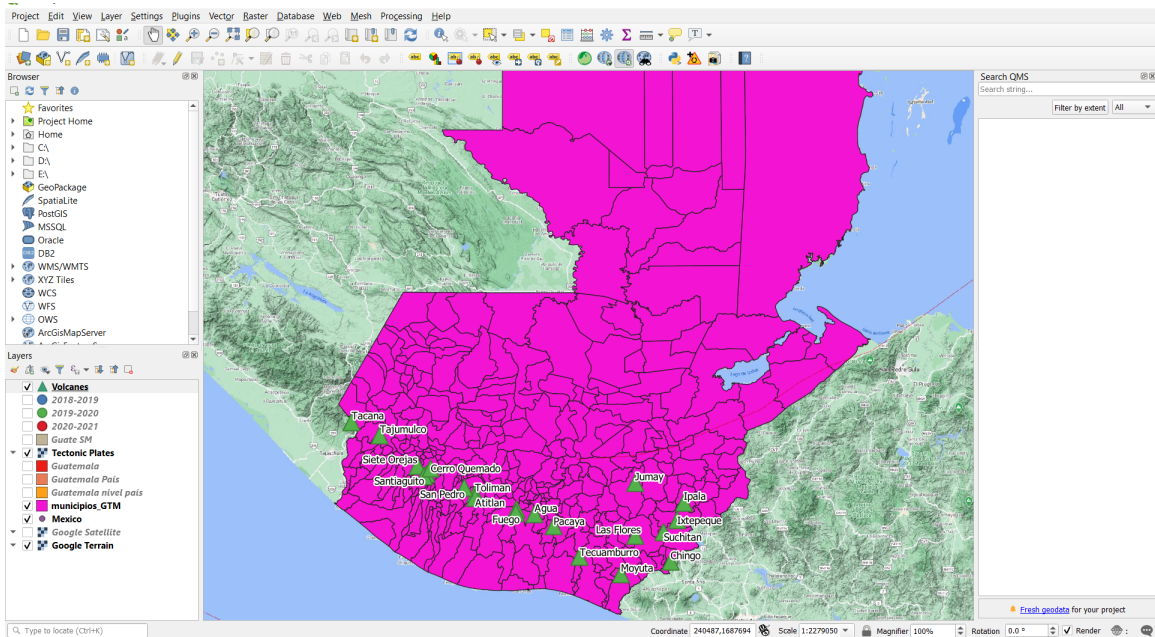


Figura 35. Modelo Qgis 1

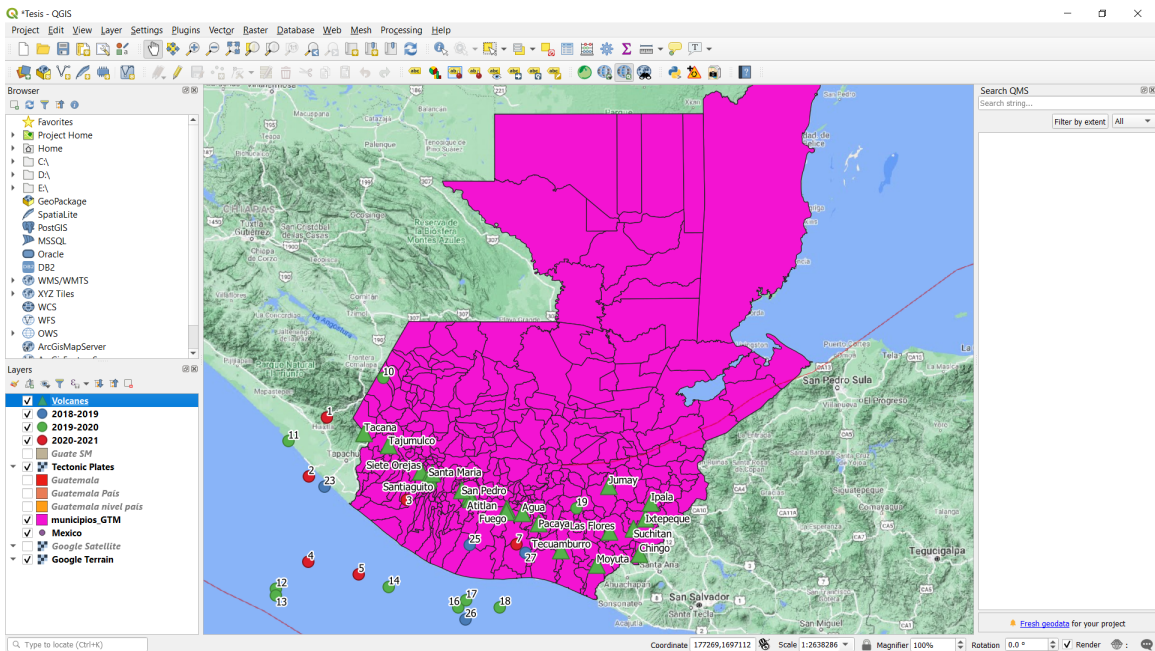


Figura 36. Modelo Qgis 2

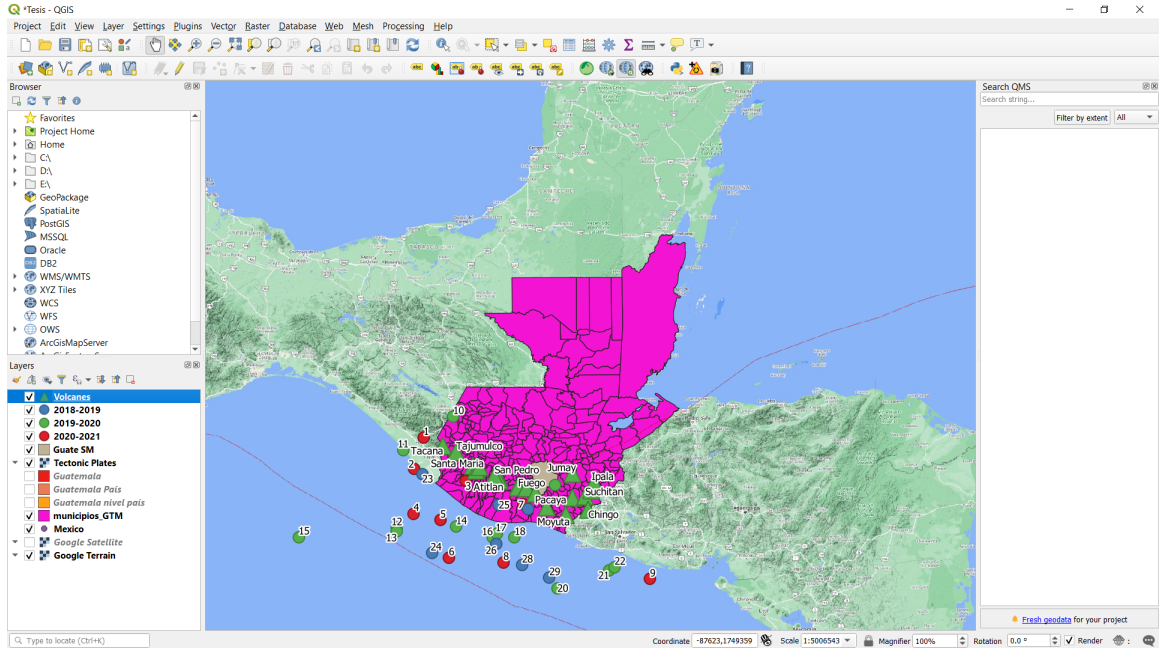


Figura 37. Modelo Qgis 3

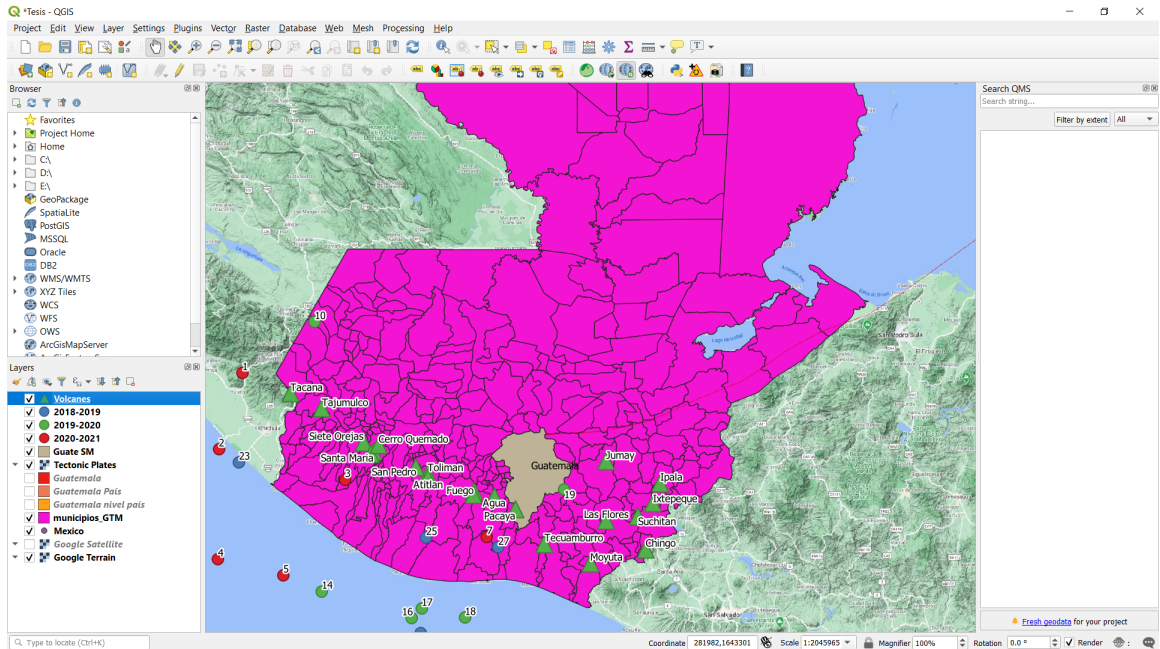


Figura 38. Modelo Qgis 4

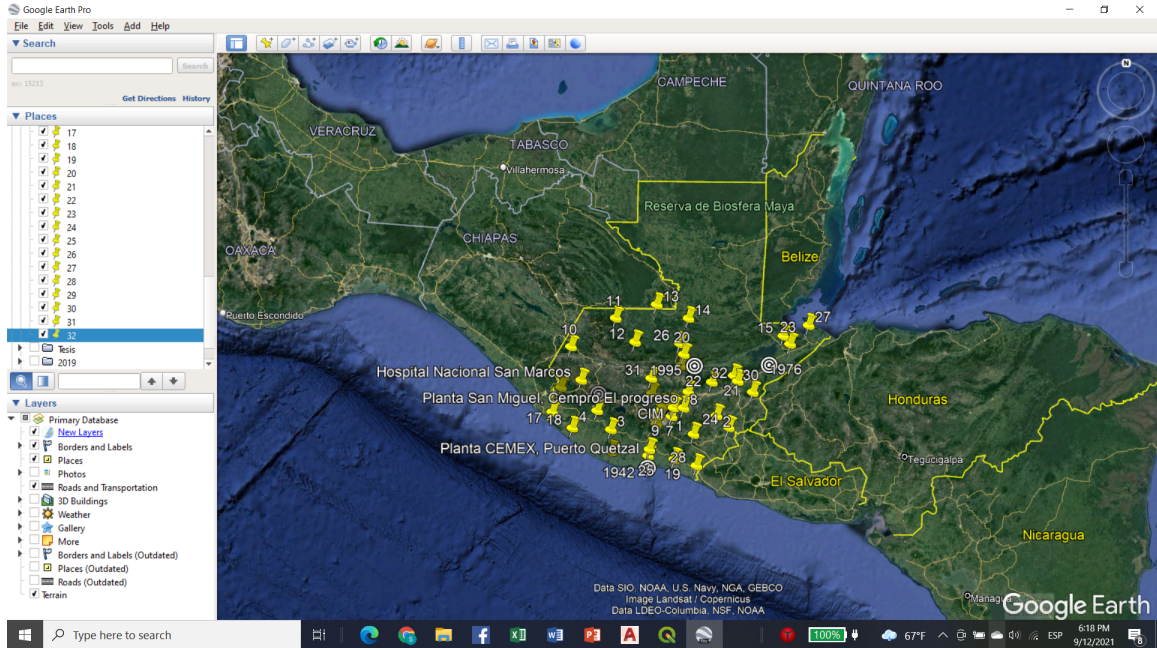


Figura 39. Google Earth

Hoja de cálculo tiempo de sismos utilizando el algoritmo 3 seconds of the p wave coda

Para $V=2000$ m/s

Sismo de 1995

$D_{20} := 20.58 \text{ km}$	Distancia a el sismógrafo No.20
$D_{CUNU} := 28.50 \text{ km}$	Distancia al sismógrafo del Centro Universitario del Norte USAC.
$V_p := 2000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.
$V_s := V_p \cdot 0.58 \approx 1160 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{20} = 20.58 \text{ km}$$

$$D_2 := D_{CUNU} = 28.5 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 10.29 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.20 en el mapa.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 14.25 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación del Centro Universitario del Norte USAC.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 14.25 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analisis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analisis} = 17.25 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 82.61 \text{ km}$$

Distancia hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 71.216 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 53.966 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Sismo de 1976

$$D_{23} := 32.29 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo No.23

$$D_{15} := 34.99 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo No.15

$$V_p := 2000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 \pm 160 \frac{\text{---}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{23} = 32.29 \text{ km}$$

$$D_2 := D_{15} = 34.99 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 16.145 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.23 en el mapa.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 17.495 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.15 en el mapa.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 17.495 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analysis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analysis}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 169.67 \text{ km}$$

Distancia del epicentro del sismo hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 146.267 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 125.772 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Sismo de 1902

$$D_{HSM} := 31.45 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo en el Hospital San Marcos

$$D_4 := 40.82 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo No.4

$$V_p := 2000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 \approx 1160 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{HSM} = 31.45 \text{ km}$$

$$D_2 := D_4 = 40.82 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 15.725 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación del Hospital San Marcos.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 20.41 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.4 en el mapa.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 20.41 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analisis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analisis} = 23.41 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 110.70 \text{ km}$$

Distancia hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 95.431 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 72.021 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Sismo de 1942

$$D_{25} := 5.93 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo No.20

$$D_{CUOU} := 13.84 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo del Centro Universitario de Occidente USAC.

$$V_p := 2000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 \pm 160 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{25} = 5.93 \text{ km}$$

$$D_2 := D_{CUOU} = 13.84 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 2.965 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.25 en el mapa.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 6.92 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación del Centro Universitario de Occidente USAC.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 6.92 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analisis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analisis} = 9.92 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 87.44 \text{ km}$$

Distancia hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 75.379 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 65.459 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Para $V=3000 \text{ m/s}$

Sismo de 1995

$$D_{20} := 20.58 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo No.20

$$D_{CUNU} := 28.50 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo del Centro Universitario del Norte USAC.

$$V_p := 3000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 \approx 1740 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{20} = 20.58 \text{ km}$$

$$D_2 := D_{CUNU} = 28.5 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 6.86 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.20 en el mapa.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 9.5 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación del Centro Universitario del Norte USAC.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 9.5 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analisis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analisis} = 12.5 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 82.61 \text{ km}$$

Distancia hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 47.477 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 34.977 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Sismo de 1976

$$D_{23} := 32.29 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo No.20

$$D_{15} := 34.99 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo No.15

$$V_p := 3000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 \approx 1740 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{23} = 32.29 \text{ km}$$

$$D_2 := D_{15} = 34.99 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 10.763 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.23 en el mapa.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 11.663 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.15 en el mapa.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 11.663 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analisis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analisis} = 14.666 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 169.67 \text{ km}$$

Distancia del epicentro del sismo hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 97.511 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 82.848 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Sismo de 1902

$$D_{HSM} := 31.45 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo en el Hospital San Marcos

$$D_4 := 40.82 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo No.4

$$V_p := 3000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 \approx 1740 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{HSM} = 31.45 \text{ km}$$

$$D_2 := D_4 = 40.82 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 10.483 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación del Hospital San Marcos.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 13.607 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.4 en el mapa.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 13.607 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analysis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analisis} = 16.607 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 110.70 \text{ km}$$

Distancia hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 63.621 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 47.014 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Sismo de 1942

$$D_{25} := 5.93 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo No.20

$$D_{CUOU} := 13.84 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo del Centro Universitario de Occidente USAC.

$$V_p := 3000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 \approx 740 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{25} = 5.93 \text{ km}$$

$$D_2 := D_{CUOU} = 13.84 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 1.977 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.25 en el mapa.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 4.613 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación del Centro Universitario de Occidente USAC.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 4.613 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analisis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analisis} = 7.613 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 87.44 \text{ km}$$

Distancia hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 50.253 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 42.64 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Para $V=4000$ m/s

Sismo de 1995

$$D_{20} := 20.58 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo No.20

$$D_{CUNU} := 28.50 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo del Centro Universitario del Norte USAC.

$$V_p := 4000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 = 2320 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{20} = 20.58 \text{ km}$$

$$D_2 := D_{CUNU} = 28.5 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 5.145 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.20 en el mapa.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 7.125 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación del Centro Universitario del Norte USAC.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 7.125 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analysis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analysis} = 10.125 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 82.61 \text{ km}$$

Distancia hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 35.608 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 25.483 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Sismo de 1976

$$D_{23} := 32.29 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo No.20

$$D_{15} := 34.99 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo No.15

$$V_p := 4000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 = 2320 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{23} = 32.29 \text{ km}$$

$$D_2 := D_{15} = 34.99 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 8.073 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.23 en el mapa.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 8.748 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.15 en el mapa.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 8.748 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analisis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_{total} := 17 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 169.67 \text{ km}$$

Distancia del epicentro del sismo hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 73.134 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 61.386 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Sismo de 1902

$$D_{HSM} := 31.45 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo en el Hospital San Marcos

$$D_4 := 40.82 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo No.4

$$V_p := 4000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 = 2320 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{HSM} = 31.45 \text{ km}$$

$$D_2 := D_4 = 40.82 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 7.863 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación del Hospital San Marcos.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 10.205 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.4 en el mapa.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 10.205 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analisis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analisis} = 13.205 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 110.70 \text{ km}$$

Distancia hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 47.716 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 34.511 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.

Sismo de 1942

$$D_{25} := 5.93 \text{ km}$$

Distancia a el sismógrafo No.25

$$D_{CUOU} := 13.84 \text{ km}$$

Distancia al sismógrafo del Centro Universitario de Occidente USAC.

$$V_p := 4000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad promedio en suelos sólidos de las ondas primarias.

$$V_s := V_p \cdot 0.58 = 2320 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Velocidad de las ondas secundarias sobre suelos sólidos

A. Cálculo general del tiempo en que tardan las ondas primarias en llegar a la estación

$$D_1 := D_{25} = 5.93 \text{ km}$$

$$D_2 := D_{CUOU} = 13.84 \text{ km}$$

$$T = \frac{D}{V}$$

El tiempo es igual a la distancia partido la velocidad de la onda.

$$T_1 := \frac{D_1}{V_p} = 1.483 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación N.20 en el mapa.

$$T_2 := \frac{D_2}{V_p} = 3.46 \text{ s}$$

Tiempo en que las ondas primarias llegan a la estación del Centro Universitario del Occidente USAC.

$$T_{sismo} := \max(T_1, T_2) = 3.46 \text{ s}$$

Tiempo en que se inicia el proceso para emitir la alarma sísmica.

$$T_{analisis} := 3 \text{ s}$$

Tiempo en que tarda en correr el algoritmo.

$$T_t := T_{sismo} + T_{analisis} = 6.46 \text{ s}$$

Cálculo del tiempo en que el sismo sería perceptible en la capital.

$$D := 87.44 \text{ km}$$

Distancia hasta el centro de la ciudad.

$$T_s := \frac{D}{V_s} = 37.69 \text{ s}$$

Tiempo en que tardan las ondas secundarias en llegar hasta la zona 1 de Guatemala.

$$T := T_s - T_t = 31.23 \text{ s}$$

Tiempo de reacción con el que contaría la gente luego de la alarma y antes del sismo.