



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Estructuras

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA 2 DE LA CIUDAD DE
QUETZALTENANGO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE NAKAMURA**

Ing. Jeovani Abel Flores Díaz

Asesorado por el Msc. Ing. José Humberto Rosal Paz

Guatemala, agosto de 2022

UNIVERSIDAD SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA 2 DE LA CIUDAD DE QUETZALTENANGO,
UTILIZANDO EL MÉTODO DE NAKAMURA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JEOVANI ABEL FLORES DÍAZ

ASESORADO POR EL MSC. ING. JOSÉ HUMBERTO ROSAL PAZ

AL CONFERÍRSE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ESTRUCTURAS

GUATEMALA, AGOSTO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martinez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Francisco Eduardo Arrecis Sosa
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

**MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA 2 DE LA CIUDAD DE QUETZALTENANGO,
UTILIZANDO EL MÉTODO DE NAKAMURA**

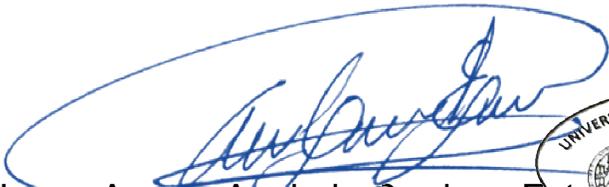
Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 21 de junio del 2021.

Ing. Jeovani Abel Flores Díaz

LNG.DECANATO.OI.562.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA 2 DE LA CIUDAD DE QUETZALTENANGO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE NAKAMURA**, presentado por: **Jeovani Abel Flores Díaz**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Estructuras después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, agosto de 2022

AACE/gaac



Guatemala, agosto de 2022

LNG.EEP.OI.562.2022

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA 2 DE LA CIUDAD DE QUETZALTENANGO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE NAKAMURA”

presentado por **Jeovani Abel Flores Díaz** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Estructuras**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

**Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería**





Guatemala 10 de noviembre 2020.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

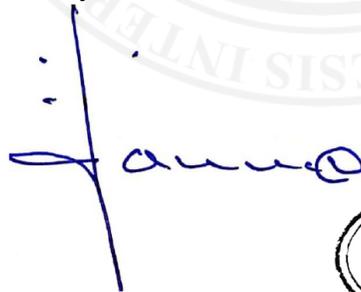
M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el Informe Final y Artículo Científico titulado : **“MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA 2 DE LA CIUDAD DE QUETZALTENANGO, UTILIZANDO EL MÉTODO DE NAKAMURA”** del estudiante **Jeovani Abel Flores Díaz** quien se identifica con número de carné **100016720** del programa de **Maestría en Estructuras**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,



MSc. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador
Maestría en Estructuras
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 05 de Noviembre 2021

Msc. Ing. Edgar Álvarez Cotí
Director, Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Por este medio informo a usted, que, como ASESOR, he revisado y aprobado la siguiente **TÉSIS DE GRADUACIÓN** del (la) alumno (a):

Carné: 100016720
Alumno: Jeovani Abel Flores Díaz
Maestría: Estructuras
Título de la Investigación: Microzonificación Sísmica de la Zona 2 de la Ciudad de Quetzaltenango, Utilizando el Método de Nakamura.

En este sentido, extendiendo el Visto Bueno correspondiente, para el cumplimiento de requisitos de la Escuela de Estudios de Postgrado, de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Asimismo, se hace constar que la asesoría se dio a cabo Ad Honorem, por lo que el estudiante queda exonerado del pago de los honorarios profesionales de asesoría de dicha tesis de graduación.

Sin otro particular


Msc. José Humberto Rosal Paz
Asesor
José Humberto Rosal Paz
INGENIERO CIVIL
MSc. INGENIERÍA ESTRUCTURAL
COLEGIADO No. 5889

ACTO QUE DEDICO A:

Dios todopoderoso	Por darme luz, vida y fuerza espiritual y por permitirme culminar mi maestría.
Mis padres	Genaro Flores y Sofía Díaz, por sus sabios consejos y enseñanzas.
Mis hermanos	Rudy, Nery y Mynor Flores, con amor fraternal.
Mi esposa	Alba Morales, por su confianza en mí y su apoyo incondicional con todo el amor del mundo.
A mis hijas	Cindy, Keily y Emily Flores, por su ternura y sencillez.
A mi familia en general	Por su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser la prestigiosa casa de estudios, por haberme dado la oportunidad de formarme como máster en estructuras durante la etapa de desarrollo.

Facultad de Ingeniería

Por haberme dado la oportunidad de continuar con mis metas de aprendizaje, especialmente de formarme como profesional en el ámbito de la ingeniería.

Asesor

Msc. Ing. José Rosal, quién me brindo desinteresadamente su colaboración.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. GENERALIDADES	1
1.1. Ubicación y demografía de Quetzaltenango.....	1
1.2. Ubicación de la zona 2 Quetzaltenango	1
1.3. Riesgo sísmico	1
1.4. Sismología.....	3
1.5. Escala de intensidad y magnitud	3
2. ZONA SÍSMICA.....	5
2.1. Origen de los sismos en Guatemala.....	5
2.2. Zonas sismogénicas de Guatemala.....	6
2.3. Desplazamiento de placas tectónicas	11
2.4. Ruido sismo ambiental	12
2.5. Microsismos y microtemblores	12
2.6. Rigidez, resistencia y ductilidad estructural	13

2.7.	Transformada de Fourier	13
2.8.	Función de transferencia.....	14
2.9.	Método de Nakamura.....	14
2.10.	Microzonificación.....	15
2.11.	Microzonificación sísmica.....	16
2.12.	Norma estructural para Guatemala NSE 2.1	17
3.	MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA ZONA 2.....	19
3.1.	Área de estudio	19
3.2.	Características del equipo utilizado.....	22
3.3.	Funcionamiento de la instrumentación sísmica.....	24
3.4.	Metodología de la razón espectral	28
3.5.	Procesamiento razón espectral por estación H/V.....	33
3.6.	Geoposicionamiento de las frecuencias promedios	44
3.7.	Mapa de microzonificación sísmica de la zona 2	46
3.8.	Curvas de razón espectral H/V promedio.....	48
3.9.	Curvas de frecuencias bajas	48
3.10.	Curvas de frecuencias medias	49
3.11.	Velocidad de onda de corte frecuencias bajas.....	50
3.12.	Velocidad de onda de corte frecuencias medias.....	53
3.13.	Clasificación de tipo de suelo NSE 2.1.....	56
3.14.	Espectros de respuesta y diseño frecuencias bajas.....	57
3.15.	Espectros de respuesta y diseño frecuencias medias.....	62
3.16.	Estudios geotécnicos del área de estudio	63

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	65
CONCLUSIONES	69
RECOMENDACIONES.....	73
REFERENCIAS	75
APÉNDICES	83
ANEXOS.....	93

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Área de estudio de la zona 2 de Quetzaltenango	2
2.	Mapa de placas tectónicas.....	6
3.	Mapa de zona de subducción	7
4.	Mapa zona de transurrencia.....	9
5.	Mapa de las fallas secundarias	10
6.	Tipificación de suelo.....	17
7.	Mapa de la zona 2 de Quetzaltenango.....	20
8.	Mapa de ubicación de las estaciones de la zona 2	21
9.	Acelerógrafo Altus Kinemetricks modelo K2 Serial 851	24
10.	Acelerógrafo indicando la orientación de la brújula.....	26
11.	Acelerógrafo E12 segunda calle y séptima avenida zona 2	27
12.	Acelerógrafo E22 segunda avenida y catorce calle zona 2.....	28
13.	Señal estable y señal adicional	29
14.	Señal estable	30
15.	Degtra señal estable y el espectro de Fourier.....	31
16.	El programa Degtra razón espectral de N-S/V	32
17.	Degtra razón espectral de E-O/V	33
18.	Gráfica espectral (H/V) estación E22 frecuencia número 74.....	40
19.	Mapa de la microzonificación zona 2 frecuencia natural.....	47
20.	Gráfica de curvas promedio de frecuencias bajas	49
21.	Grafica de curvas promedio de frecuencias medias.....	50
22.	Gráfica de la desviación típica de las frecuencias bajas	51
23.	Gráfica de velocidad de onda de corte frecuencias bajas	52

24.	Gráfica de la desviación típica de las frecuencias medias.....	54
25.	Gráfica de velocidad de onda de corte frecuencias medias.....	55
26.	Gráfica de sismo real Nahanni, 1985, Mw. 6.9	58
27.	Gráfica de sismo real Retalhuleu, 27/09/2020, M 5.5	59
28.	Gráfica de espectros frecuencias bajas	60
29.	Gráfica de espectros frecuencias medias	63

TABLAS

I.	Fallas zona subducción en Guatemala.....	7
II.	Fallas zona de transcurrencia en Guatemala.....	9
III.	Fallas secundarias en Guatemala.....	11
IV.	Espectral (H/V) estación E22 frecuencia número 74	34
V.	Estación con tres frecuencias y promedio.....	41
VI.	Coordenadas UTM en cada estación.....	44
VII.	Perfil de velocidad de onda de corte de frecuencia bajas	53
VIII.	Perfil de velocidad de onda de corte de frecuencias medias	56
IX.	Clasificación del tipo de suelo frecuencias bajas y medias	57
X.	Espectro AGIES municipio de Quetzaltenango.....	61
XI.	Perforación con barreno tubular.....	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración de la gravedad
Cm/año	Centímetro por año
Mw	Escala de magnitud de momento
Ms	Escala de magnitud de ondas superficiales
MM	Escala intensidad Mercalli modificada
E-O	Este-Oeste
F	Frecuencia natural
Hz	Hertz
HVSR	Horizontal vertical spectral ratio (Saldivia)
Km	Kilómetro
Km²	Kilómetros cuadrados
M/s	Metros por segundo
Msnm	Metros sobre el nivel del mar
N-S	Norte-Sur
T	Período
H/V	Razón espectral entre la horizontal y vertical
UTM	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator
Vs30	Velocidad de onda de corte a 30 metros de profundidad

GLOSARIO

Acelerógrafo	Es un instrumento que registra la aceleración sísmica, desplazamiento y velocidad del suelo.
AGIES	Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica.
Degtra	Es un programa para el procesamiento de las señales ambientales para obtener la función de Fourier y la función de transferencia.
Dinver/Geopsy	Es un programa que determina las velocidades de onda de corte en función de las frecuencias y densidad del suelo.
Falla Geológica	Son fracturas que se tiene en la corteza terrestre en la cual se mueven los bloques rocosos, se le conoce como desplazamiento.
Microzonificación	La microzonificación sísmica permite establecer zonas de suelos de comportamiento similar ante un sísmico.
NSE	Normas de Seguridad Estructural para Guatemala.
PGA	Aceleración pico del suelo.

Subducción

Proceso por el cual una placa oceánica se hunde bajo una placa continental.

RESUMEN

Guatemala es un país sísmico debido a que se encuentra entre tres placas tectónicas que son: la placa de Norteamérica, la placa del Caribe y la placa de Cocos. Adicionalmente, el país cuenta con una cadena volcánica que provoca que Guatemala sea susceptible a sismos destructivos.

La presente tesis consistió en un estudio sísmico, que busca determinar la microzonificación sísmica de la zona 2 de la ciudad de Quetzaltenango, para analizar los suelos de menor y mayor riesgo, en la cual se efectuó un mapa de frecuencias para clasificar el tipo de suelo. El método que se utilizó para esta investigación es HVSR o Razón Espectral H/V, conocido como método de Nakamura.

Se usó un acelerógrafo triaxial, para recabar la información sobre las señales compuestas de las vibraciones ambientales del suelo y definir la frecuencia natural del suelo y la amplitud máxima, en cada punto de relevancia en la intersección de las calles y avenidas de la zona de 2 Quetzaltenango.

Como resultado del estudio se hallaron las frecuencias naturales del suelo que presenta una distribución homogénea del lugar con valores de frecuencia bajas entre 1 Hertz a 2.5 Hertz, dando como resultado un valor de frecuencias bajas promedio de 1.61 Hertz y con valores de frecuencias medias entre 2.5 Hertz a 5.5 Hertz, dando como resultado un valor de frecuencias medias promedio de 3.81 Hertz.

Asimismo, para las frecuencias bajas se tiene una velocidad de onda de corte menor a 185 m/s con una clase de suelo tipo E y el suelo se caracteriza por ser suave, y en las frecuencias medias se tiene una velocidad de onda de corte de 470 m/s con una clase de suelo tipo C, y el suelo se caracteriza por ser denso o roca suave.

Por otra parte, se tiene la información de estudios geotécnicos, en ciertas áreas de la zona 2, reflejando como resultado suelos críticos, tal es el caso, de suelos orgánicos, suelos altamente saturados y suelos limo arcillosos altamente elastocompresibles.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe incertidumbre sobre la respuesta del suelo ante un evento sísmico, dado que no existe información sobre las características idóneas de su resistencia, dando como resultado un asentamiento sísmico, una falla repentina en el suelo, hundimientos y daños en las construcciones.

La zona 2 de la ciudad Quetzaltenango está sentada en una región con presencia de humedad, estudios hidrológicos indican que dicha humedad se ha mantenido a lo largo del tiempo. Esta situación, hasta la fecha, sigue dando inestabilidad a los suelos, provocando un efecto de sitio para un evento sísmico, proporcionando como resultado asentamiento y daños en las construcciones.

Estudios geológicos indican que en la antigüedad existió un gran lago que cubría el centro histórico y el barrio la Ciénaga, en la actual zona 2, de la ciudad de Quetzaltenango; condición que forma parte de la situación problemática del tipo de suelo sobre el que se asienta esa zona de la ciudad actualmente. Esta zona se encuentra en el punto más bajo del municipio de Quetzaltenango, además se observa que, los suelos a poca profundidad contienen presencia de agua, por lo que se considera una zona de elevada humedad. Debido a la presencia de depósitos aluviales se da el fenómeno de efecto de sitio para un evento sísmico, ya que estos suelos húmedos contienen algunos estratos materiales de limo, arcilla, arena y piedra.

Por lo anterior surgen las siguientes preguntas:

- Formulación del problema

- Pregunta central
 - ¿Cuál es la respuesta del suelo ante un evento sísmico en la zona 2 de la ciudad de Quetzaltenango?

- Preguntas auxiliares
 - ¿Qué características tiene el suelo de la zona 2 de la ciudad de Quetzaltenango?
 - ¿Cuáles son los lugares de menor a mayor riesgo, para una planificación urbana?
 - ¿Cuál es la frecuencia natural del suelo de la zona 2 de la ciudad de Quetzaltenango?
 - ¿Cuál es el modelo de velocidad de ondas de corte para establecer el perfil del suelo a través de la clasificación de las normas de seguridad de Guatemala?

- Delimitación del problema

La presente investigación es temporal, en virtud de que se realizó durante los meses de mayo a diciembre 2021, se cataloga espacial por realizarse en un área de 8.6 kilómetros cuadrados. La delimitación teórica del presente estudio se basa en la aplicación de señales sísmicas, aplicando la transformada de Fourier, correlacionada con el método de Nakamura.

HIPÓTESIS

La frecuencia natural del suelo, medido a través de la velocidad de onda de corte, se encuentra dentro de los parámetros de la clasificación de los suelos tipo F y suelos tipo E, de acuerdo a lo especificado según NSE 2.1, de la norma (AGIES, 2018).

OBJETIVOS

- General

Realizar un estudio de microzonificación sísmica, por medio del método de Nakamura, para determinar la respuesta del suelo ante un evento sísmico en la zona 2, de la ciudad de Quetzaltenango.

- Específicos

- Determinar las características que tiene el suelo de la zona 2, de la ciudad de Quetzaltenango.
- Identificar los lugares de menor a mayor riesgo, para una planificación urbana, en la zona 2, de la ciudad de Quetzaltenango.
- Calcular la frecuencia natural del suelo de la zona 2, de la ciudad de Quetzaltenango.
- Hallar el modelo de velocidad de ondas de corte para establecer el perfil del suelo a través de la clasificación de las normas de seguridad de Guatemala.

RESUMEN DE MARCO METODOLÓGICO

La metodología de la presente investigación es cuantitativa, la cual consiste en recabar información investigativa en cuanto a mediciones y análisis de datos a través de las vibraciones ambientales. Para ello se hace necesaria la utilización de un acelerógrafo triaxial, para recabar señales compuestas para obtener el periodo fundamental del suelo. El acelerógrafo triaxial, se utilizó para la microzonificación de la zona 2, del municipio de Quetzaltenango, ubicado el aparato en dirección del norte y especialmente debe ser nivelado, obteniendo datos del componente horizontal de N-S, E-O y el componente vertical (H/V). La información recabada se hizo aproximadamente a cada 300 metros colocando el acelerógrafo en un punto con tres mediciones de lectura.

Por otro lado, se realizó el análisis estadístico en forma descriptiva, efectuando la estadística promedio y la desviación estándar de la amplificación y el período fundamental del suelo en el que se presentaron datos numéricos, para obtener como producto tablas y gráficas de razón espectral (H/V) en comparación con amplitud.

Posteriormente se importaron los datos en un *software* llamado DEGTRA, para exportar las señales sísmicas del suelo, este programa se usó para determinar el espectro de Fourier y la función de transferencia, obteniendo como resultado las frecuencias del suelo y las amplitudes. En este proceso se aplicó la técnica de NAKAMURA.

Seguidamente se utilizó un *software* llamado ARGIS o ARGMAP, para procesar datos tales como puntos de georeferencia (latitud, y longitud) y

frecuencias promedias para obtener la microzonificación sísmica de la zona 2 de Quetzaltenango,

A través de un *software* llamado Dinver se determinaron las velocidades de onda corte en función de las frecuencias promedios y densidad del suelo.

INTRODUCCIÓN

Quetzaltenango es una ciudad muy vulnerable a los impactos de ondas sísmicas, al igual que el resto del país, y esto se debe a que se encuentra en medio de tres placas tectónicas; Norteamérica, Caribe y Cocos, siendo la que más se presenta en dicha ciudad la falla del Polochic, que es producto del contacto de las Placas de Norteamérica y Caribe.

Los terremotos más recientes y sensibles que afectaron a esta ciudad fueron: el del 7 de noviembre del 2012, cuyo epicentro fue en el océano Pacífico, a 35 km del puerto de Champerico, con una magnitud fue de 7.4 e intensidad de VII MM, y el de San Marcos, del 7 de Julio del 2014, con una magnitud de 6.4 e intensidad de III MM; y, según informe presentado por (Cifuentes, 2015)

Este estudio se encaminó a evaluar el movimiento sísmico de un suelo, es decir, se realizó un análisis estático del terreno donde se determinó la respuesta o su comportamiento frente a la acción sísmica, y este a su vez, se relacionó con la frecuencia natural de vibración del suelo a través del método de NAKAMURA. El análisis se realizó en la zona 2 de Quetzaltenango, atendiendo las condiciones geológicas y topográficas locales del lugar.

Una de las herramientas utilizadas fue: la transformada de Fourier a través de las señales sísmicas en cada punto analizado, mediante la cual se tiene como resultado el espectro de frecuencias naturales y amplitudes del suelo.

Dados los espectros de frecuencias naturales, se estableció la velocidad de onda de corte, para determinar la clasificación del tipo del suelo. Esta velocidad

está en función de la profundidad en la que se transmite la onda sísmica hacia el subsuelo.

El objetivo principal de la investigación consistió en identificar los suelos de menor a mayor riesgo a través de un mapa de zonificación sísmica de la zona 2, de la ciudad de Quetzaltenango, por medio de la frecuencia natural del suelo, utilizando el método de Nakamura, adicionalmente en relación a los objetivos específicos se aplicaron las señales sísmicas para obtener el espectro de Fourier, dando como resultado la función de transferencia, que nos permite obtener tasas espectrales H/V . Mediante el espectro de Fourier, se determinaron las frecuencias y amplitudes en un punto determinado. Se emplearon las frecuencias promedias para evaluar la clasificación del tipo de suelo aplicando las normas estructurales de Guatemala.

En el capítulo 1, se presentan las generalidades de la investigación con relación a la ubicación, localización y población del municipio de Quetzaltenango. Además, se muestran las referencias de los sismos que han afectado la ciudad de Quetzaltenango. Por otro parte se da una definición de escalas de sismo y escala de intensidad que más se utiliza a nivel global.

El capítulo 2, incluye el marco teórico conceptual de los conceptos generales de la zona sísmica tal es el caso de: placas tectónicas, estabilidad del suelo, ruido sísmico ambiental, transformada de Fourier, función de transferencia, método de Nakamura, gráficas del método de razón espectral.

En el capítulo 3, se hizo la presentación de un mapa de microzonificación sísmica de la zona 2 de la ciudad de Quetzaltenango obteniendo las frecuencias promedios y amplitudes por medio del método de Nakamura, identificando suelos de menor y mayor riesgo. Por otra parte, se determinó a velocidad de

propagación onda de corte para frecuencias bajas y media a una profundidad de 30 metros.

1. GENERALIDADES

1.1. Ubicación y demografía de Quetzaltenango

La ciudad de Quetzaltenango se encuentra localizada en un valle montañoso, aproximadamente a 206 kilómetros al noroeste de la ciudad de Guatemala.

Su cabecera departamental es también llamada Quetzaltenango de la real corona o ciudad de los altos y es uno de los 340 municipios de la República de Guatemala, tiene una extensión territorial aproximadamente de 122 Km², con una altitud media de 2,333 m.s.n.m. El Municipio de Quetzaltenango cuenta con una población total de 180,706 habitantes según datos del Instituto Nacional de Estadística de Guatemala, según resultado del censo (Instituto Nacional de Estadística Guatemala. INE, 2018).

1.2. Ubicación de la zona 2 Quetzaltenango

La zona 2 de la ciudad de Quetzaltenango, se tiene un área de 8.6 km², con una población de 35,000 habitantes, altitud de 2,322 SNM, colindancias al norte con la zona ocho, al sur con la zona uno, al este con la zona cinco y el oeste con la zona tres.

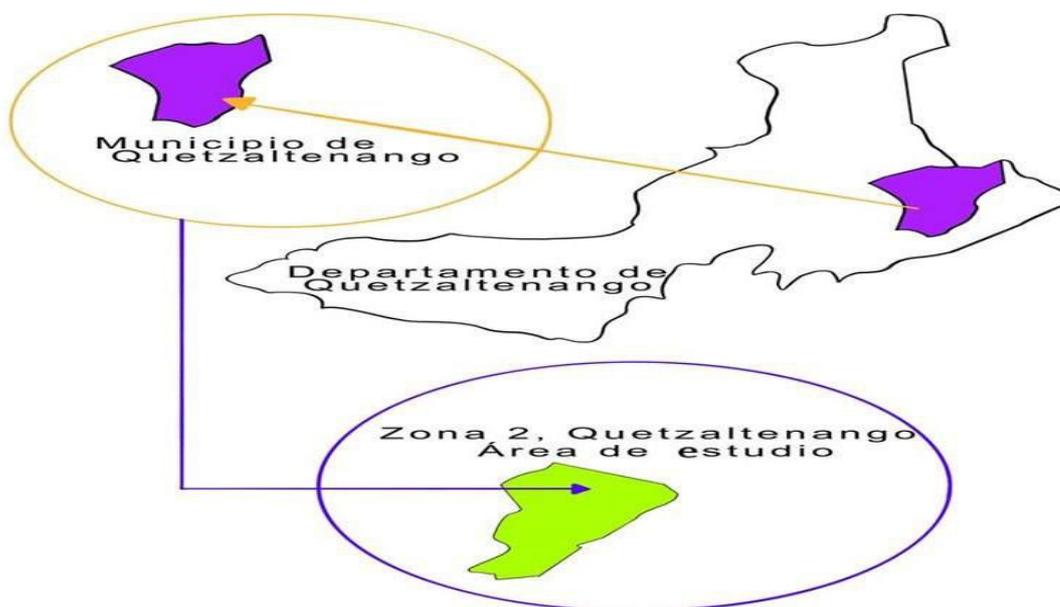
1.3. Riesgo sísmico

Para realizar un estudio sísmico, es importante comprender que es el riesgo sísmico, al respecto Herráiz (1997), señala que “el riesgo sísmico es la

consideración conjunta del peligro sísmico en una zona, la vulnerabilidad de las edificaciones es sobre aquella y el valor económico involucrado en las pérdidas y reparaciones” (p. 101). También explica que el riesgo sísmico es la probabilidad que exista un terremoto ocasionando daños en un área determinada, está relacionado con peligrosidad sísmica y vulnerabilidad sísmica.

La ciudad de Quetzaltenango cuenta con diferentes tipos de estratos de suelos, una de las zonas más vulnerable de la ciudad es la zona 2, conocido también como la ciénaga, por ser uno de los puntos más bajos del valle, se presentan en algunos lugares depósitos aluviales por lo que se considera una zona de humedad donde se han hecho rellenos para poder construir viviendas.

Figura 1. **Área de estudio de la zona 2 de Quetzaltenango**



Fuente: elaboración propia.

1.4. Sismología

La sismología es la ciencia que estudia los sismos. Los sismos establecen un fenómeno que se presenta por un movimiento brusco que tiene su origen en el interior de la tierra y se registra en la superficie de la tierra, el sismo es sinónimo de terremoto.

Por otro lado, Rojas (2013), señala que “el termino sismología deriva de la voz griega seísmos que significa terremoto, la sismología se ocupa del estudio de los sismos y de otras vibraciones producidas natural o artificialmente por la tierra” (p. 153).

1.5. Escala de intensidad y magnitud

Existen diferentes formas de medición de sismos, Torres (2008), describió que, “para medir los sismos considera tres formas: la intensidad, la magnitud, y la aceleración” (p. 35). Es importante medir los sismos porque están relacionados con los daños causados en estructuras mediante la energía liberada en el hipocentro.

Asimismo, Estrada (2012), señala que “para medir el tamaño de un terremoto de manera universal, se define la magnitud, una medida que no es subjetiva como la intensidad y que además no cambia con la ubicación” (p. 20).

Arias (citado en Cabañas, 1999), menciona que “la intensidad es una medida de capacidad de daño basada en la energía, del movimiento del suelo, disipada por una población de estructuras cuyas frecuencias están uniformemente distribuidas en todo el rango de frecuencia” (p. 54). La intensidad depende del entorno del terreno y de la vulnerabilidad de las construcciones,

existen muchas escalas para su medición pero la más actual es la escala Mercalli Modificada (M,M).

La magnitud es un número que indica la cantidad energía liberada durante el sismo, es el tamaño del sismo medido en el origen, que tanto se disloco en la fuente.

Según la escala de Richter la magnitud de un sismo está directamente relacionada con la cantidad de energía liberada durante el movimiento en la falla, en la cual esa energía se puede medir por medio de la amplitud máxima de un sismograma.

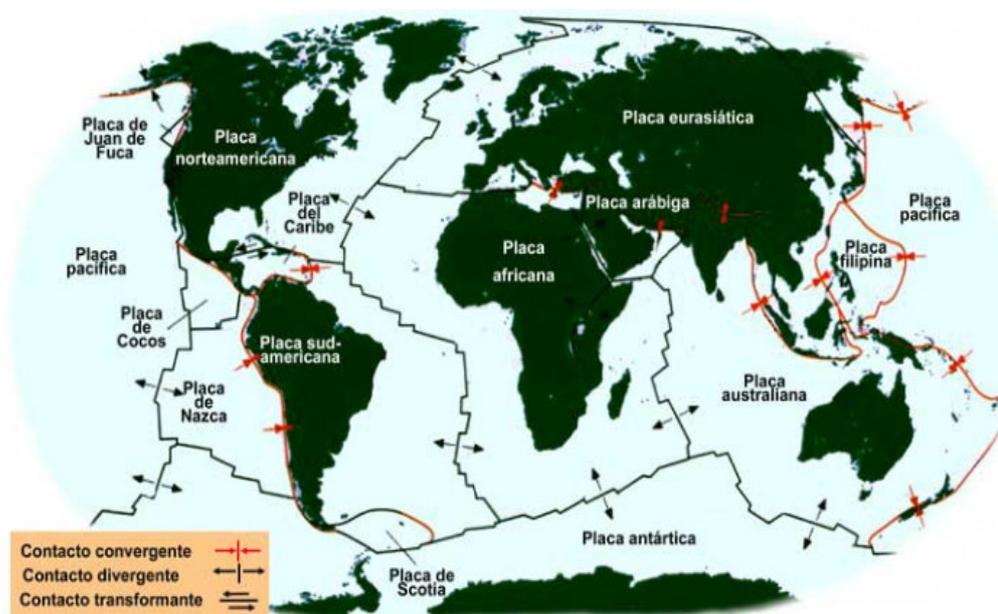
2. ZONA SÍSMICA

2.1. Origen de los sismos en Guatemala

La corteza terrestre es afectada por fuerzas tectónicas, es decir que la tierra es dividida en segmentos que se desplazan por medio de las placas tectónicas. El movimiento de estas placas indica que se mueven unas respecto de otras, generando en sus bordes una gran cantidad de energía, que permite que se formen las ondas sísmicas, que en la superficie de la tierra constituyen un sismo. Dependiendo de las características que presenten, pueden generar un sismo de interplaca o un sismo intraplaca.

En el globo terráqueo existen cantidad de placas, especialmente, la República de Guatemala está rodeada por tres placas importantes que son: la placa de Norteamericana, la placa de Cocos y la placa del Caribe.

Figura 2. Mapa de placas tectónicas



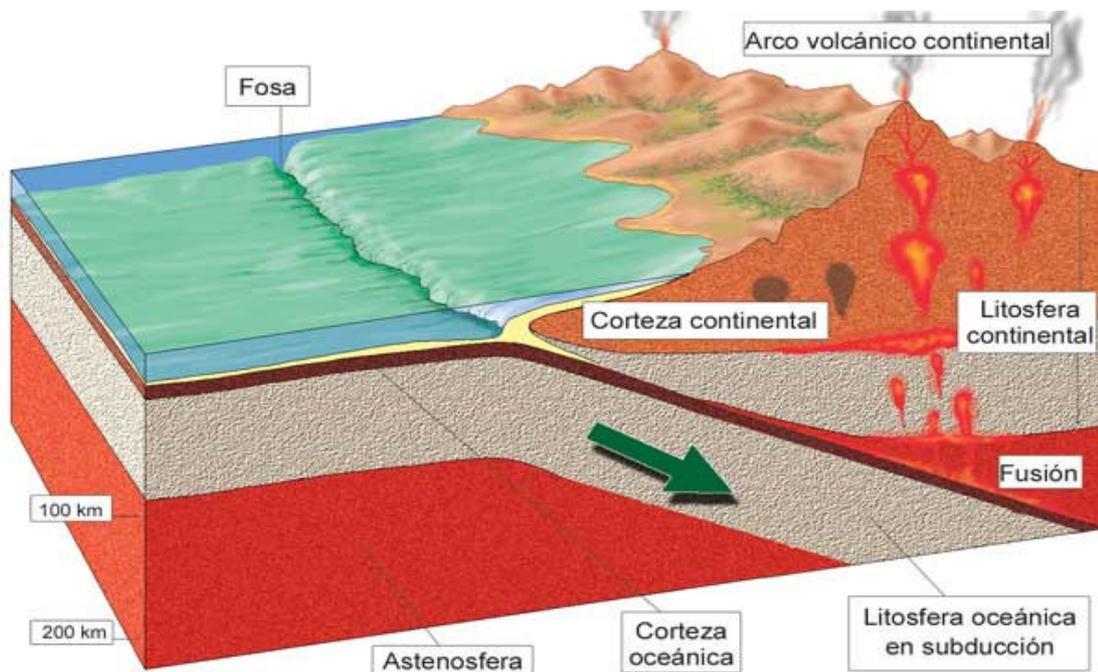
Fuente: Aula. (2005). *La litosfera terrestre*. Consultado el 04 de julio 2021. Recuperado de <http://www.aula2005.com/html/cn1eso/04lalitosfera/04lalitosferaes>.

2.2. Zonas sismogénicas de Guatemala

En la República de Guatemala se tienen tres zonas sismogénicas importantes que son: la zona de subducción, la zona de transcurrancia, y fallas secundarias.

La zona subducción es un segmento de placa que desciende y se sumerge bajo una placa continental, por lo general allí se sitúan los focos de los sismos, que define la zona Benioff. La República de Guatemala se ubica bajo la costa del océano Pacífico. La placa de Cocos se sumerge en la placa del Caribe, provocando la cadena volcánica y los movimientos sísmicos.

Figura 3. Mapa de zona de subducción



Fuente: Aula. (2005). *La litosfera terrestre*. Consultado el 04 de julio 2021. Recuperado de <http://www.aula2005.com/html/cn1eso/04lalitosfera/04lalitosferaes>.

Tabla I. Fallas zona subducción en Guatemala

Tipo de falla	Día	Mes	Año	Magnitud	Descripción
Zona subducción	18	Enero	1902		Terremoto de Ocós
Zona subducción	15	Febrero	1902		Maremoto, Sunami Acajutla
Zona subducción	18	Abril	1902	7.5 Ms	Terremoto de Occidente
Zona subducción	23	Septiembre	1902		Sismo en Chiapas
Zona subducción	24	Octubre	1902		Detonación del volcán Santa María
Zona subducción	6	Agosto	1942	7.8 Ms	Los abuelos le llaman 6 de agosto
Zona subducción	10	Enero	1998	5.8 Ms	Epicentro costas de Retalhuleu
Zona subducción	13	Enero	2001	7.6 Ms	Sismo en el Salvador

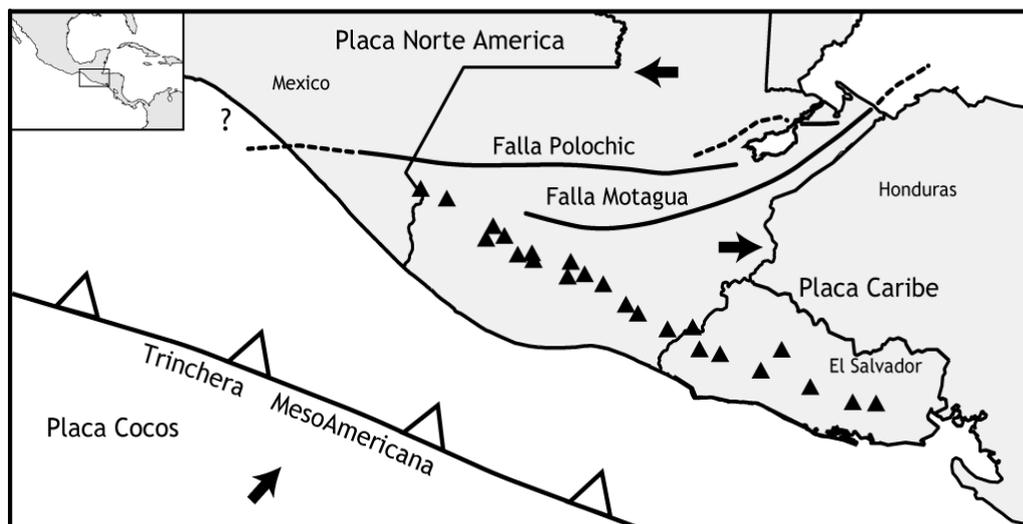
Continuación tabla I.

Tipo de falla	Día	Mes	Año	Magnitud	Descripción
Zona subducción	7	Noviembre	2012	7.4 Ms	San Marcos
Zona subducción	7	Julio	2014	6.8 Ms	San Marcos
Zona subducción	7	Septiembre	2017	8.2 Ms	Soconusco
Zona subducción	16	Febrero	2018	7.5 Ms	Soconusco
Zona subducción	1	Febrero	2019	7.0 Ms	Soconusco

Fuente: elaboración propia.

La zona de transcurrencia inicia en Izabal hasta llegar a Huehuetenango, en esta zona se produce el desplazamiento o falla lateral con relación a la placa de Norte América y la placa del Caribe. Las fallas para el área de Guatemala son la falla de Motagua, falla Chixoy-Polochic y la falla de Jocotán.

Figura 4. Mapa zona de transcurrencia



Fuente: Yani. (2006). *Mediciones de intensidades sísmica dentro del área urbana extendida de la ciudad de Guatemala*. Consultado el 04 de julio 2021. Recuperado de https://fisica.usac.edu.gt/public/tesis_lic/robin_y/IntensidadesSismicas.

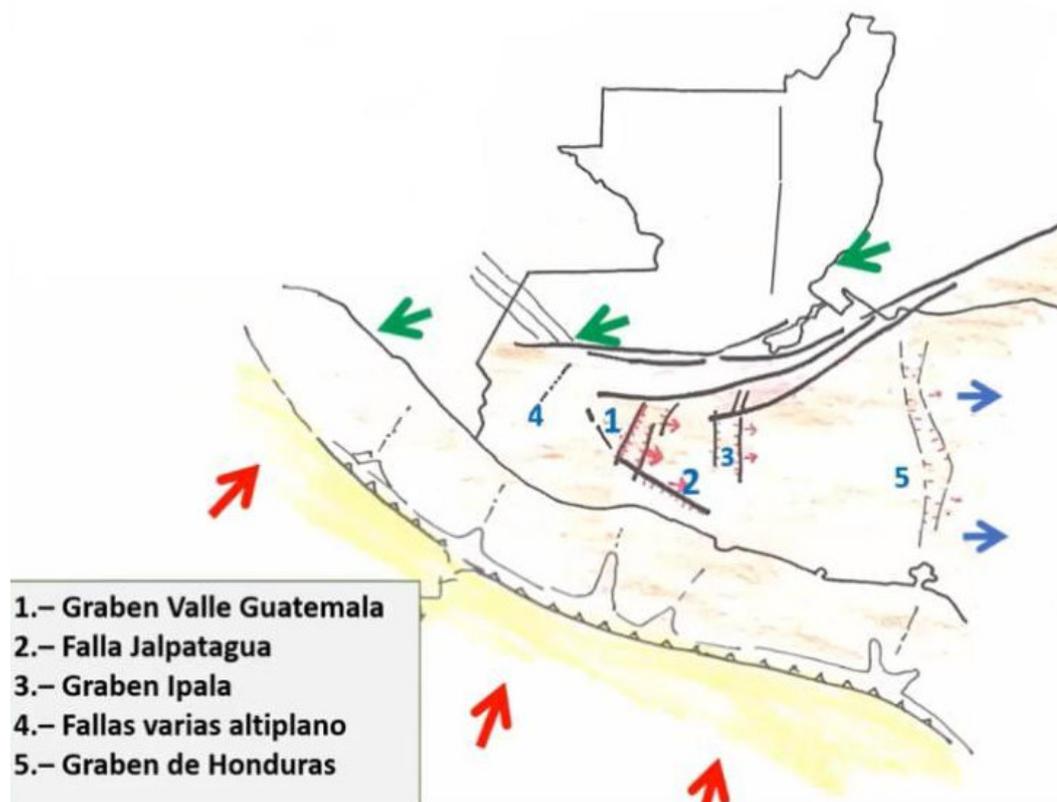
Tabla II. Fallas zona de transcurrencia en Guatemala

Tipo de falla	Día	Mes	Año	Magnitud	Descripción
Falla Polochic	6	Enero	1785	7 Ms	Santo Reyes
Falla Chixoy-Cuilco	22	Julio	1816	7.5 Ms	Santa María Magdalena
Falla Motagua			1945		Amates
Falla Motagua	4	Febrero	1976	7.5 Ms	El terremoto del siglo XX
Zona transcurrencia	11	Octubre	1985	5.0 Ms	Terremoto Uspantán
Falla Motagua	11	Julio	1999	6.1 Mw	Epicentro golfo Honduras
Zona transcurrencia			2008		Roatán en las costas de Honduras
Zona transcurrencia			2014		Canilla

Fuente: elaboración propia.

Las fallas secundarias, se encuentran dentro de la zona de intraplaca, estas fallas se ubican en la franja central de la República de Guatemala; entre las fallas más esenciales están: falla Jalpatagua, fallas varias del altiplano, graben de Valle de Guatemala, graben de Ipala y graben de Honduras. Las fallas o rupturas mencionadas anteriormente se presentan en la superficie o corteza terrestre, y estas causan intensidades inmediatas y severas. Cabe mencionar que las fallas más comunes son: falla o fractura de Mixco (km 23 CA-1 occidente) y la falla de Santa Catarina Pínula.

Figura 5. **Mapa de las fallas secundarias**



Fuente: Monzón. (2020). *Historia sísmica de Guatemala*.

Tabla III. **Fallas secundarias en Guatemala**

Tipo de falla	Día	Mes	Año	Magnitud
Graben de Ipala		Mayo	1733	
Graben de Ipala	15	Octubre	1743	
Graben de Ipala	2	Junio	1765	
Graben Guatemala	17	Noviembre	1917	4.8 M
Graben Guatemala	12	Diciembre	1917	
Graben Guatemala	25	Diciembre	1917	5.6 M
Graben Guatemala	26	Diciembre	1917	5.1 M
Graben Guatemala	29	Diciembre	1917	5.2 M
Graben Guatemala	3	Enero	1918	6.0 M
Graben Guatemala	24	Enero	1918	6.2 M
Falla Jalpatagua	19	Diciembre	1885	5.5 M
Falla Jalpatagua	8	Marzo	1913	6.4 M
Falla Jalpatagua	7	Julio	1930	6.2 M
Falla Jalpatagua	14	Julio	1930	6.9 M
Falla Jalpatagua	17	Julio	1930	6.5 M

Fuente: elaboración propia.

2.3. Desplazamiento de placas tectónicas

Las placas tectónicas se clasifican en placas principales y placas secundarias. La república de Guatemala cuenta con tres placas importantes, donde se establece el movimiento relativo promedio, las cuales son: la placa de Coco-Caribe, que se desplaza alrededor de 7.47 cm/año; la placa de Norteamérica-Caribe, que se desplaza de 2.08 cm/año o 1.7 cm/año y la placa de Cocos-Norteamérica, 9.01 cm/año, según lo indica (Cid, 2007).

2.4. Ruido sismo ambiental

Según Rosso (2012), describió que, “diferentes fuentes naturales y artificiales generan el ruido sísmico ambiental. El ruido sísmico es una señal sísmica en ausencia de señales trascendentales de interés, tales como terremotos” (p. 4). El ruido es un proceso impredecible, por lo tanto, un sitio de medida debe de tener su propio ruido ambiental. Dentro de las fuentes del ruido sísmico ambiental tenemos: micro sismicidad marina, comprendida entre 0.033 Hz a 0.25 Hz; y de 1 Hz en adelante se tiene la actividad humana, con ruidos tales como: el ruido de las oscilaciones de árboles, carros, motores entre otros.

2.5. Microsismos y microtemblores

Asimismo, Alfaro (2000) define a los microsismos como: “las oscilaciones naturales y regulares del subsuelo, que no son producidas por terremotos ni por fuentes artificiales como el tráfico, sino que son inducidas por fuentes naturales como las olas oceánicas y tormentas” (p. 2). Los microsismos son vibraciones que están asociados con el viento, las olas oceánicas, por lo consiguiente la amplitud y el periodo son afectadas por las condiciones del clima.

Cabe definir a los micro temblores, para diferenciarlos de los microsismos, de acuerdo con Aki (citado en Alfaro, 2000), quien dice que: los primeros son: vibraciones de período corto, que se generan por sucesos artificiales, a consecuencia de acciones humanas, por ejemplo: tráfico vehicular, maquinaria pesada, movimiento de excavadoras, entre otros.

2.6. Rigidez, resistencia y ductilidad estructural

La resistencia es un elemento primordial que busca que las dimensiones de todos los elementos respondan a la integridad de la estructura, sometida a todas las combinaciones de cargas.

La rigidez de una estructura se refiere a la deformación que sufre los elementos ante las combinaciones de las cargas aplicadas. En los diseños se debe tener una rigidez adecuada en la cual permite limitar desplazamientos laterales y vibración del elemento.

Según Jiménez (2014), la rigidez de una estructura “es la capacidad de un elemento o un conjunto de elementos estructurales de resistir desplazamientos, los factores que influyen son: propiedad de los materiales, propiedad de la sección, propiedad del elemento estructural y propiedad del sistema” (p. 5).

La ductilidad de un sistema estructural es la capacidad de deformarse después del límite elástico.

2.7. Transformada de Fourier

Respecto a la teoría de la transformada de Fourier, según Carrilo (2003), indicó que “la teoría de Fourier se refiere al tratamiento de las señales periódicas” (p. 5). La transformada de Fourier su objetivo es transformar señales de tiempo y frecuencia en el dominio.

2.8. Función de transferencia

Por otro lado, Ulloa (2018) describió “Una función de transferencia es un modelo matemático que, a través de un cociente, relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada o excitación” (p. 6). Las vibraciones de ingreso son la base rocosa y de superficie, y las de salida son las características físicas y de movimiento del suelo.

2.9. Método de Nakamura

Según Schmidt (2015), “el método de Nakamura consiste en la determinación de los espectros de Fourier de las componentes horizontal y de la vertical de registros de vibraciones ambientales” (p.157).

Por su parte, Salas (2007), indicó que “según Nakamura, el método de cociente espectral permitirá obtener la función de transferencia, período y la amplificación” (p. 19). El período es uno de los parámetros fundamentales para determinar los efectos locales de un suelo.

Es considerada como una técnica pasiva, el análisis de las mediciones permite identificar la frecuencia del suelo. El método sísmico HVSR nos permite determinar el periodo fundamental del suelo que es un parámetro importante para establecer los efectos de amplificación local del sitio.

Por otro lado, Pantanalli (2014), explica que este método evalúa “las componentes espectrales horizontales N-S, O-E y vertical del movimiento superficial” (p. 8).

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$SE = HS/HB \text{ (Ecuación 1)}$$

$$As = VS/VB \text{ (Ecuación 2)}$$

Por lo tanto:

- HS/HB: muestra las amplitudes del elemento horizontal.
- VS/VB: muestra las amplitudes del elemento vertical.

Seguidamente, H_B y V_B , adquieren el valor unitario, por lo que se obtiene una fórmula final:

$$SM = HS/VS \text{ (Ecuación 3)}$$

La aplicación del método se tiene las siguientes áreas:

- Frecuencia de resonancia de sitio.
- Frecuencia de resonancia de una estructura o edificio.
- Monitoreo de vibraciones en estructuras o edificios.
- Microzonificación sísmica.

2.10. Microzonificación

La microzonificación considera todos los fenómenos naturales que pueden afectar potencialmente a un área de interés, tales como sismos, inundaciones, deslizamiento de suelo, entre otros.

2.11. Microzonificación sísmica

Sandoval (2013), define “la microzonificación sísmica como un procedimiento para la estimación del riesgo sísmico a partir del movimiento del suelo y algunos fenómenos relacionados, tomando en cuenta los efectos de las condiciones locales del sitio“ (p. 18). Añade que, la microzonificación sísmica nos permite determinar la frecuencia natural de un suelo de cada sector de menor y a mayor riesgo.

Continúa explicando, Sandoval (2013) que “el efecto de sitio es la transformación que sufren las ondas sísmicas desde la roca base, hasta la superficie“ (p. 20). El efecto de sitio se refiere a la amplificación elevada cuando se tiene terrenos blandos y cuando se tiene terrenos rocosos la amplificación reduce.

La microzonificación sísmica consiste entonces en el análisis de aspecto sísmico que afectan al suelo de un área de interés. Dentro de estas características se debe considerar el ruido sísmico ambiental y los tipos de ondas sísmicas que existen.

Respecto a las ondas sísmica Quevedo (2010), explicó que “existen tres tipos ondas que son las siguientes ondas primarias o longitudinales, ondas secundarias o transversales y ondas superficiales o largas” (p. 9).

Por otro lado, Sandoval (2013) concluyó “una microzonificación se contempla la elaboración de mapas, mediante curvas que una valores iguales se expresa la distribución de períodos dominantes del terreno” (p. 22). Por medio de los mapas isoperíodos se determina la caracterización de los suelos con el fin de que estos mapas establezca la prevención de riesgos sísmico.

2.12. Norma estructural para Guatemala NSE 2.1

A continuación, se presenta una tabla con las propiedades promedio en los primeros treinta metros de profundidad, según la clasificación del tipo de suelo y la velocidad de onda de corte.

Figura 6. Tipificación de suelo

Clase de suelo	Nombre Perfil de Suelo	PROPIEDADES PROMEDIO EN LOS PRIMEROS 30 METROS		
		Velocidad de onda de corte, \bar{v}_s (m/s)	Resistencia a la penetración estándar, \bar{N}	Resistencia al corte del suelo no drenado, \bar{s}_v (kpa)
A	Roca dura	$\bar{v}_s > 1500$	N/A	N/A
B	Roca	$750 < \bar{v}_s \leq 1500$	N/A	N/A
C	Suelo denso y roca suave	$365 < \bar{v}_s \leq 750$	$\bar{N} > 50$	$\bar{s}_v \geq 100$
D	Perfil de suelo rígido	$185 \leq \bar{v}_s \leq 365$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$	$50 \leq \bar{s}_v \leq 100$
E	Perfil de suelo suave	$\bar{v}_s < 185$	$\bar{N} < 15$	$\bar{s}_v < 0$
E	-	Cualquier perfil con más de 3 metros de suelo con las siguientes características: 1. Índice de plasticidad $PI > 20$, 2. Contenido de humedad $w \geq 40\%$, 3. Resistencia al corte de suelo no drenado < 25 kPa		
F	-	Cualquier perfil con contenido de suelo que tenga una o más de las siguientes características: 1. Suelos vulnerables a fallas o colapsos bajo cargas sísmicas, así como suelos licuables, arcillas altamente sensibles, suelos débilmente cementados. 2. Turbas y/o arcillas altamente orgánicas ($H > 3$ metros de turba o arcilla altamente orgánica) 3. Arcillas altamente plásticas ($H > 8$ metros con coeficiente de plasticidad $P > 75$) 4. Arcillas en estratos de gran espesor, suave/medio rígidas ($H > 36$ metros)		

Fuente: AGIES. (2018). *NSE 2.1 Normas de Seguridad Estructural para Guatemala*. Consultado el 04 de julio 2021. Recuperado de <https://www.agies.org/bibliotecas>.

Adicionalmente, AGIES (2018) menciona que la Norma de Seguridad Estructural para Guatemala (NSE 2), capítulo 4.5.8 establece que la “aceleración máxima del suelo correspondiente al sismo de diseño a partir de los espectros genéricos” (pp. 4-10), es uno de los factores más importantes en la ingeniería sísmica, porque se determina la aceleración máxima del suelo, por lo general existen aceleraciones que pueden estar comprendidos dentro de un amplio rango de 0.10 g a 0.4 g, esto depende del peligro sísmico que se tenga desde el nivel bajo hasta el nivel elevado.

3. MAPA DE MICROZONIFICACION SISMICA DE LA ZONA 2

3.1. Área de estudio

El estudio se realizó en la zona 2 del municipio de Quetzaltenango, a través de un mapa donde se ubican las calles y avenidas.

Mediante el mapa de la zona 2 de Quetzaltenango, se efectuó la medición de cada punto de intersección de calle y avenida, ubicando la estación de mayor relevancia.

Por medio de una aplicación de sistema de posicionamiento global GPS se procedió a calcular la posición en cada intersección de calle y avenidas siendo las coordenadas Universal Trasverse Mercator, siendo sus siglas UTM.

Adicionalmente se registraron las microvibraciones ambientales de cada intersección de calle y avenida, con el uso del equipo de acelerógrafo Altus Kinemetricks modelo K2 y serial núm. 851.

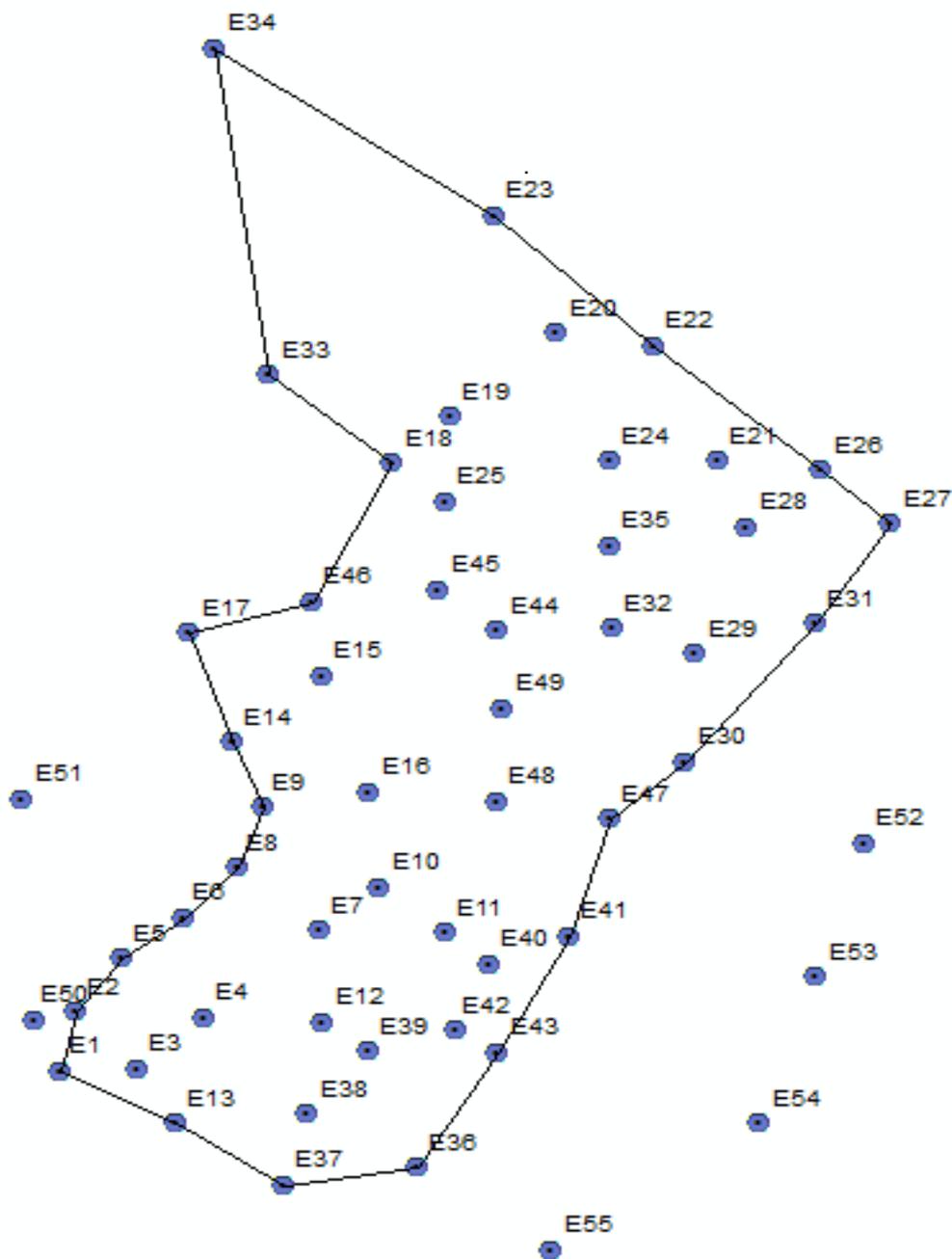
Se hicieron tres mediciones con el acelerógrafo en cada estación de medición, para obtener como resultado una medición promedio. Siendo un total de 55 estaciones.

Figura 7. Mapa de la zona 2 de Quetzaltenango



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Google Earth Pro.

Figura 8. Mapa de ubicación de las estaciones de la zona 2



Fuente: elaboración propia.

3.2. Características del equipo utilizado

El equipo que se utilizó es un acelerógrafo Altus Kinemetricks modelo K2 y serial es núm. 851, de la división de Ciencias de Ingeniería CUNOC, el cual tiene las características técnicas siguientes:

- Ofrece un rango dinámico superior a 145 db.
- Episensor triaxial interno.
- Computador interno para el registro de datos.
- Almacenamiento de datos que incluye una ranura de almacenamiento primario y la otra ranura con almacenamiento secundario, ambos con formato de tarjeta PCMCIA (Personal Computer Memory Card International Association).
- Cada tarjeta contiene un almacenamiento de 32 MB.
- El almacenamiento de datos por medio de la tarjeta PCMCIA, no se pierde cuando está apagado.
- Sistema de comunicación del acelerógrafo con la computadora por medio del cable de interfaz RS-232C.
- El registro de la información por medio del programa Quick Talk desarrollado por Microsoft Windows. El programa registra un archivo con extensión ETV, la hora y la fecha en que fue tomada la medición.

- Para su funcionamiento, el acelerógrafo utiliza una batería o pila de 12 voltios.
- El aparato funciona con temperaturas -20 grados centígrados a 70 grados centígrados.
- El acelerógrafo mide un ancho de 26 centímetros, largo 38 centímetros y alto 18 centímetros.
- La capacidad de grabación de cada registro es de aproximadamente de 125 Kb.

Figura 9. **Acelerógrafo Altus Kinemetricks modelo K2 Serial 851**



Fuente: [Fotografía de Jeovani Flores Díaz]. (Quetzaltenango, Quetzaltenango. 2021).
Colección particular. Guatemala.

3.3. Funcionamiento de la instrumentación sísmica

Se coloca el acelerógrafo en un punto de medición. El acelerógrafo cuenta con varios mandos, los cuales se orientan mediante una brújula; deben quedar en sentido Norte-Sur. Adicionalmente el equipo debe ser nivelado.

Conectar la computadora personal con el acelerógrafo modelo k2 teniendo presente que el interruptor del acelerógrafo debe estar en posición de apago (*OFF*). El cable de RS-232C se conecta con la ranura ancha hacia arriba. El

puerto de entrada se ubica en la parte central del acelerógrafo, para comprobar su interconexión al girarlo, el conector hace clic, posteriormente el otro lado del cable se conecta con la computadora personal.

Encender el acelerógrafo por medio del interruptor de encendido (*ON*), se encuentra en la parte superior del equipo al momento de abrir la tapadera del acelerógrafo.

Para activar los sensores internos, se debe esperar unos segundos, entonces las luces encendidas de los pilotos se pondrán en parpadeo. Ese será el indicador de que el acelerógrafo está en funcionamiento.

Posteriormente se enciende la computadora personal, y se ingresa al programa *Quick Talk* desarrollado por Microsoft Windows para el análisis de registro.

Para establecer el programa *Quick Talk* se configura la opción *Set Time*, colocando la fecha y la hora reciente.

Seguidamente se debe dar un pequeño golpe al acelerógrafo, somatándolo ligeramente contra el suelo, para activar la opción TRIGGER o DISPARADOR, con la finalidad de que grabe el registro de la vibración del suelo en forma automática, por el periodo establecido.

Esperando unos segundos más tarde se desactiva la opción TRIGGER, dejando la luz de los pilotos en modo de parpadeo.

El acelerógrafo graba la medición con una extensión EVT.

Figura 10. **Acelerógrafo indicando la orientación de la brújula**



Fuente: [Fotografía de Jeovani Flores Díaz]. (Quetzaltenango, Quetzaltenango. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Figura 11. **Acelerógrafo E12 segunda calle y séptima avenida zona 2**



Fuente: [Fotografía de Jeovani Flores Díaz]. (Quetzaltenango, Quetzaltenango. 2021).
Colección particular. Guatemala.

Figura 12. **Acelerógrafo E22 segunda avenida y catorce calle zona 2**



Fuente: [Fotografía de Jeovani Flores Díaz]. (Quetzaltenango, Quetzaltenango. 2021).
Colección particular. Guatemala.

3.4. Metodología de la razón espectral

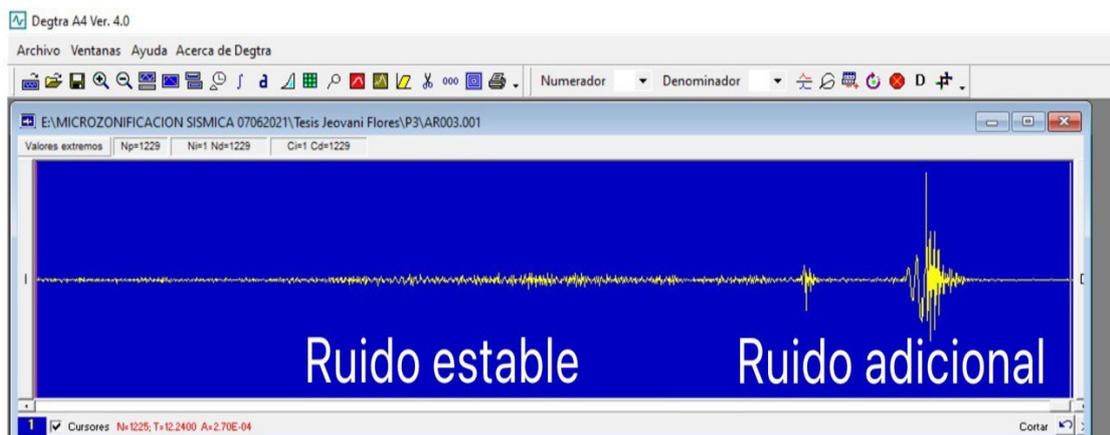
El archivo correspondiente a los registros tiene extensión EVT. Para leer esos registros, se procedió con un programa conversor propio de Altus Kinematics, denominado KW2ASC32.exe, mediante el cual se pudieron extraer los datos y convertirlos en archivo de texto.

Los registros de datos que se obtienen son los siguientes: horizontal (N-S), vertical, transversal (E-O) y configuración de la información con las siguientes extensiones: .001, .002, .003 y SHD.

Mediante el programa Degtra Net 2007, creado en el año 2007 y desarrollado por la Universidad Nacional Autónoma de México cuya sigla es UNAM, se realizaron los siguientes estudios: el acelerograma, el tratamiento de los acelerogramas, el espectro de Fourier y la razón espectral.

Para comenzar a utilizar el programa Degtra Net 2007, buscar el primer icono a la izquierda y abrir nueva ventana.

Figura 13. Señal estable y señal adicional



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Degtra.

El segundo paso es dar clic en el icono leer acelerograma, para importar las tres extensiones de texto .001, .002, .003, para cada una de las ventanas, considerando que los archivos deben estar en formato ASCII.

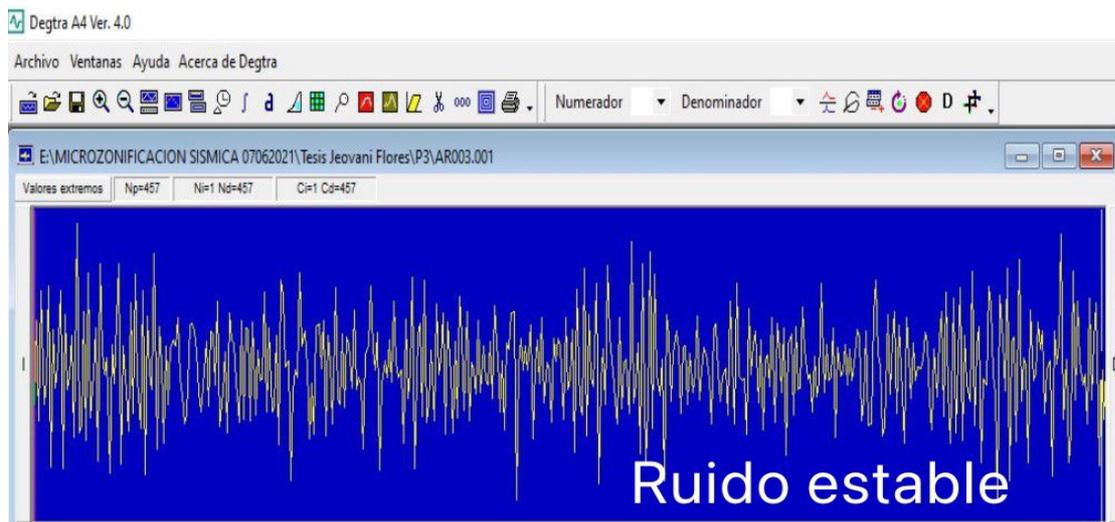
Posteriormente realizar el tratamiento para cada una de las señales, dentro del programa Degtra para eso se debe buscar la herramienta corrección de línea base, también llamado corrección de ceros. Esto se debe a que ocurre que los datos del acelerograma se encuentran corridos respecto a la línea cero, lo cual

se puede deber a que el acelerógrafo no está perfectamente nivelado en su colocación o bien porque el sistema de registro provoque un desvío en los datos respecto a la línea base.

Una vez realizada la corrección de la señal se obtiene el acelerograma de base corregido para los tres componentes.

Con el acelerograma corregido se selecciona la señal sísmica que contiene mayor cantidad de señal estable eliminando la señal adicional, debido a que la señal adicional es producida por fuente local tal es el caso del paso de un móvil que están fuera del rango de medición. La señal estable cortada debe tener una muestra aproximada entre $1100 < N_p < 1300$.

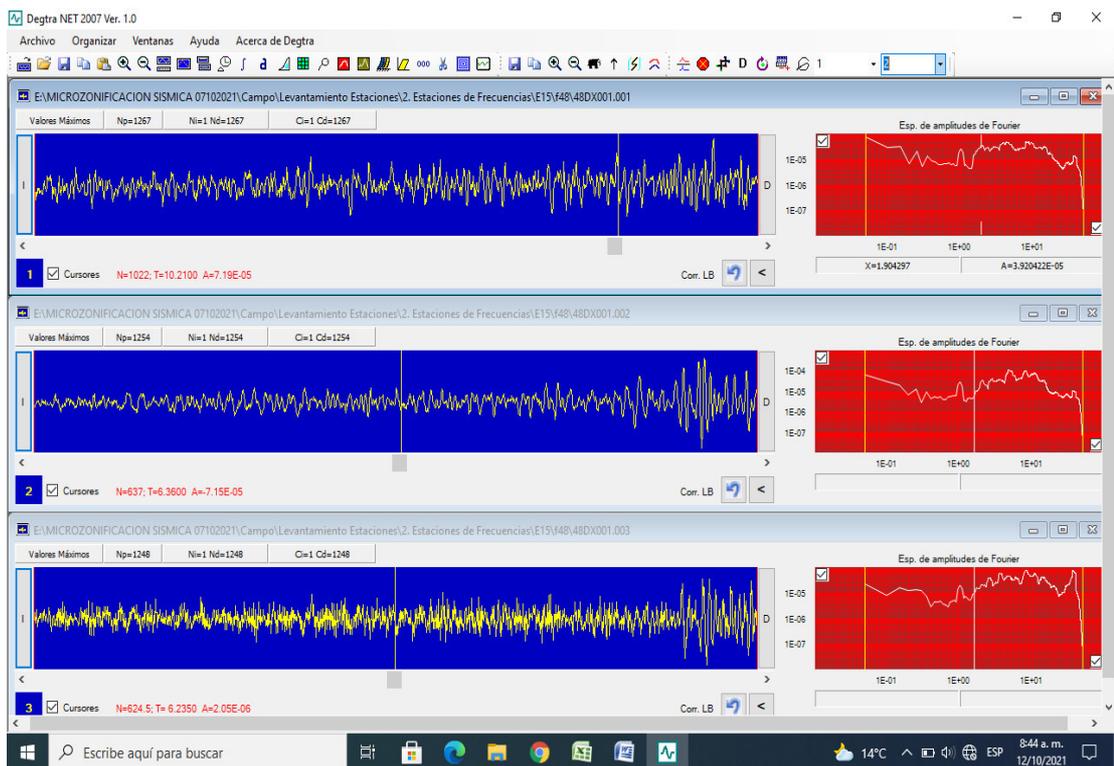
Figura 14. Señal estable



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Degtra.

Una vez realizada la señal estable cortada, es necesario realizar un análisis del contenido de frecuencias del acelerograma. Dentro del programa Degtra, se hace clic en el icono calcular el espectro de Fourier, para obtener el espectro de frecuencias dominantes y la amplitud máxima de cada una de las componentes del acelerograma. Por lo general se suele representar con ejes logarítmicos, en donde el eje de las abscisas representa las frecuencias en Hertz y el eje de la ordenada la amplitud de Fourier.

Figura 15. Degtra señal estable y el espectro de Fourier

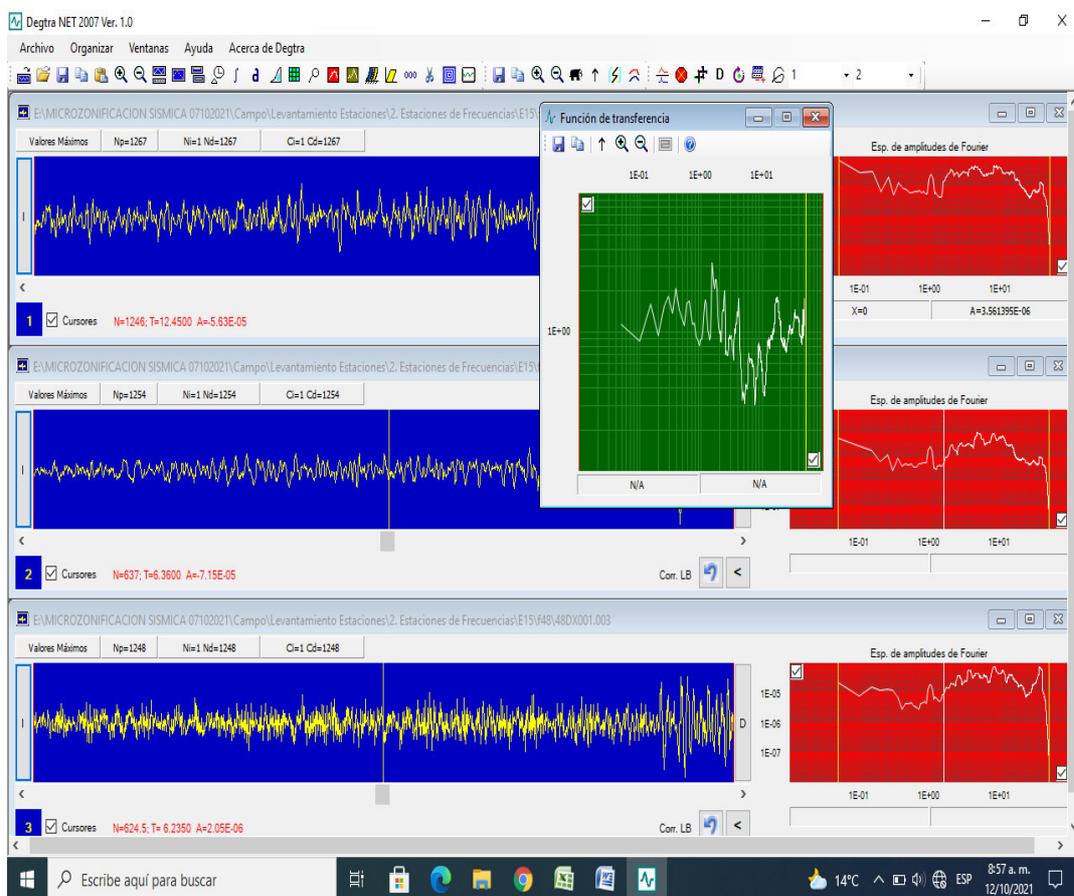


Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Degtra.

Para obtener la función de transferencia del suelo, dentro del programa Degtra, se hace clic en el icono función de transferencia para obtener la razón

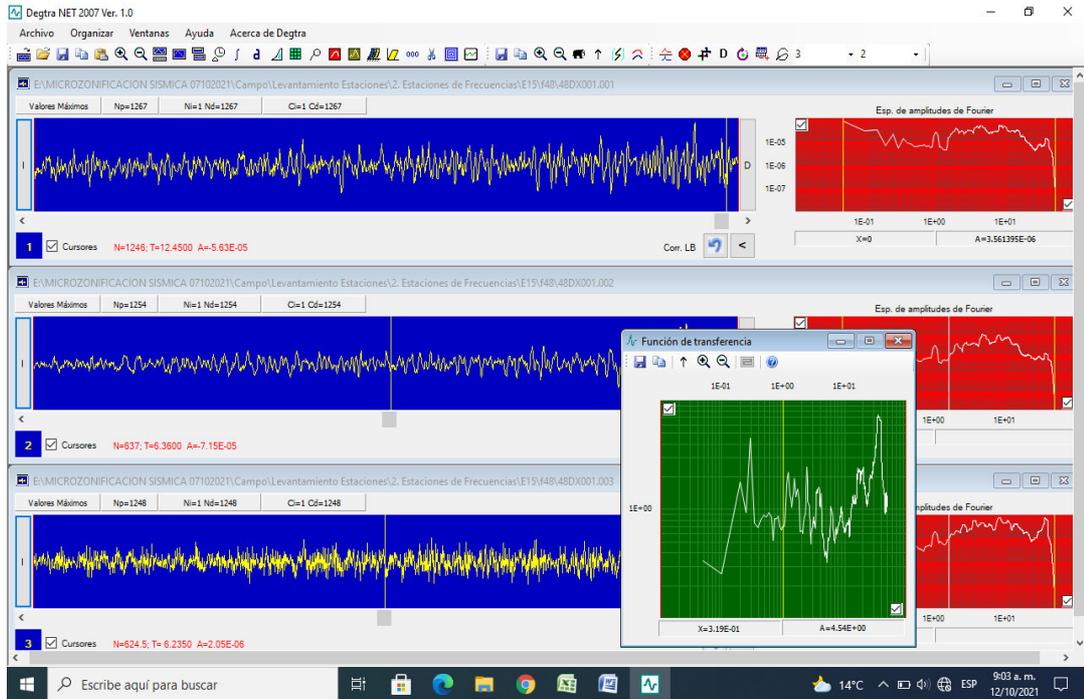
espectral de (H/V), utilizando los espectros de Fourier horizontal y el espectro Fourier vertical, en la cual los resultados se exportan a un archivo de extensión.txt.

Figura 16. El programa Degtra razón espectral de N-S/V



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Degtra.

Figura 17. Degtra razón espectral de E-O/V



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Degtra.

3.5. Procesamiento razón espectral por estación H/V

Teniendo la función de transferencia de la razón espectral de N-S/V y E-O/V se copia la función al portapapeles de cada una de las razones espectrales se pega en una hoja de Excel, que contiene la frecuencia (Hertz) y la amplitud de las dos razones espectrales.

La tabla contiene la señal estable de 1023 filas en la cual se toma la amplitud máxima promedio (H/V) para obtener la frecuencia deseada. Se generaron 165 archivos en Excel para obtener cincuenta y cinco estaciones, en

el apéndice se presentan 10 gráficas en Excel, en las que se establece el promedio razón espectral asociada con su frecuencia (Hertz) en particular.

En la tabla IV, se observa que la razón espectral no tomó frecuencias altas ni bajas, fijando un límite de frecuencias entre 1 a 10 Hertz para mejor apreciación de comportamiento del suelo, y basado en el rango de la operación del instrumento sísmico, se procesó la información de la estación E22 con frecuencia número 74, dando como resultado una amplitud máxima de 2.94 y una frecuencia natural de 1.51 Hertz.

Seguidamente de la tabla IV en Excel, se grafican los datos por medio de una dispersión de líneas suavizadas a una escala logarítmica de base 10, donde se grafica un rango de frecuencias naturales de 0 Hertz a 50 Hertz.

Tabla IV. **Espectral (H/V) estación E22 frecuencia número 74**

Frecuencia	N-S/V	E-O/V	Promedio H/V
1.03	0.48	1.37	0.92
1.07	0.67	1.88	1.27
1.12	0.95	3.66	2.30
1.17	0.91	2.72	1.81
1.22	0.68	2.70	1.69
1.27	0.77	2.61	1.69
1.32	0.88	3.12	2.00
1.37	0.99	3.40	2.19
1.42	1.08	4.07	2.58
1.46	1.06	4.70	2.88
1.51	1.05	4.84	2.94
1.56	1.06	3.76	2.41
1.61	1.10	3.86	2.48
1.66	0.79	2.69	1.74
1.71	0.75	2.37	1.56
1.76	0.65	1.88	1.26

Continuación tabla IV.

Frecuencia	N-S/V	E-O/V	Promedio H/V
1.81	0.74	2.02	1.38
1.86	0.78	1.81	1.30
1.90	0.62	1.63	1.13
1.95	0.91	1.80	1.36
2.00	0.83	1.62	1.22
2.05	0.79	1.54	1.16
2.10	0.76	1.48	1.12
2.15	1.09	1.43	1.26
2.20	1.28	1.54	1.41
2.25	1.17	1.11	1.14
2.29	1.43	1.36	1.40
2.34	1.39	1.47	1.43
2.39	1.30	1.35	1.33
2.44	1.47	2.03	1.75
2.49	1.41	2.35	1.88
2.54	0.89	2.23	1.56
2.59	0.65	2.01	1.33
2.64	0.69	2.04	1.37
2.69	0.97	2.05	1.51
2.73	1.25	2.28	1.77
2.78	1.55	1.97	1.76
2.83	1.56	1.88	1.72
2.88	1.48	1.91	1.70
2.93	1.68	2.05	1.86
2.98	1.48	1.73	1.60
3.03	1.39	1.68	1.54
3.08	1.37	1.61	1.49
3.13	1.24	1.54	1.39
3.17	1.11	1.59	1.35
3.22	1.06	1.56	1.31
3.27	1.07	1.50	1.28
3.32	1.10	1.25	1.18
3.37	0.68	0.81	0.74

Continuación tabla IV.

Frecuencia	N-S/V	E-O/V	Promedio H/V
3.42	0.46	0.64	0.55
3.47	0.40	0.65	0.52
3.52	0.37	0.66	0.52
3.56	0.36	0.67	0.51
3.61	0.37	0.63	0.50
3.66	0.37	0.63	0.50
3.71	0.32	0.61	0.46
3.76	0.31	0.60	0.45
3.81	0.36	0.69	0.53
3.86	0.55	0.89	0.72
3.91	0.69	0.90	0.80
3.96	0.72	0.97	0.85
4.00	0.74	1.06	0.90
4.05	0.74	1.04	0.89
4.10	0.68	0.96	0.82
4.15	0.64	0.88	0.76
4.20	0.75	0.97	0.86
4.25	0.73	0.91	0.82
4.30	0.75	0.93	0.84
4.35	0.75	0.98	0.87
4.39	0.66	1.00	0.83
4.44	0.55	0.99	0.77
4.49	0.50	0.94	0.72
4.54	0.50	0.86	0.68
4.59	0.47	0.80	0.64
4.64	0.48	0.81	0.65
4.69	0.54	0.88	0.71
4.74	0.48	0.88	0.68
4.79	0.44	0.85	0.65
4.83	0.43	0.87	0.65
4.88	0.39	0.88	0.64
4.93	0.43	1.07	0.75
4.98	0.48	1.32	0.90

Continuación tabla IV.

Frecuencia	N-S/V	E-O/V	Promedio H/V
5.03	0.51	1.41	0.96
5.08	0.52	1.44	0.98
5.13	0.52	1.49	1.00
5.18	0.53	1.46	1.00
5.22	0.55	1.53	1.04
5.27	0.61	1.64	1.12
5.32	0.57	1.66	1.11
5.37	0.63	1.78	1.20
5.42	0.72	2.04	1.38
5.47	0.74	2.10	1.42
5.52	0.66	1.89	1.28
5.57	0.64	1.71	1.17
5.62	0.61	1.48	1.05
5.66	0.70	1.67	1.19
5.71	0.75	1.67	1.21
5.76	0.74	1.65	1.19
5.81	0.75	1.66	1.20
5.86	0.76	1.80	1.28
5.91	0.83	2.01	1.42
5.96	0.80	2.05	1.42
6.01	0.82	2.11	1.47
6.05	0.87	2.18	1.52
6.10	0.86	2.07	1.47
6.15	0.84	2.07	1.46
6.20	0.98	2.43	1.70
6.25	1.10	2.81	1.96
6.30	0.99	2.54	1.77
6.35	0.99	2.44	1.71
6.40	0.89	2.21	1.55
6.45	0.81	2.05	1.43
6.49	0.83	2.04	1.43
6.54	0.83	2.03	1.43
6.59	0.82	2.08	1.45

Continuación tabla IV.

Frecuencia	N-S/V	E-O/V	Promedio H/V
6.64	0.82	2.05	1.43
6.69	0.80	1.81	1.30
6.74	0.80	1.88	1.34
6.79	0.78	1.79	1.29
6.84	0.70	1.80	1.25
6.88	0.69	1.88	1.28
6.93	0.70	1.83	1.27
6.98	0.77	2.02	1.40
7.03	0.71	1.86	1.29
7.08	0.70	1.79	1.24
7.13	0.81	1.90	1.36
7.18	0.84	1.95	1.39
7.23	0.80	1.93	1.36
7.28	0.81	2.02	1.41
7.32	0.80	2.01	1.41
7.37	0.79	1.97	1.38
7.42	0.79	1.99	1.39
7.47	0.78	1.92	1.35
7.52	0.79	1.78	1.29
7.57	0.80	1.77	1.28
7.62	0.79	1.66	1.22
7.67	0.83	1.67	1.25
7.71	0.89	1.69	1.29
7.76	0.91	1.69	1.30
7.81	0.91	1.77	1.34
7.86	0.91	1.54	1.23
7.91	0.92	1.35	1.13
7.96	0.96	1.39	1.18
8.01	1.03	1.45	1.24
8.06	0.96	1.41	1.19
8.11	0.97	1.37	1.17
8.15	1.16	1.37	1.27
8.20	1.29	1.39	1.34

Continuación tabla IV.

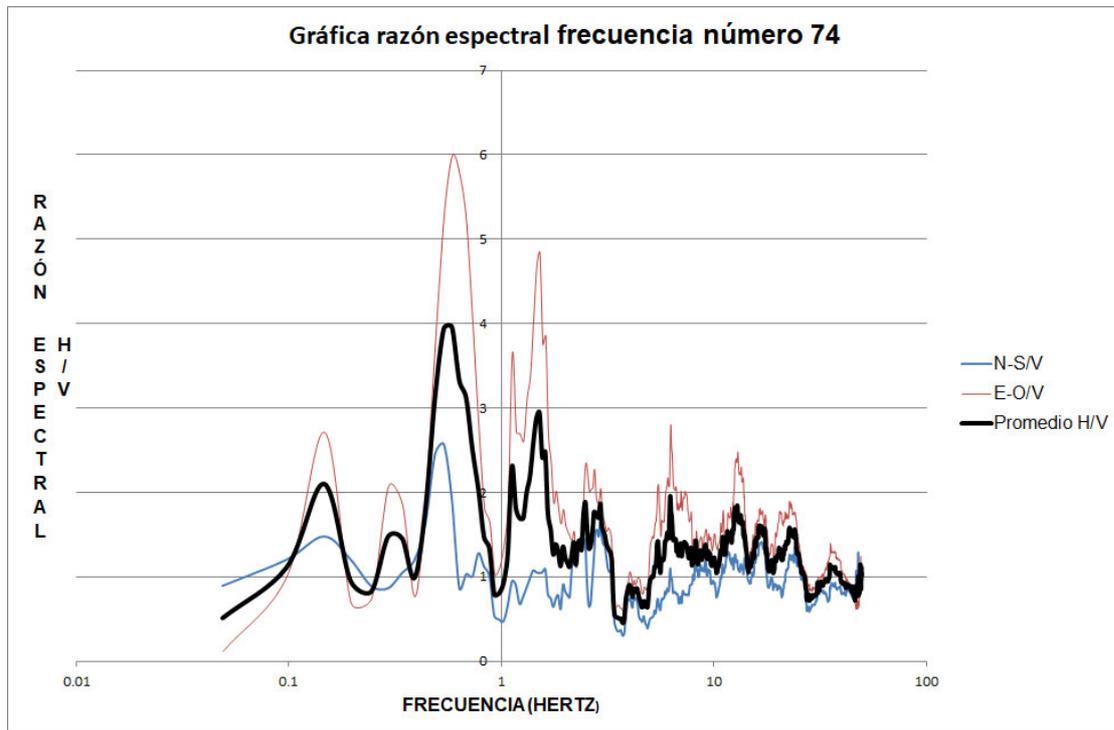
Frecuencia	N-S/V	E-O/V	Promedio H/V
8.25	1.31	1.55	1.43
8.30	1.17	1.42	1.29
8.35	1.07	1.29	1.18
8.40	1.09	1.27	1.18
8.45	1.01	1.28	1.14
8.50	1.00	1.42	1.21
8.54	1.02	1.44	1.23
8.59	1.10	1.45	1.27
8.64	1.12	1.47	1.29
8.69	1.14	1.48	1.31
8.74	1.11	1.42	1.27
8.79	1.08	1.32	1.20
8.84	1.11	1.34	1.22
8.89	1.09	1.38	1.24
8.94	1.07	1.45	1.26
8.98	1.07	1.48	1.28
9.03	1.07	1.48	1.28
9.08	1.15	1.54	1.34
9.13	1.19	1.56	1.37
9.18	1.19	1.57	1.38
9.23	1.12	1.53	1.33
9.28	1.02	1.44	1.23
9.33	1.02	1.40	1.21
9.38	1.05	1.42	1.23
9.42	1.10	1.51	1.30
9.47	1.06	1.49	1.28
9.52	1.06	1.45	1.26
9.57	1.08	1.44	1.26
9.62	1.08	1.48	1.28
9.67	0.99	1.42	1.20
9.72	0.92	1.38	1.15
9.77	0.95	1.32	1.13
9.81	0.94	1.31	1.13

Continuación tabla IV.

Frecuencia	N-S/V	E-O/V	Promedio H/V
9.86	0.95	1.36	1.16
9.91	0.96	1.42	1.19
9.96	0.92	1.45	1.19
10.01	0.92	1.51	1.22

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfica espectral (H/V) estación E22 frecuencia número 74**



Fuente: elaboración propia.

Derivado de lo anteriormente se presenta el levantamiento de campo con el uso acelerógrafo Altus Kinemetricks modelo K2 y serial número 851 efectuando 55 estaciones, cada estación contiene tres mediciones de frecuencias, dando como resultado 165 mediciones de frecuencia, adicionalmente se presenta la frecuencia promedio (FP), de cada estación.

Tabla V. **Estación con tres frecuencias y promedio**

Estación	F1	F2	F3	Frecuencia promedio (Fp)
E1	f2 2.14	f5 1.71	f6 1.76	1.87
E2	f8 2.78	f9 1.27	f10 3.17	2.41
E3	f13 3.42	f14 2.98	f15 2.54	2.98
E4	f16 3.13	f17 3.66	f18 1.17	2.65
E5	f19 2.44	f20 3.37	f21 2.73	2.85
E6	f174 1.22	f176 3.66	f177 2.64	2.51
E7	f22 1.22	f23 1.32	f24 1.22	1.25
E8	f25 1.27	f26 1.37	f28 1.66	1.43
E9	f29 2.83	f30 1.61	f31 2.79	2.41
E10	f32 1.17	f33 1.80	f34 1.66	1.54
E11	f35 1.27	f36 1.22	f37 1.56	1.35
E12	f38 1.51	f39 1.61	f41 1.86	1.66
E13	f42 2.54	f43 1.81	f44 2.64	2.33

Continuación tabla V.

Estación	F1	F2	F3	Frecuencia promedio (Fp)
E14	f45 1.76	f46 1.81	f47 2.54	2.04
E15	f48 1.17	f49 1.27	f50 1.27	1.24
E16	f52 1.27	f54 1.56	f55 2.44	1.76
E17	f56 1.81	f57 3.66	f58 3.96	3.14
E18	f60 2.69	f61 1.81	f62 1.86	2.12
E19	f63 1.42	f64 1.42	f65 2.59	1.81
E20	f66 2.4	f67 2.69	f69 2.25	2.45
E21	f70 1.76	f71 1.66	f72 1.66	1.69
E22	f73 2.34	f74 1.51	f75 1.46	1.77
E23	f77 1.61	f78 1.71	f79 1.27	1.53
E24	f81 1.56	f82 1.81	f83 1.61	1.66
E25	f84 1.81	f85 1.37	f86 1.42	1.53
E26	f87 1.46	f89 2.49	f90 2.69	2.21
E27	f91 1.42	f92 2.64	f93 4.1	2.72
E28	f95 1.27	f96 1.17	f97 1.61	1.35
E29	f98 1.27	f99 1.17	f100 1.46	1.30
E30	f101 1.51	f103 1.37	f104 1.46	1.45

Continuación tabla V.

Estación	F1	F2	F3	Frecuencia promedio (Fp)
E31	f105 1.37	f106 1.42	f107 1.71	1.50
E32	f109 1.32	f110 1.56	f111 1.51	1.46
E33	f112 3.56	f113 3.76	f114 4.2	3.84
E34	f117 6.79	f118 2.69	f119 1.61	3.70
E35	f122 1.12	f123 1.61	f124 1.66	1.46
E36	f129 1.22	f130 2.34	f131 1.22	1.59
E37	f132 2.20	f133 1.03	f134 2.69	1.97
E38	f135 1.42	f136 1.22	f137 1.61	1.42
E39	f138 1.66	f139 1.32	f140 1.27	1.42
E40	f141 2.44	f142 1.76	f143 3.52	2.57
E41	f144 1.66	f145 1.22	f146 4.54	2.47
E42	f147 1.32	f148 3.27	f149 1.61	2.07
E43	f150 1.61	f151 1.71	f152 1.22	1.51
E44	f153 1.22	f154 1.81	f155 1.27	1.43
E45	f156 2.78	f157 2.34	f158 1.71	2.28
E46	f159 2.64	f160 2.2	f161 4.25	3.03
E47	f163 1.03	f164 1.71	f165 1.81	1.52
E48	f166 1.95	f167 2.83	f168 1.27	2.02

Continuación tabla V.

Estación	F1	F2	F3	Frecuencia promedio (Fp)
E49	f170 1.46	f171 1.66	f173 2.54	1.89
E50	f178 2.69	f179 3.71	f180 3.66	3.35
E51	f181 3.71	f182 3.81	f183 5.18	4.23
E52	f185 4.39	f186 3.86	f187 3.71	3.99
E53	f191 1.12	f192 7.47	f193 2.88	3.82
E54	f194 1.27	f195 1.56	f196 2.54	1.79
E55	f197 3.37	f198 4.2	f199 4.44	4.00

Fuente: elaboración propia.

3.6. Geoposicionamiento de las frecuencias promedios

Mediante un sistema de información geográfica Google Earth Pro se tomaron las coordenadas UTM, es decir el sistema de coordenadas transversal de Mercator, para la ubicación de cada estación.

Tabla VI. **Coordenadas UTM en cada estación**

Estación	Coordenadas UTM		Frecuencia promedio (Fp)
	X	Y	
E1	659885	1640625	1.87
E2	659907	1640709	2.41

Continuación tabla VI.

Estación	Coordenadas UTM		Frecuencia promedio (Fp)
	X	Y	
E3	659986	1640628	2.98
E4	660072	1640700	2.65
E5	659967	1640785	2.85
E6	660044	1640843	2.51
E7	660221	1640825	1.25
E8	660114	1640914	1.43
E9	660147	1641000	2.41
E10	660297	1640886	1.54
E11	660383	1640821	1.35
E12	660225	1640694	1.66
E13	660035	1640551	2.33
E14	660107	1641093	2.04
E15	660223	1641187	1.24
E16	660284	1641022	1.76
E17	660053	1641248	3.14
E18	660313	1641490	2.12
E19	660389	1641556	1.81
E20	660526	1641674	2.45
E21	660733	1641492	1.69
E22	660649	1641657	1.77
E23	660445	1641841	1.53
E24	660593	1641492	1.66
E25	660382	1641435	1.53
E26	660866	1641480	2.21
E27	660956	1641403	2.72
E28	660771	1641399	1.35
E29	660704	1641218	1.30
E30	660691	1641064	1.45
E31	660858	1641262	1.50
E32	660596	1641254	1.46
E33	660155	1641615	3.84
E34	660086	1642080	3.70
E35	660594	1641372	1.46

Continuación tabla VI.

Estación	Coordenadas UTM		Frecuencia promedio (Fp)
	X	Y	
E36	660346	1640488	1.59
E37	660174	1640463	1.97
E38	660205	1640563	1.42
E39	660283	1640653	1.42
E40	660437	1640776	2.57
E41	660540	1640816	2.47
E42	660394	1640682	2.07
E43	660449	1640651	1.51
E44	660449	1641252	1.43
E45	660374	1641310	2.28
E46	660210	1641292	3.03
E47	660594	1640984	1.52
E48	660447	1641009	2.02
E49	660456	1641140	1.89
E50	659852	1640697	3.35
E51	659838	1641011	4.23
E52	660920	1640949	3.99
E53	660860	1640759	3.82
E54	660786	1640551	1.79
E55	660519	1640370	4.00

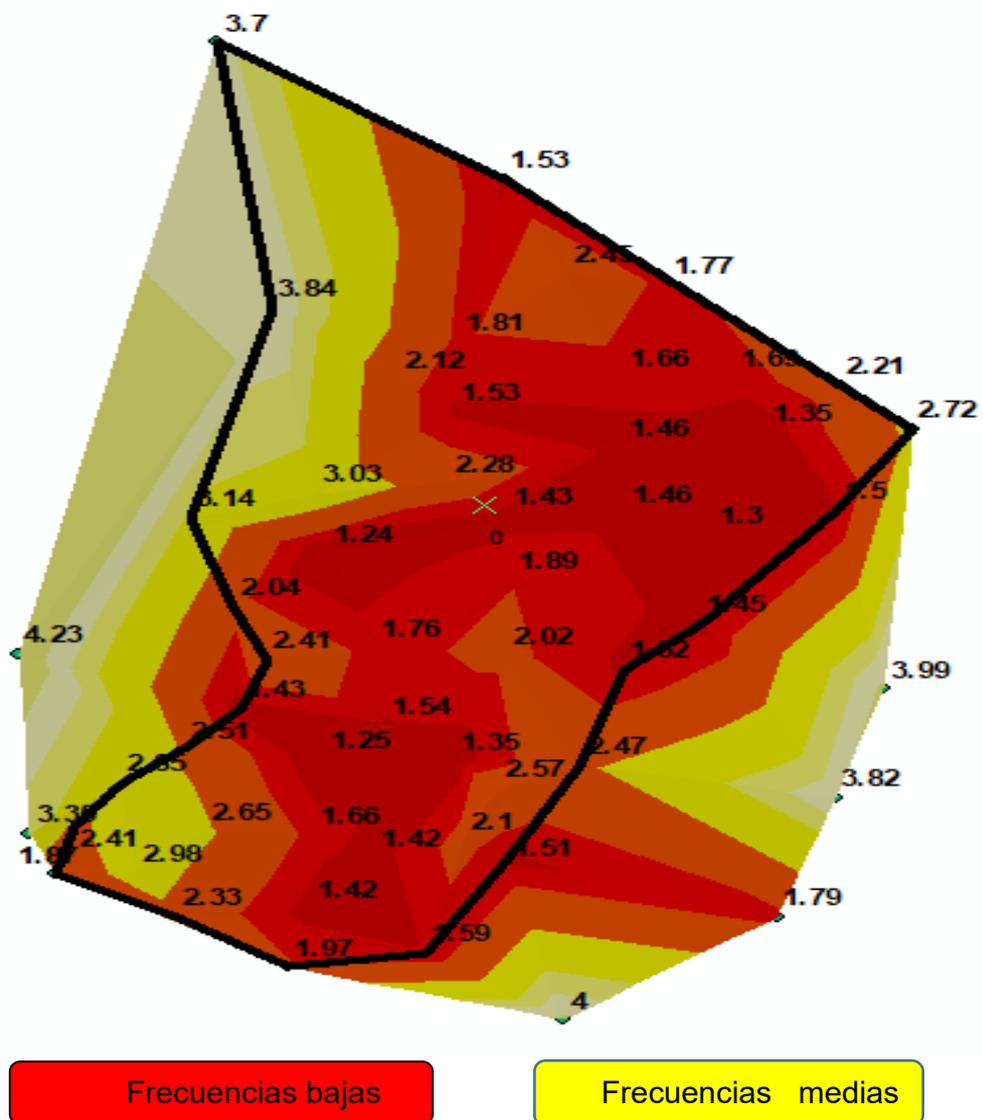
Fuente: elaboración propia.

3.7. Mapa de microzonificación sísmica de la zona 2

Con el conjunto de números de mediciones de frecuencias promedios y el respectivo geoposicionamiento de cada estación, se ingresa al *software* geográfico Arcmap de Argis para crear una nube de punto de cada intersección de las calles, siendo un total de cincuenta y cinco estaciones para determinar las curvas de nivel de superficie de las frecuencias promedios.

En la figura 19 se puede apreciar que la zona 2 de Quetzaltenango se tiene en su mayoría frecuencias naturales bajas entre valores de un 1 Hertz a 2.5 Hertz.

Figura 19. **Mapa de la microzonificación zona 2 frecuencia natural**



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa ArcMap.

3.8. Curvas de razón espectral H/V promedio

Se tomaron todos los archivos que contienen promedios de razón espectral H/V por cada estación, posteriormente se generó una matriz que contiene una columna de valores de frecuencia y columnas con valores de amplificación de la razón espectral que están asociados a una frecuencia en particular.

Seguidamente se elaboró una columna con el promedio de todos los espectros de la razón espectral H/V, para obtener una curva promedio.

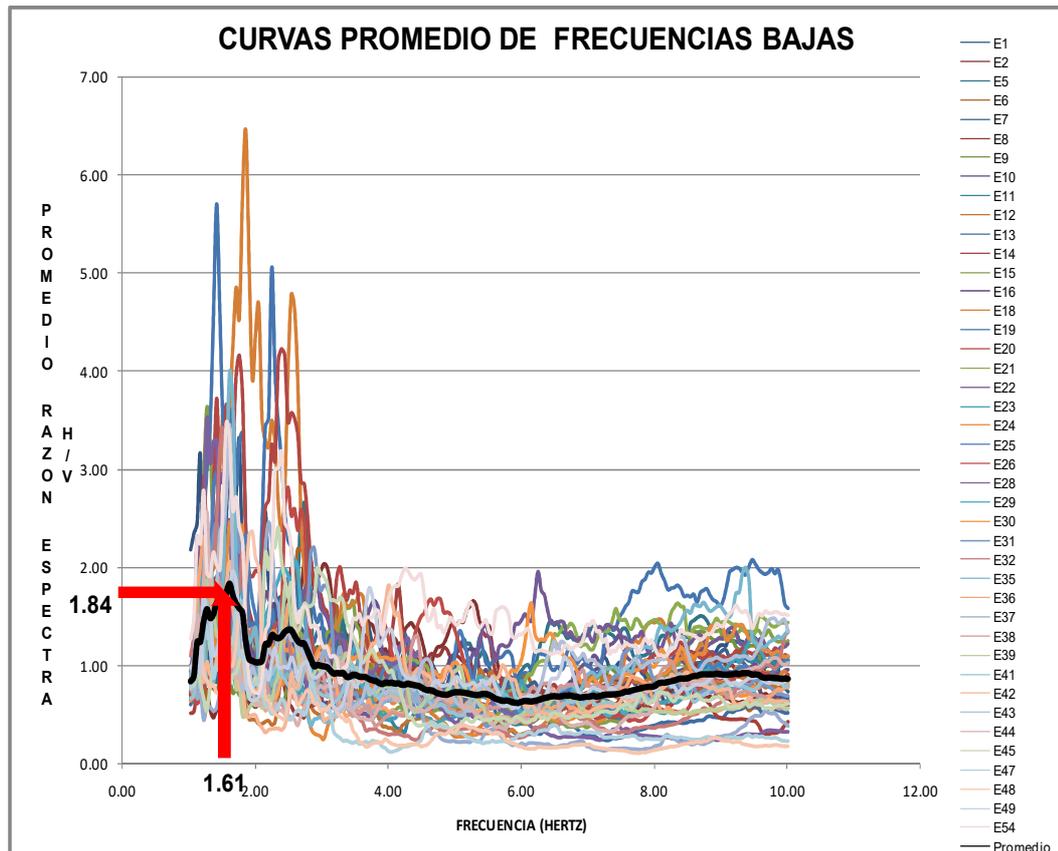
Posteriormente en la curva promedio se generó la máxima amplitud relacionada con su frecuencia en Hertz para obtener curvas de frecuencias bajas y curvas de frecuencias medias para la zona 2 del municipio de Quetzaltenango.

3.9. Curvas de frecuencias bajas

En la zona 2 de Quetzaltenango se identificaron cuarenta y dos estaciones con frecuencias bajas promedio, ver figura número 19, color rojo, se encuentran entre el rango de 1 Hertz a 2.5 Hertz, que se evidencian como características del lugar.

En la figura 20 se observa que la amplitud máxima es de 1.84, la cual se asocia con una frecuencia promedio baja de 1.61 Hertz, que es una característica del tipo de suelo de la zona 2 de Quetzaltenango.

Figura 20. Gráfica de curvas promedio de frecuencias bajas



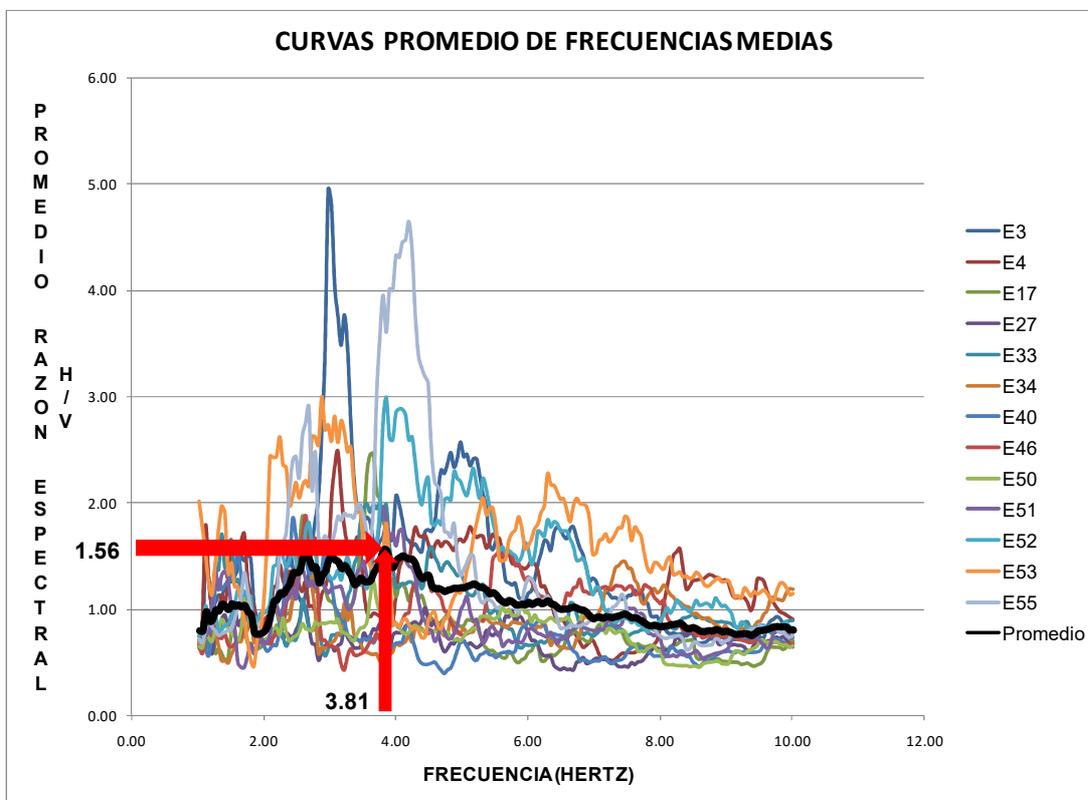
Fuente: elaboración propia.

3.10. Curvas de frecuencias medias

En la zona 2 de Quetzaltenango se identificaron trece estaciones con frecuencias medias promedio, ver figura número 19, color verde, se encuentra entre el rango de 2.5 Hertz a 5.5 Hertz, que son características del lugar.

En la figura 21 se observa que la amplitud máxima es de 1.56, la cual se asocia con una frecuencia promedio media de 3.81 Hertz, que es una característica de tipo de suelo de la zona 2 de Quetzaltenango.

Figura 21. **Gráfica de curvas promedio de frecuencias medias**



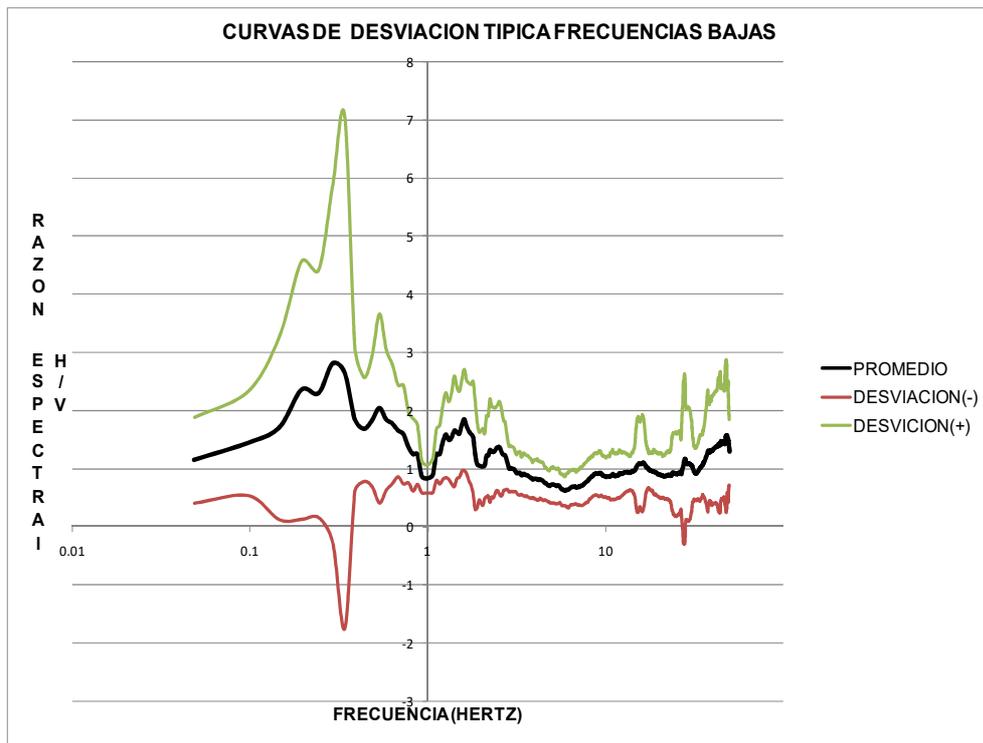
Fuente: elaboración propia.

3.11. Velocidad de onda de corte frecuencias bajas

El modelo de velocidad de onda de corte está basado por las curvas de frecuencia bajas, con la siguiente información: a) frecuencia, b) promedio

espectral, c) y la desviación típica espectral negativa y positiva que a continuación se presenta.

Figura 22. **Gráfica de la desviación típica de las frecuencias bajas**

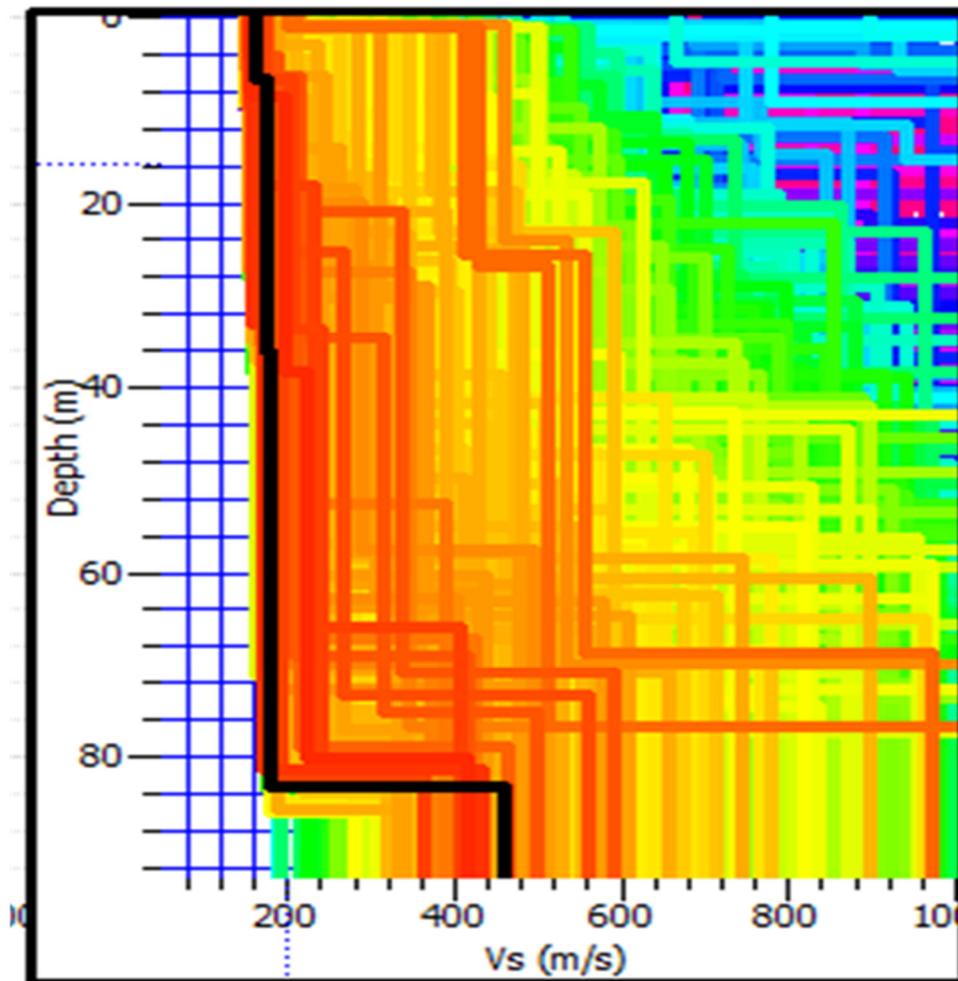


Fuente: elaboración propia.

Posteriormente se aplica un programa de algoritmo matemático denominado Dinver y se opta por Surface Wave Inversión, luego se hace clic en Ellipticity target y se carga el archivo que contiene puntos promedio de frecuencias, relaciones espectrales de Nakamura y sus desviaciones típicas para generar una curva de dispersión, para determinar la estratigrafía del terreno.

En el programa Dinver, en la opción parámetro, se aplican las capas de terreno con diferentes densidades (kg/mts.3) que van desde 1200 kg/mts.3 a 1800 kg/mts.3 para que el programa busque la inversión de datos y genere la gráfica de profundidad versus velocidad de onda de corte.

Figura 23. **Gráfica de velocidad de onda de corte frecuencias bajas**



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Dinver.

En la figura anterior, en color negro, se establece el perfil de velocidad de onda de corte del terreno con la siguiente información.

Tabla VII. **Perfil de velocidad de onda de corte de frecuencia bajas**

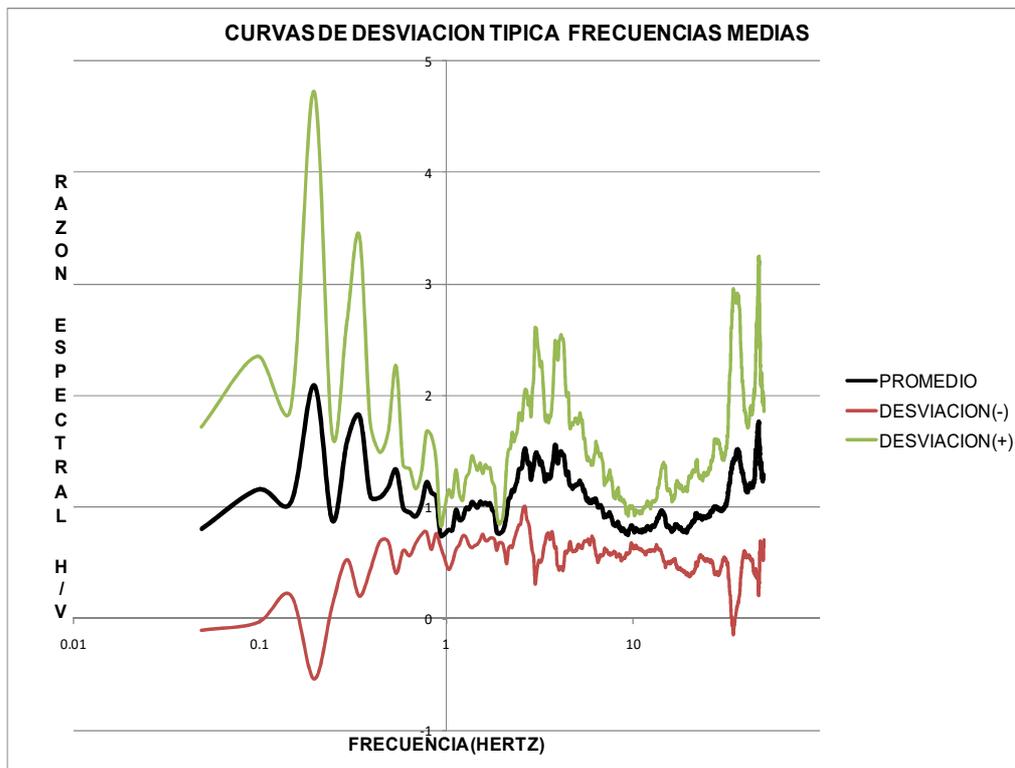
Estrato	Profundidad Metros	Vs inicial m/s	Vs final m/s
I	7	150	170
II	36	170	180
III	84	180	460

Fuente: elaboración propia.

3.12. Velocidad de onda de corte frecuencias medias

El modelo de velocidad de onda de corte está basado por las curvas de frecuencia medias, con la siguiente información: a) frecuencia, b) promedio, espectral, c) y la desviación típica espectral negativa y positiva que a continuación se presenta.

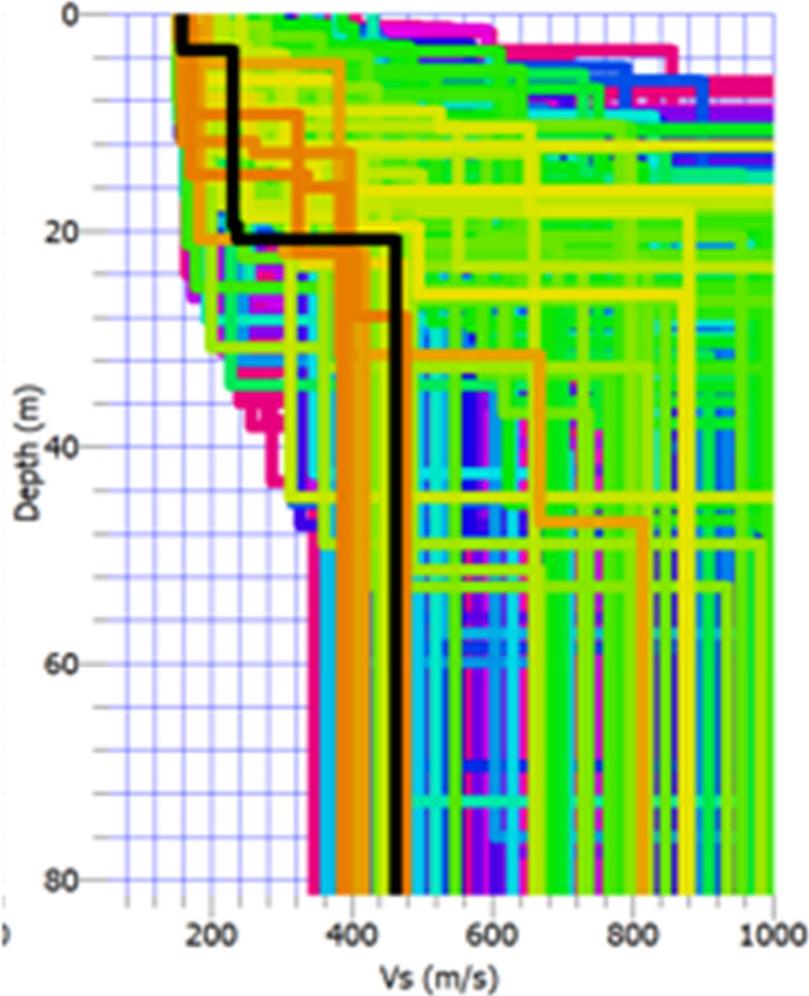
Figura 24. Gráfica de la desviación típica de las frecuencias medias



Fuente: elaboración propia.

Seguidamente se tiene el mismo procedimiento de velocidad de onda corte de frecuencias bajas con el programa de algoritmo matemático Dinver, para obtener como resultado modelo de velocidad de onda corte para frecuencias medias a diferentes profundidades.

Figura 25. Gráfica de velocidad de onda de corte frecuencias medias



Fuente: elaboración propia, realizado con el programa Dinver.

En la figura anterior, en color negro se establece el perfil de velocidad de onda de corte del terreno con la siguiente información.

Tabla VIII. **Perfil de velocidad de onda de corte de frecuencias medias**

Estrato	Profundidad Metros	Vs. inicial m/s	Vs. final m/s
I	5	160	240
II	21	240	470

Fuente: elaboración propia.

3.13. Clasificación de tipo de suelo NSE 2.1

Con base a la Norma de Seguridad Estructural para Guatemala, Edición 2018, NSE 2.1, el sistema de clasificación de tipo de suelo para la zona 2 del municipio de Quetzaltenango, está basado en los resultados del método velocidad de propagación de ondas de corte, para diferentes profundidades, este ensayo permite determinar el perfil de suelo en los primeros treinta metros como lo establece la Norma NSE 2.1, anexo A, cabe mencionar que este método es de suma importancia para la ingeniería sísmica y geotécnica. Por lo consiguiente en tabla IX se concluye el tipo de suelo para la zona 2, del municipio de Quetzaltenango.

Tabla IX. **Clasificación del tipo de suelo frecuencias bajas y medias**

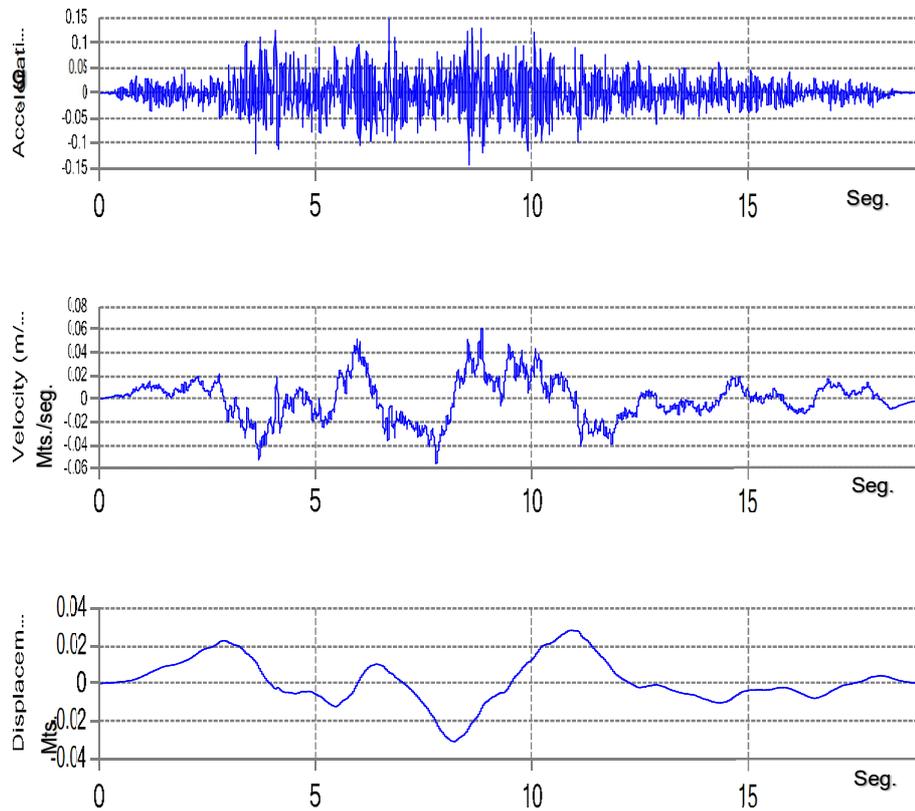
Microzonificación	Velocidad onda corte (Vs)	Clase de suelo	Perfil de suelo
Frecuencias bajas	$V_s < 183$	E	Perfil de suelo suave
Frecuencias Medias	470	C	Suelo denso y roca suave

Fuente: elaboración propia.

3.14. Espectros de respuesta y diseño frecuencias bajas

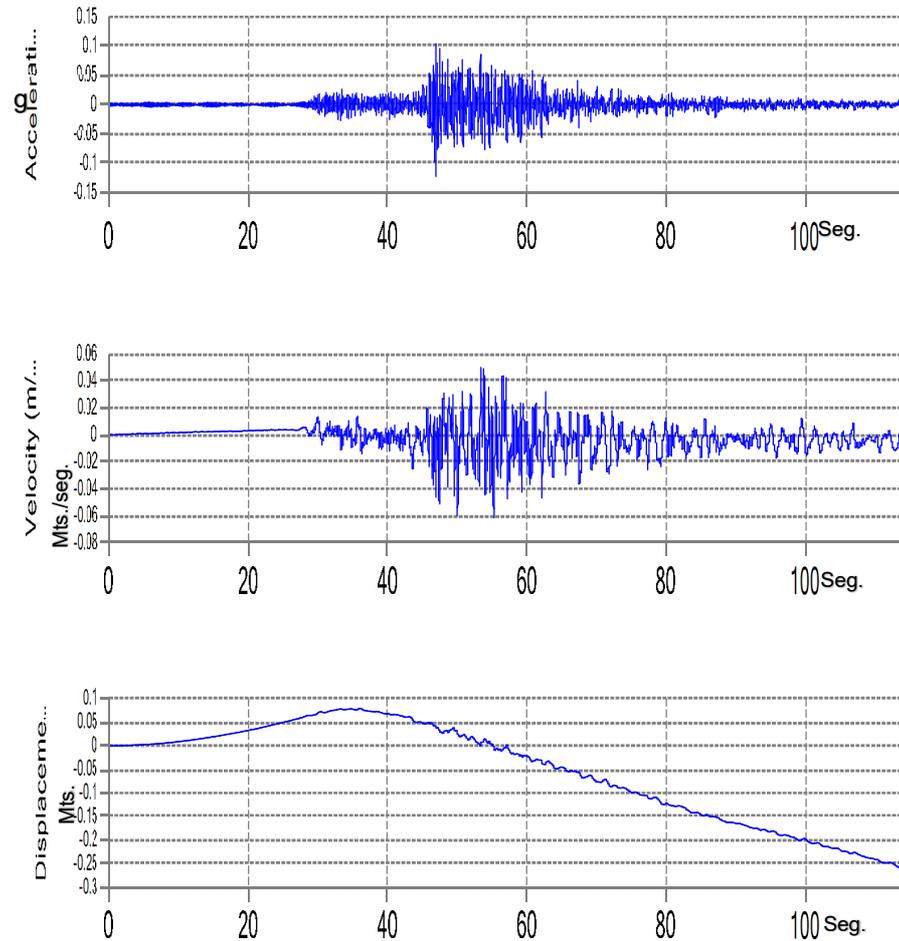
A continuación, se muestra la gráfica de un sismo de Nahanni figura 26, de un sismo de Retalhuleu figura 27 y el espectro de respuesta figura 28.

Figura 26. Gráfica de sismo real Nahanni, 1985, Mw. 6.9



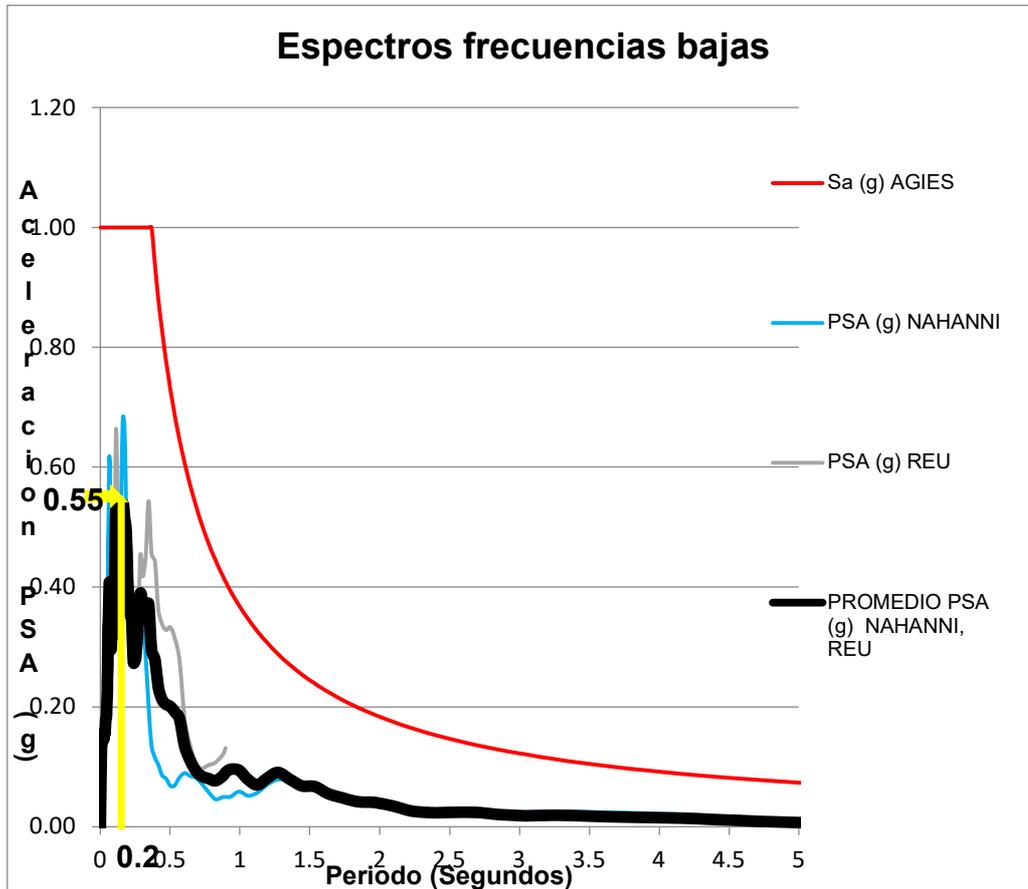
Fuente: Programa Deepsoil 6.1. (2016). Programa disponible para estudiantes.
Consultado el 04 de julio 2021. Recuperado de <http://deepsoil.cee.illinois.edu/Publications>.

Figura 27. **Gráfica de sismo real Retalhuleu, 27/09/2020, M 5.5**



Fuente: Programa de Ingeniería. (2021). *Programas disponibles para estudiantes*
Consultado el 04 de julio 2021. Recuperado de
<https://srlabs.a2hosted.com/rshumhub/index.php?r=space%2Fspace&cguid=03950cae-05e2-4fd7-bf0a-dec672c0e613>.

Figura 28. Gráfica de espectros frecuencias bajas



Fuente: elaboración propia.

En las gráficas 26 y 27, se tiene el evento del sismo real de Nahanni y el evento del sismo real de municipio de Retalhuleu, para posteriormente analizar la respuesta sísmica de sitio por medio de programa Deepsoil, utilizando el método lineal equivalente se ingresan los sismos mencionados anteriormente, y el perfil estratigráfico de la velocidad de propagación de onda de corte de frecuencias bajas, con un factor de amortiguamiento del 5 %, dando como resultado el espectro de respuesta de sitio que es la curva gruesa de color negro,

figura 27, logrando como resultado una aceleración pico aproximada de 0.55 g con un período de 0.20 segundos.

Por otra parte, en la figura 28, en la curva de color rojo se tiene el espectro de diseño de AGIES 2018 para el Municipio de Quetzaltenango, además se puede observar que dos sismos caen en la envolvente del espectro diseño AGIES, por lo que se puede considerar un diseño adecuado para futuras construcciones. A continuación, se presentan parámetros de cómo se elaboró el espectro de AGIES 2018.

Tabla X. **Espectro AGIES municipio de Quetzaltenango**

ESPECTRO AGIES MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO		
Índice de sismicidad	Io	4.2
Aceleración espectral período corto	Scr	1.55 g
Aceleración espectral período largo	S1s	0.55g
Clase de obra		Ordinaria
Tipo de protección		D
Clase de sitio tipo		E
Coeficiente de sitio	Fa	1
Coeficiente de sitio	Fv	1
Ajuste por intensidad sísmica especial		
Períodos cortos de vibración	Na	1
Períodos largos de vibración	Nv	1
Ajuste por intensidad sísmica	Scs	1.5
Ajuste por intensidad sísmica	S1s	0.55
Sismo de diseño P.E 10% en 50 años	Kd	2/3
Aceleración espectral periodo corto diseño	Scd	1.00
Aceleración espectral período largo diseño	S1d	0.36
Período de transición (segundos)	Ts	0.37
Período de inicio (segundos)	To	0.07

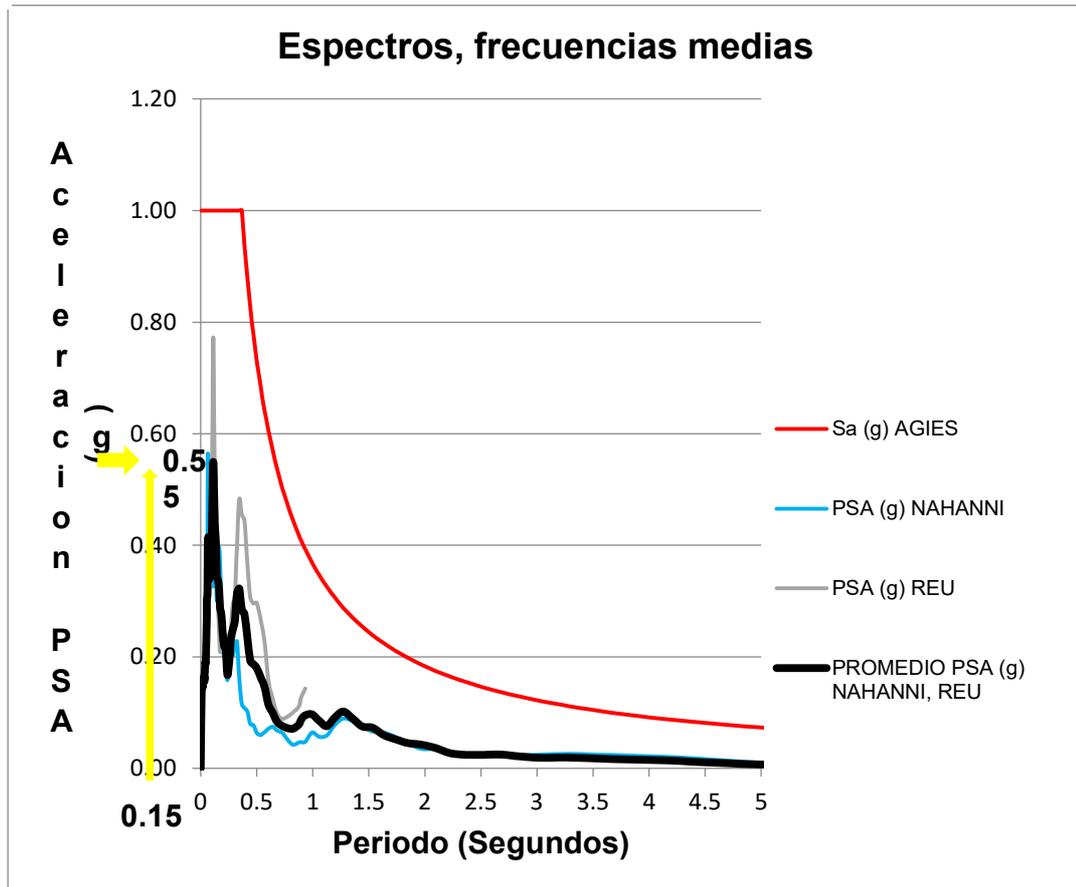
Fuente: elaboración propia.

3.15. Espectros de respuesta y diseño frecuencias medias

En la figura 29, se utilizaron los mismos parámetros de eventos de sismos reales y el procedimiento como el programa Deepsoil, ingresando el perfil estratigráfico de la velocidad de propagación de onda de corte de frecuencias medias, con un factor de amortiguamiento del 5 %, dando como resultado el espectro de respuesta de sitio que es la curva gruesa de color negro, logrando como resultado una aceleración pico aproximada de 0.55 g con un periodo de 0.15 segundos.

Por otra parte, en la figura 29, en la curva de color rojo se tiene el espectro de diseño de AGIES 2018 para el municipio de Quetzaltenango, además se puede observar que dos sismos caen en la envolvente del espectro diseño AGIES, por lo que se puede considerar un diseño adecuado para futuras construcciones.

Figura 29. Gráfica de espectros frecuencias medias



Fuente: elaboración propia.

3.16. Estudios geotécnicos del área de estudio

Marroquín (2006), elaboró cuatro perforaciones con barreno tubular y una de pozo a cielo abierto, con diferentes profundidades, ubicadas entre la sexta y séptima avenida y entre la primera y cuarta calle de la zona 2. Como resultado de las perforaciones realizadas, definió el área como suelos críticos, que presentan tres diferencias que son: suelos orgánicos, suelos altamente saturados

y suelos limo arcillosos elastocompresibles. Cabe mencionar que, en el área se tiene la presencia del nivel freático a diferentes profundidades muy cercano a la superficie, con una resistencia al corte muy deficiente y un porcentaje de humedad muy elevado. En el anexo 2 se presentan tablas, resultados de los ensayos de perforación correspondientes.

Tabla XI. **Perforación con barreno tubular**

Perforación con barreno tubular (PBT6)			
Ubicación	7 avenida entre 3 calle y 4 calle de la Zona 2		
Muestra núm.	1	2	3
Profundidad (m)	0.80-2.80	2.80-3.50	3.50-4.50
Clasificación suelo S.U.	MH	SM	OH
Color	café	café gris	negro
Tipo	Limo arcilloso	Arena limosa	Limo orgánico
Límite líquido	87.6	37.4	52.4
Límite plástico	50.7	32.9	37.9
Índice plástico	36.9	4.5	14.5
% Humedad natural	81	30.5	68
Índice liquidez	0.82	-	2.08
Peso unitario natural Kg/m ³	1,450	1,713	1,515
Gravedad específica	2.53	2.67	2.53
Relación de vacíos	2.16	1.21	1.81
Nivel freático	1.20 metros		
qu (T/m ²)	6.1		5.5

Fuente: Marroquín. (2006). *Detección de suelos críticos para la construcción en los siguientes sectores: A) entre la 3a. calle "D" de la zona 1 y la rotonda de la zona 2, entre la 6a y 7a. av. zona 2. B) entre 17 y 19 av. entre la 1 y 4 calle zona 3, de la ciudad de Quetzaltenango.*

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Luego de realizar los estudios correspondientes al suelo de la zona 2 de Quetzaltenango, a partir de la razón espectral H/V, basada en el ruido ambiental, se determina que las frecuencias naturales tienen un comportamiento similar en toda el área de estudio.

En la clasificación del tipo suelo NSE 2.1, para las frecuencias bajas se tiene una velocidad de onda de corte menor a 185 m/s, con una clase de suelo tipo E, y el perfil de suelo se caracteriza por ser suave; y combinado con el análisis geotécnico a diferentes profundidades, se puede observar suelos críticos que tiene características de ser suelo limos arcillosos elastocompresibles o suelo altamente saturado, especialmente que se encuentra un nivel freático muy cercano a la superficie, por lo que se considera para las frecuencias bajas en términos de ingeniería sísmica un suelo blando.

En las frecuencias medias la velocidad de propagación encontrada es alta de 470 m/s, con una clase de suelo tipo C, y la estratigrafía de suelo es denso o roca suave, en el cual se puede suponer el inicio de un capa de mayor dureza.

Se hallaron las curvas de promedio espectral H/V, por medio de señal estable, que contienen la amplificación máxima producida por la geología local de terreno, asociada con la frecuencia natural, las que se presentan en un mapa de zonificación sísmica de la zona 2, de la ciudad de Quetzaltenango, por medio de la frecuencia natural del suelo utilizando el método de Nakamura, llamado también o de Razón Espectral H/V.

El estudio contiene 55 estaciones de mediciones, con tres lecturas de mediciones de frecuencias, siendo un total de 165 lecturas de medición, dando como resultado una frecuencia promedio. Se utilizó el programa Degtra para realizar el procesamiento de las mediciones, mediante el cual se aplicó el método de la razón espectral H/V, posteriormente se encontraron las máximas amplificaciones con su respectiva frecuencia natural de suelo. A partir del programa Arcmap, se elaboró un mapa de frecuencias naturales para la zona 2, el cual permite una aproximación al comportamiento dinámico del suelo. La frecuencia natural es un elemento indispensable para el diseño de sismo resistente de estructuras.

La frecuencia natural predominante del suelo presenta una distribución regular en la zona 2 del municipio de Quetzaltenango, con lo que constituye una homogeneidad del área de estudio.

Se encontró que la amplificación de las ondas sísmicas de la zona 2 de Quetzaltenango, tiene valores de frecuencia bajas, entre 1 a 2.5 Hertz, por lo que se considera propensa a sufrir períodos largos de vibración de 1 a 0.4 segundos. Esto se debe a que el suelo es blando, dado que tiene las características de ser un suelo crítico. Adicionalmente, también se encontraron valores de frecuencia medias, entre 2.5 a 5.5 Hertz, que pueden llegar a tener períodos cortos de vibración de 0.4 a 0.18 segundos; esto se debe a que se tiene suelos más rígidos, estos suelos se encuentran en algunos sectores de la periferia de la zona 2.

Con los resultados del análisis de la frecuencia natural suelo y la información de sus propiedades físicas y mecánicas, se pudo determinar que es una zona muy vulnerable a sismo debido a que sus suelos son críticos.

Con la metodología de velocidad de onda de corte fue posible obtener una primera estimación estratigrafía del suelo de la zona 2, especialmente para determinar las primeras capas de suelo.

Según el estudio de microzonificación sísmica de la zona 2, se observó que el sector analizado se encuentra asentado sobre un suelo tipo E, por lo que se considera un suelo suave, donde las estructuras de las edificaciones de gran altura pueden tener efectos de resonancia por periodos largos.

CONCLUSIONES

1. Se prueba la hipótesis de la investigación, ya que se encontró que la frecuencia natural del suelo, de la zona 2 de Quetzaltenango, medido a través de la velocidad de onda de corte, se encuentra dentro de los parámetros de la clasificación de los suelos tipo E y suelos tipo F, de acuerdo a lo especificado según NSE 2.1, de la norma (Asociación Guatemala de Ingeniería Estructural y Sísmica. AGIES., 2018). Adicionalmente, se determinó que el suelo de las áreas que se encuentran en la periferia de la zona 2, tienen un suelo tipo C, de acuerdo con la misma clasificación ya mencionada.
2. En respuesta al objetivo general de la investigación, se realizó un estudio de microzonificación sísmica en la zona 2 de Quetzaltenango, por medio del método de Nakamura, a través del cual se determinó la respuesta del suelo, encontrando que es blando, por lo que responde aumentando su amplificación ante un evento sísmico, lo que significa que afecta a estructuras o edificios altos, haciéndolos más vulnerables.
3. De acuerdo con el primer objetivo específico de la investigación, se determinaron las características que tiene el suelo de la zona 2 de la ciudad de Quetzaltenango, encontrando que se tiene un perfil de suelo suave, con un porcentaje de humedad mayor a 40, con una capacidad de soporte de suelo entre 4 a 8 toneladas por metro cuadrado; y a una altura cercana a la superficie, en un rango de 1.20 a 2.50 metros, se halló nivel freático. Entre las características del suelo se encontraron evidencias de

suelo limo-arcilloso, arena limosa, limo-orgánico, limo elástico, arcilla orgánica con arena y arcilla.

4. El segundo objetivo se identificó en el interior de toda la zona dos de la ciudad de Quetzaltenango, como zona de mayor riesgo determinando, sin embargo, que, los puntos señalados en la periferia son lugares de menor riesgo, respondiendo así al segundo objetivo específico de la investigación.
5. El tercer objetivo de la investigación consistió en calcular la frecuencia natural del suelo de la zona 2 de la ciudad de Quetzaltenango, obteniendo como resultado un promedio de frecuencias naturales de 1.61 Hertz. Se establecieron 43 frecuencias, las cuales se representan mediante un mapa de microzonificación.
6. El cuarto objetivo de la investigación estableció que el perfil del suelo en el interior de la zona 2 es de suelo suave, mientras que en la periferia es de suelo denso y roca suave, esta información se constata mediante los dos estratos hallados para las frecuencias bajas, el primero hallado a 7 metros, con una velocidad de 150 a 170 metros por segundo; el segundo estrato a 36 metros, con una velocidad de 170 a 180 metros por segundo. También se hallaron dos estratos para las frecuencias medias, los cuales son: el primero a 5 metros, con una velocidad de 160 a 240 metros por segundo; el segundo a 21 metros de profundidad, de 240 a 470 metros por segundo.
7. En la gráfica de espectros de frecuencias bajas el espectro de respuesta de sitio es la curva gruesa de color negro, logrando como resultado una

aceleración pico aproximada de 0.55 g con un periodo de 0.20 segundos para la zona 2, de la ciudad de Quetzaltenango.

RECOMENDACIONES

1. El método de HVSR, es una herramienta preventiva, se recomienda que se incorpore en las municipalidades para elaborar un análisis de gestión de riesgos en caso de un sismo, con el objetivo que se garantice la protección de la vida.
2. Es recomendable que en el proceso de desarrollo urbano en la zona 2 de Quetzaltenango, a los dueños de las propiedades, se le proporcione una capacitación con respecto a la composición de la estructura de suelo para la elaboración de proyectos de obra civil.
3. Utilizar el estudio de la microzonificación sísmica de la zona 2 como guía metodológica, será recomendable para evaluar el comportamiento similar en otras zonas del municipio de Quetzaltenango.
4. En los registros obtenidos se observan frecuencias dominantes menores a un Hertz, las cuales son características de los suelos blandos, sin embargo, debido a que el equipo usado no es el más adecuado para ese rango de frecuencias, se recomienda estudiar nuevamente la zona con un equipo más adecuado para confirmar si las frecuencias dominantes del suelo están por debajo de un Hertz.
5. Debido a la presencia del nivel freático a poca profundidad y a los tipos de suelos que se encontraron en el análisis geotécnico, se recomienda realizar un estudio del potencial de licuefacción de suelos, en el área de estudio.

6. Para la construcción de edificios de gran altura, se recomienda realizar estudio de prospección geotécnica para la geología de la zona 2 de Quetzaltenango y evaluar profundidades hasta 30 metros, para obtener una referencia comparativa con el método de la velocidad de onda de corte.

REFERENCIAS

1. Alfaro, A. (2000). *De los microsismos a los microtemblores*. (Monografía de Licenciatura). Universidad Javeriana, Colombia. Recuperado de <https://www.monografias.com/trabajos-pdf4/microsismos-microtemblores/microsismos-microtemblores>.
2. Asociación Guatemala de Ingeniería Estructural y Sísmica. AGIES. (2018). *NSE 2.1 Normas de Seguridad Estructural para Guatemala. Guatemala*: Autor. Recuperado de: <https://www.agies.org/bibliotecas/>.
3. Aula. (2005). *La Litosfera terrestre*. Recuperado de www.aula2005.com/html/cn1eso/04lalitosfera/04lalitosferaes.
4. Bravo, J. (2018). *Microzonificación sísmica para las zonas 2 y 4 empleando el método de razón espectral H/V (método de Nakamura) de la cabecera departamental de San Marcos*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Quetzaltenango. Recuperado de <http://www.ingenieria.cunoc.usac.edu.gt/portal/index.php/1176/trabajo-de-graduacion-sobre-microzonificacion-sismica>.
5. Cabañas, L. (1999). *Caracterización del movimiento del suelo en ingeniería sísmica*. Física de la tierra, 11, 49-79. Recuperado de <https://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/download/FITE9999110049A/12072>.

6. Calderon, J. (2018). *Microzonificación sísmica para las zonas 1 y 3 empleando el método de razón espectral H/V (Método de Nakamura) de la cabecera departamental de San Marcos*. (Tesis de licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Quetzaltenango.
7. Carrilo, C. (2003). *Fundamentos del análisis de Fourier*. Vigo, España: Gamesal.
8. Castro, A. (2016). *Espectro de diseño y zonificación sísmica basada en periodos fundamentales de vibración de suelos, en el área urbana de la ciudad de Mateare*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua. Recuperado de <https://repositorio.unan.edu.ni/2764/1/21724>.
9. Cid, L. (2007). *Estudios de sismos originados por fuentes sismogénicas superficiales ocurridos en Guatemala en el siglo XIX*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2708_C.
10. Cifuentes, P. (2015). *Primera estimación de microzonificación sísmica para la zona 3 de la ciudad Quetzaltenango, utilizando el método de razón espectral H/V*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Quetzaltenango.
11. Estrada, L. (2012). *Apuntes de Sismología*. Universidad Nacional de Tucumán: Argentina.
12. Farfán, J. (2009). *Estudio de vulnerabilidad sísmica estructural en un sector de la zona 12 de la Ciudad Guatemala*. (Tesis de Licenciatura).

Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2990_C.

13. Gamboa, C. (2019). *Microzonificación sísmica en Antigua Guatemala, Sacatepequez, por medio del análisis de vibraciones naturales (H/V) para obtener como resultado una caracterización sísmica del sitio*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Antigua Guatemala. Recuperado de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/14106/1/Carlos%20Jos%C3%A9%20Gamboa%20Cant%C3%A9>.
14. Herráiz, M. (1997). *Conceptos básicos de sismología para ingenieros*. Madrid, España: Cismid.
15. Instituto Nacional de Estadística Guatemala. INE. (2018). *Característica generales de la población*. Guatemala: Autor. Recuperado de <https://www.censopoblacion.gt/censo2018/poblacion>.
16. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala.INSIVUMEH. (2016). *Sismología en Guatemala*. Guatemala: Autor. Recuperado de http://www.insivumeh.gob.gt/folletos/folleto_sismo-1.
17. Jiménez, C. (2014). *Calibración de umbrales de daño sísmico para el análisis de fragilidad sísmica de estructuras de hormigón armado mediante análisis estático no lineal (Pushover)*. (Tesis de Maestría). Universidad Politécnica Catalunya, Barcelona, España. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/21138?locale-attribute=es>.

18. Marroquín, N. (2006). *Detección de suelos críticos para la construcción en los siguientes sectores: A) entre la 3a. calle "D" de la zona 1 y la rotonda de la zona 2, entre la 6a y 7a. av. zona 2. B) entre 17 y 19 av. entre la 1 y 4 calle zona 3, de la ciudad de Quetzaltenango*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Quetzaltenango.
19. Mónzon, H. (2020). *Historia sísmica de Guatemala*. Origen de los sismo en Guatemala. Guatemala.
20. Morales, F. (2012). *Respuesta sísmica local en puntos de la ciudad Granada*. (Tesis Maestria). Universidad de Granada, Granada, España. Recuperado de https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/25130/2012_TFM_MORALES_GAMIZ_FRANCISCO_JAVIER.
21. Pantanalli, J. (2014). *Determinación del periodo fundamental de vibración del suelo aplicando el critero de sesame*. (Tesis Licenciatura). Universidad del Bío- Bío, Chile, Chile. Recuperado de <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/150/4/Saldivia%20P.%2C%20Juan%20C>.
22. Pinto, L. (2016). *Determinación de efectos de sitios en la estación sismologicas de la región de Tarapaca*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Chile, Santiago, Chile. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/137966/Determinacion-de-efectos-de-sitio-en-las-estaciones-sismologicas-de-la-region-de-Tarapaca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

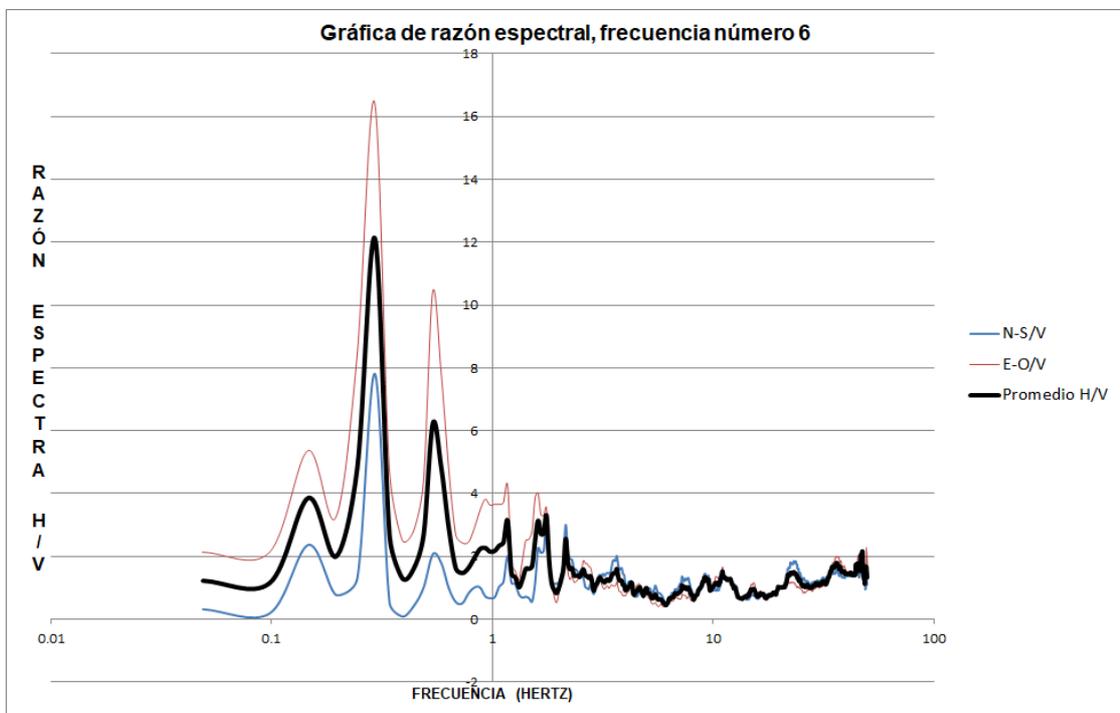
23. Programa de Ingeniería. (2021). *Programas disponibles para estudiantes*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Recuperado de srlabs.a2hosted.com/rshumhub/index.php?r=space%2Fspace&cguid.
24. Programa Deepsoil 6.1. (2016). *Programa disponibles para estudiantes*. Universidad Illionis. Champaign, Estados Unidos. Recuperado de <http://deepsoil.cee.illinois.edu/Publications>.
25. Quevedo, J. (2010). *Ondas sísmicas*. (Monografía). Universidad Toribio de Macrovejo, Chiclayo, Peru. Recuperado de <https://fdocumento.com/document/monografia-ondas-sismicas.html?page=1>.
26. Rojas, D. (2013). *Compendio de geología general*. Lima, Perú: Macro.
27. Rojas, F. (2015). *Estimaciones de velocidades de onda de corte, registro de ondas superficiales love V/S refracciones de ondas internas SH*. (Tesis de Maestría). Universidad de Chile, Santiago, Chile. Recuperado de <https://es.slideshare.net/andresriq/estimacion-de-velocidadesdeondadecorte>.
28. Rosso, B. (2012). *Ruido sísmico ambiental de la red banda ancha*. (Monografía). Universidad Nacional Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de http://www.ovsicori.una.ac.cr/sistemas/biblioteca/ovsicori/Sismologia/Investigaciones/Analisis_ruido_sismico_redOV.

29. Salas, T. (2007). *Influencia de la amplificación local de las ondas sísmicas y la interacción suelo fundación en el puente marga marga*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Chile, Chile.
30. Sandoval, V. (2013). *Estudio de la robustez de la estimación espectral de la técnica H/V de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. Recuperado de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/bmfcis218e/doc/bmfcis218e>.
31. Schmidt, V. (2015). *Aplicación de la técnica H/V en distintos emplazamientos a partir de la medición de vibración ambiental y de sismo*. Revista geológica de América Central, 54, 155-177. Recuperado de <https://www.redalyc.org/jatsRepo/454/45445616008/45445616008>.
32. Torres, G. (2008). *Microzonificación sísmica de la zona Conurbada Veracruz y evaluación de la vulnerabilidad sísmica estructural del centro histórico*. (Tesis de Doctorado). Universidad Veracruzana, Veracruz, México. Recuperado de <http://colaboracion.uv.mx/insting/Tesis/2008-Estructuras-GilbertFranciscoTorresMoralesDoctorado.pdf>.
33. Ulloa, R. (2018). *Aplicación del método de Nakamura H/V, para estudiar el riesgo sísmico en la zona comprendida por el despliegue de estaciones IMAD*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de Concepción, Concepción, Chile. Recuperado de https://www.dgeo.udec.cl/wp-content/uploads/2018/06/Tesis_R_Ulloa_150dpi.

34. Yani, R. (2006). *Mediciones de intensidades sísmica dentro del área urbana extendida, de la ciudad Guatemala*. (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de https://fisica.usac.edu.gt/public/tesis_lic/robin_y/IntensidadesSismicas.

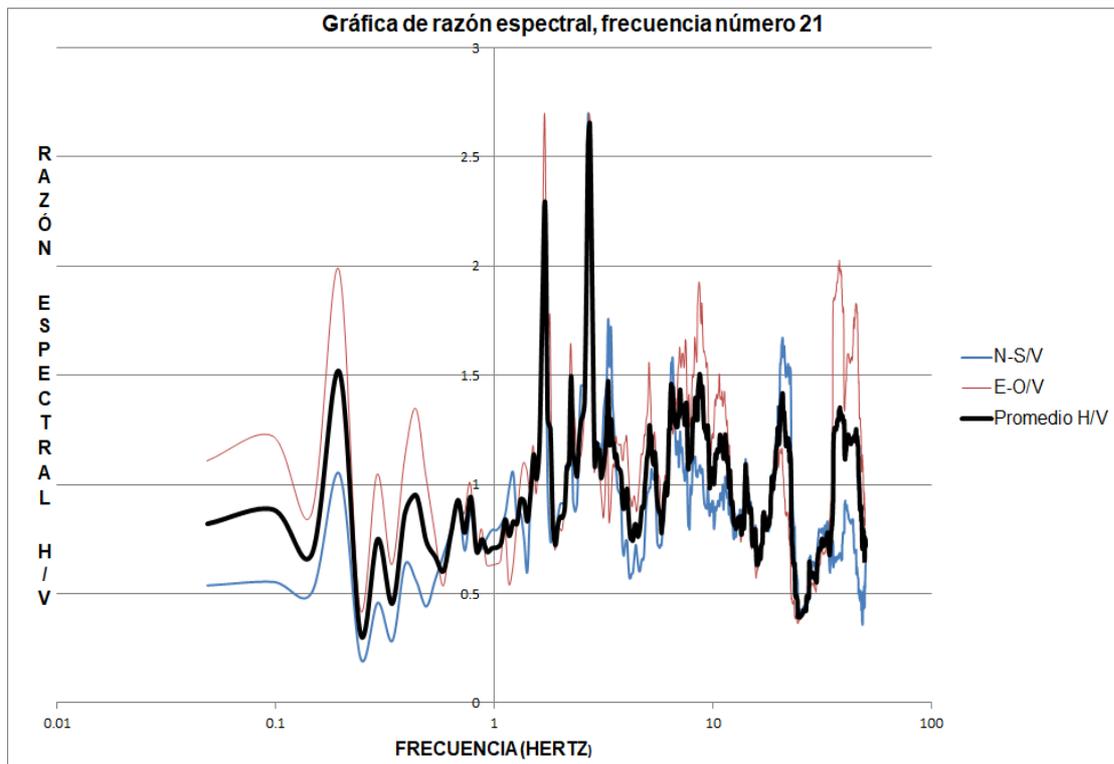
APÉNDICES

Apéndice 1. Gráfica (H/V) estación E1 frecuencia número 6



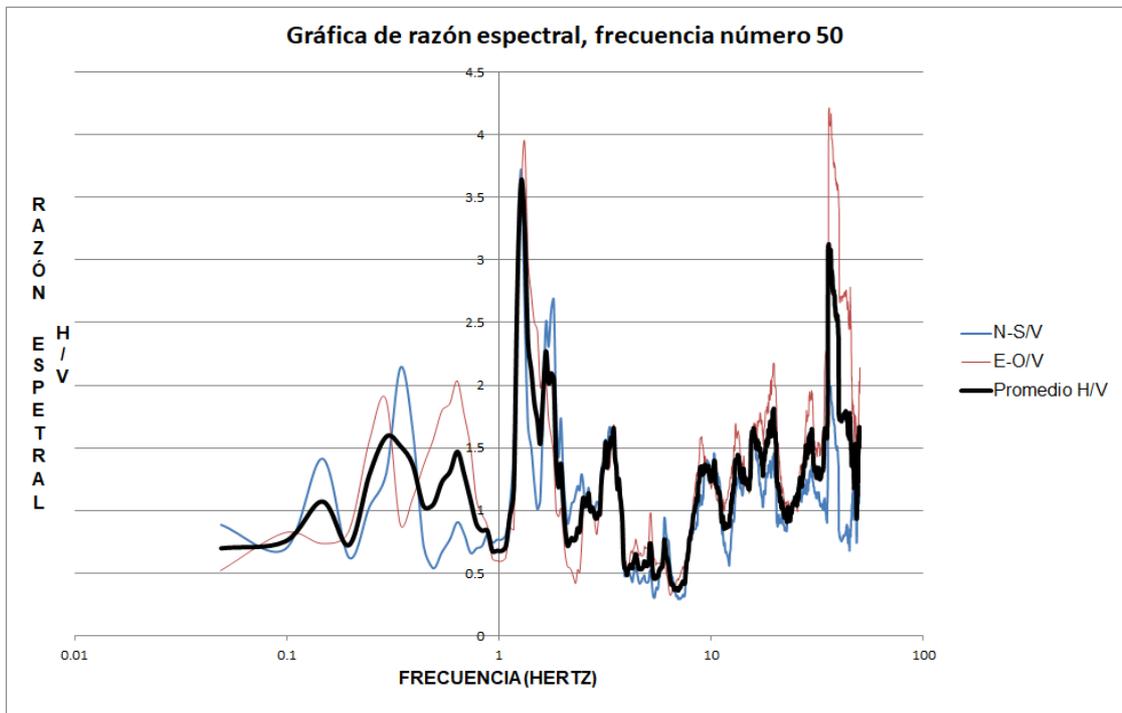
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Gráfica (H/V) estación E5 frecuencia número 21**



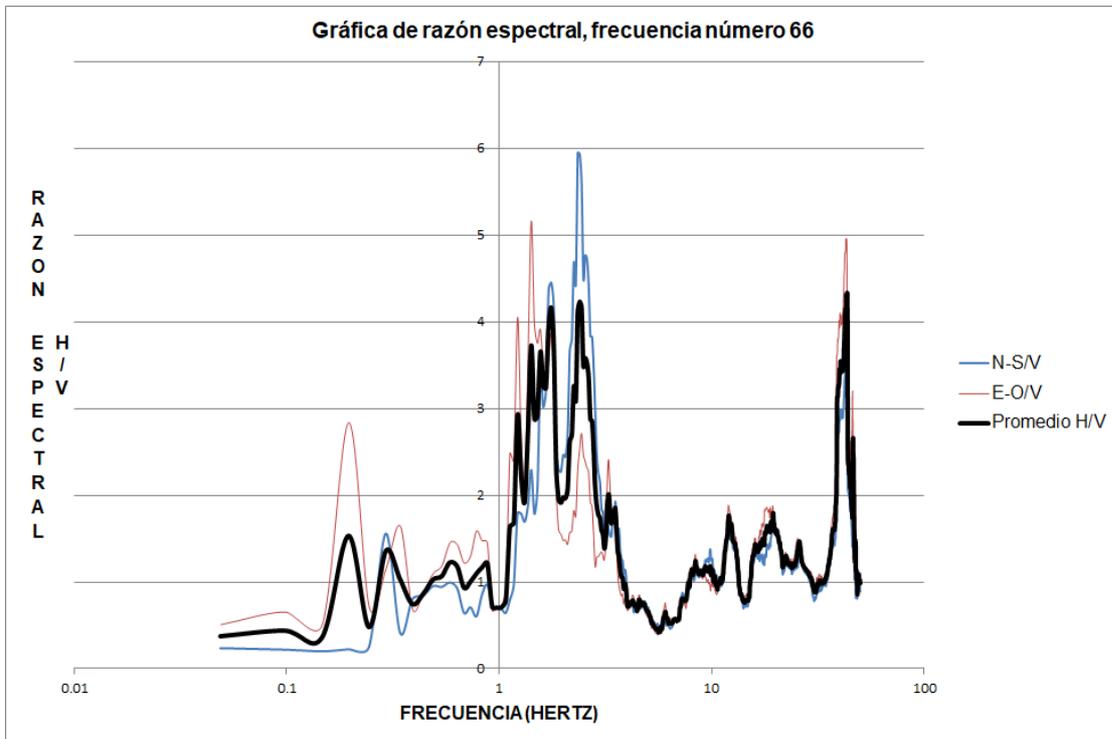
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Gráfica (H/V) estación E15 frecuencia número 50**



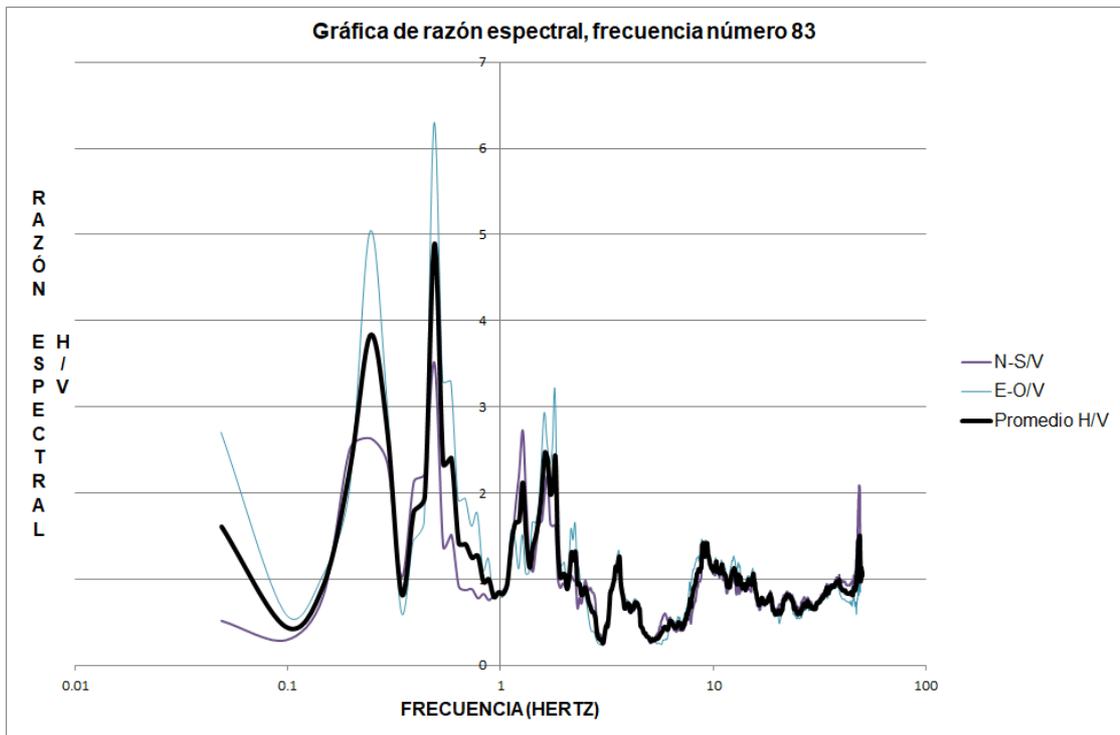
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Gráfica (H/V) estación E20 frecuencia número 66**



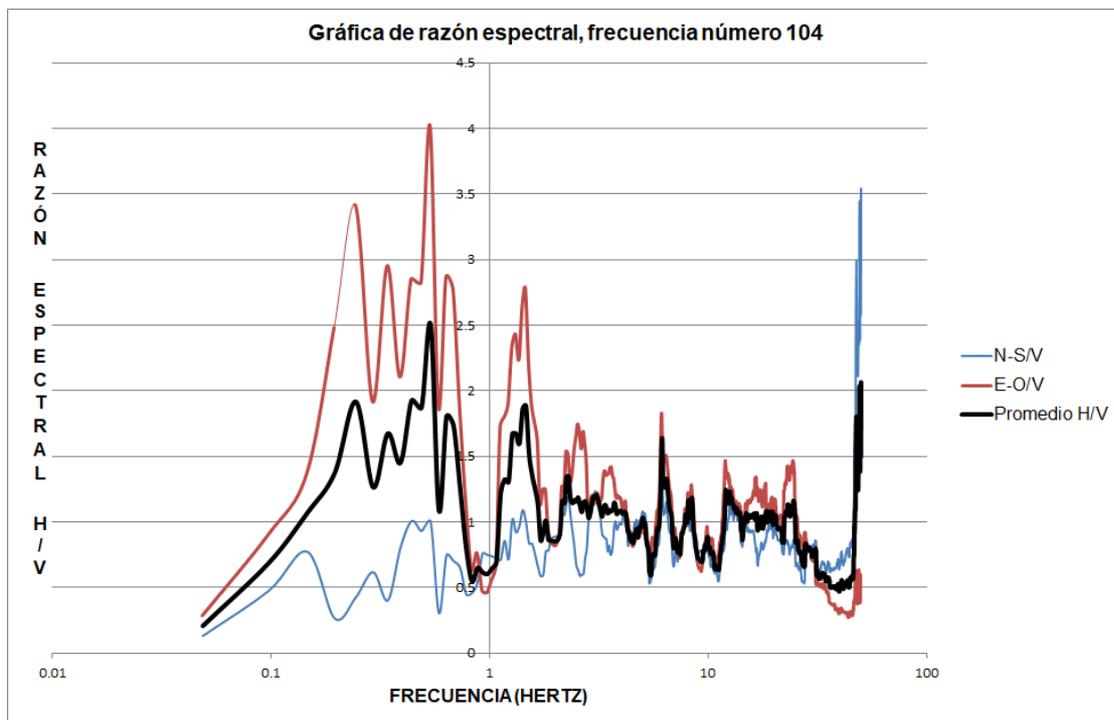
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Gráfica (H/V) estación E24 frecuencia número 83**



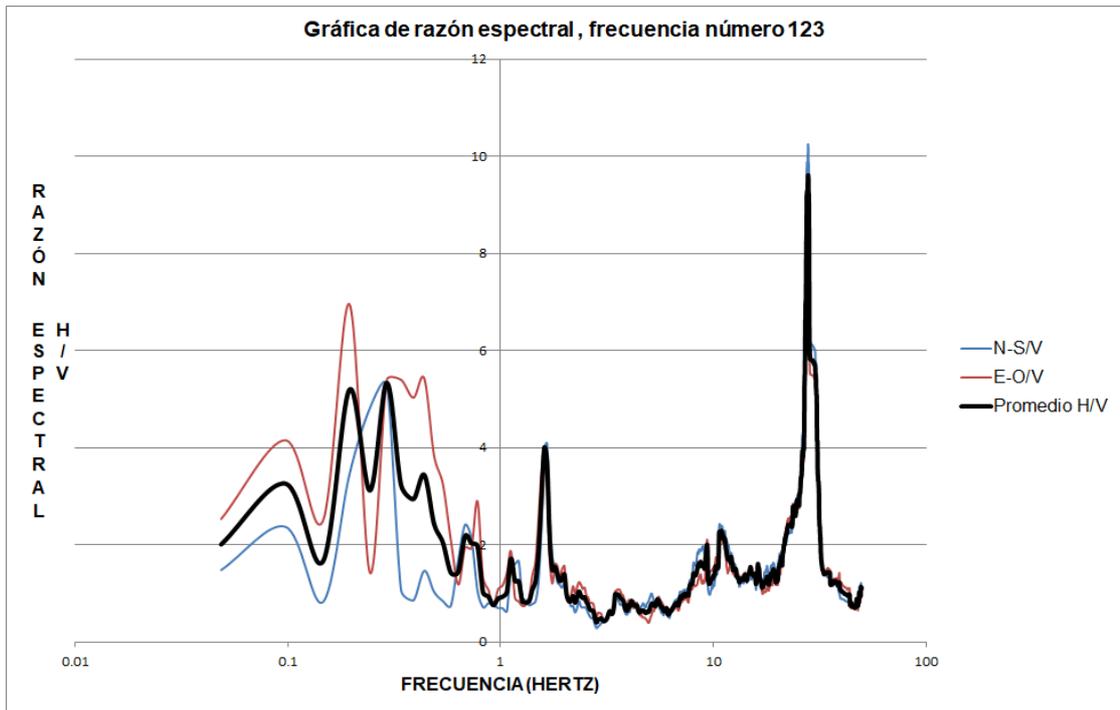
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Gráfica (H/V) estación E30 frecuencia número 104**



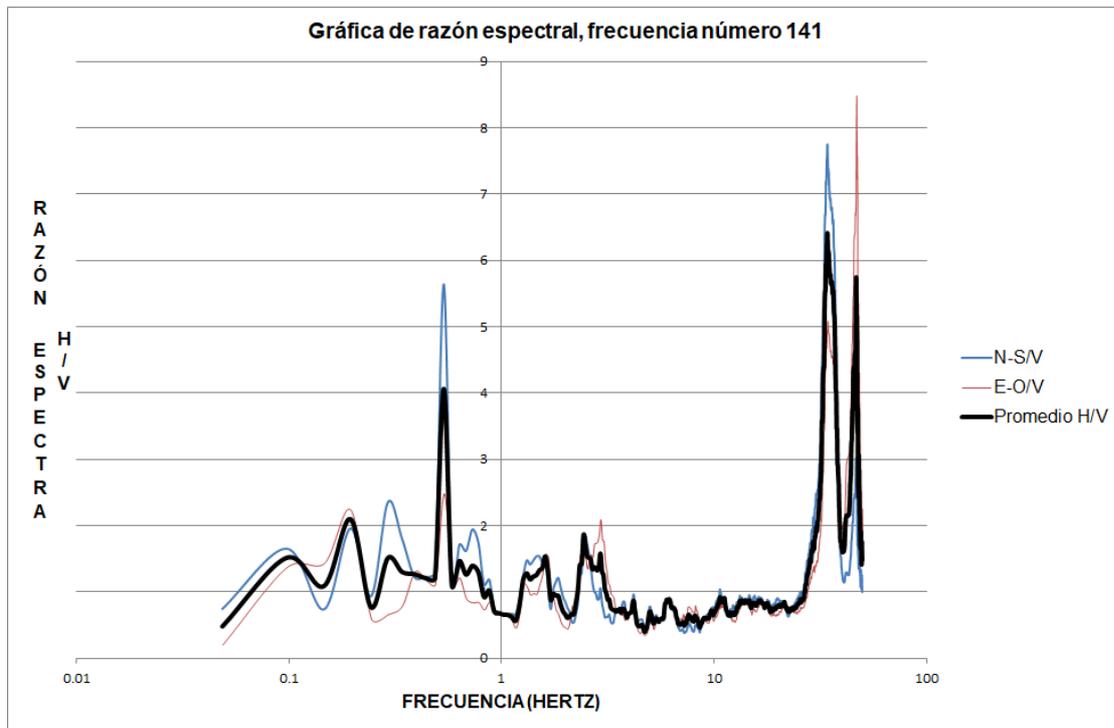
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Gráfica (H/V) estación E35 frecuencia número 123**



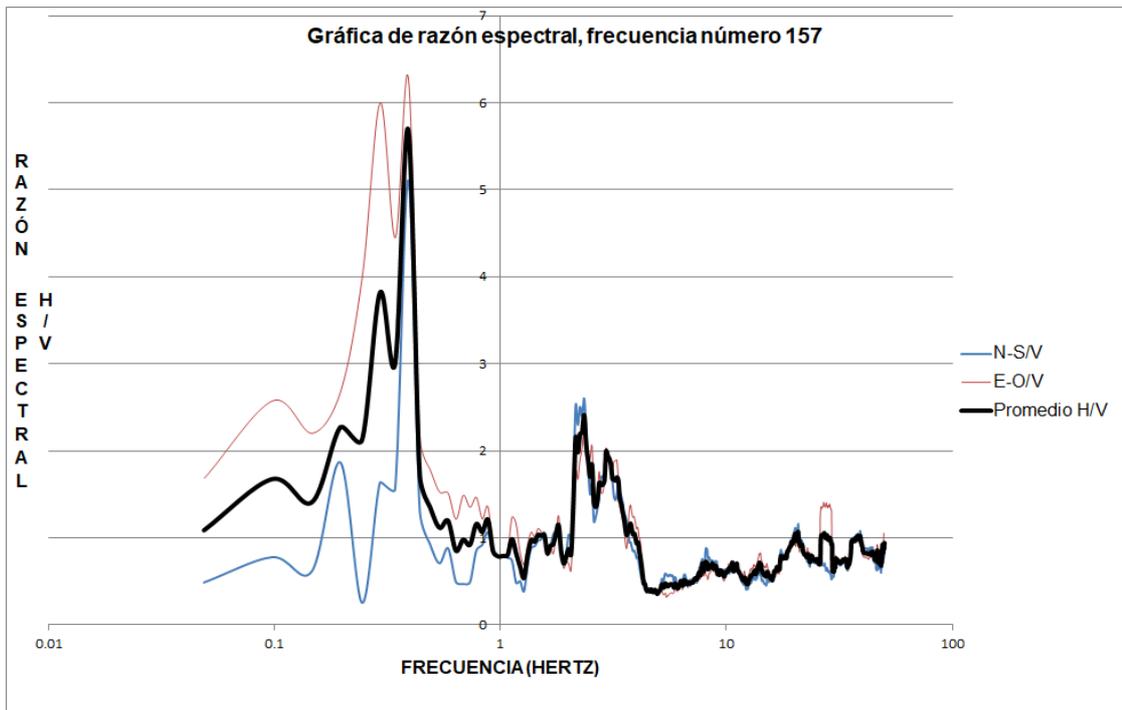
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Gráfica (H/V) estación E40 frecuencia número 141**



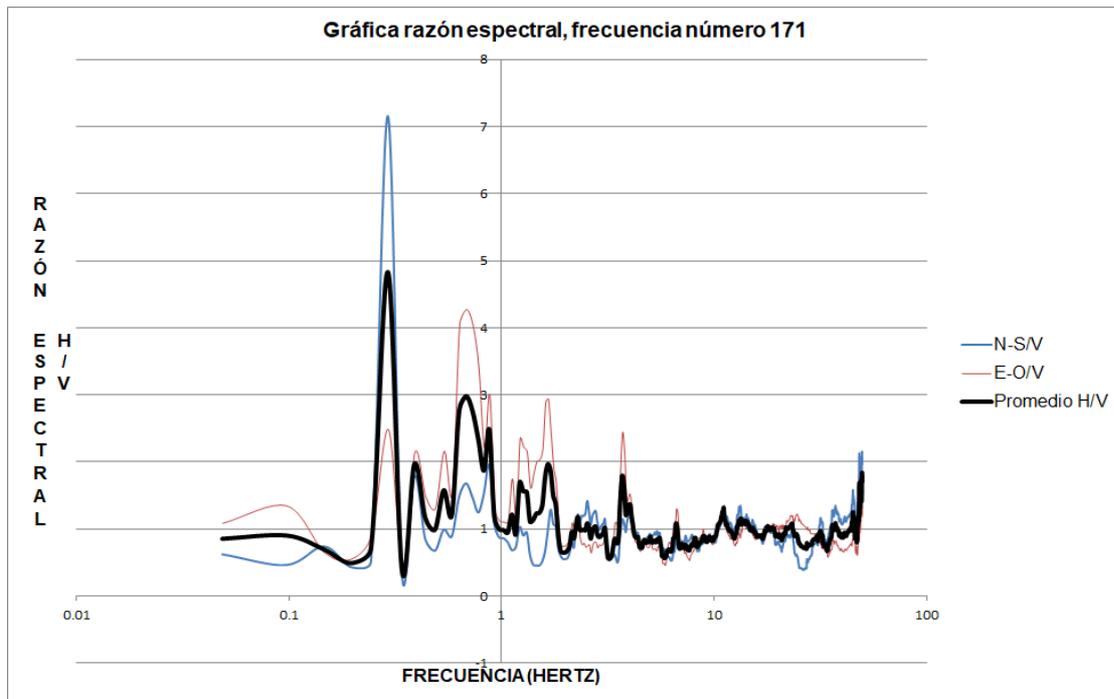
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Gráfica (H/V) estación E45 frecuencia número 157**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Gráfica (H/V) estación E49 frecuencia número 171**



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Tabla con barreno tubular PBT1**

Perforación con barreno tubular (PBT1)						
Ubicación	6 avenida entre la 3 y 4 calle de la Zona 2					
Muestra núm.	1	2	3	4	5	6
Profundidad (m)	1.70-2.00	2.00-2.42	2.42-2.65	2.65-2.90	2.90-4.10	4.10-4.35
Clasificación suelo S.U.	SM	MH	ML	MH	SM	OL
Color	café oscuro	café oscuro	café oscuro	café oscuro	café oscuro	café oscuro
Tipo	Arena limosa	Limo elástico	Limo arena arcilloso	Limo elástico con arena	Arena limosa	Arcilla orgánica con arena
Límite líquido	No líquido	70.5	49.6	64.6	No líquido	39.6
Límite plástico	No plástico	48.2	43.5	49	No plástico	35.6
Índice plástico	-	22.3	6.1	15.6	-	4.0
% humedad natural	34.6	69.4	58.4	71.1	31.9	45.0
Índice liquidez	-	0.95	2.44	1.42	-	2.35
Peso unitario natural kg/m ³	1,730	1,400	1,535	1,460	1,778	1,394
Gravedad específica	2.70	2.62	2.61	2.62	2.69	2.58
Relación de vacíos	1.10	2.16	1.64	2.07	1.0	1.5
Nivel freático	1.55 metros					
qu (T/m ²)		9.4	6.6	7.7		13.2

Fuente: Marroquín. (2006). *Detección de suelos críticos para la construcción en los siguientes sectores: A) entre la 3a. calle "D" de la zona 1 y la rotonda de la zona 2, entre la 6a y 7a. av. zona 2. B) entre 17 y 19 av. entre la 1 y 4 calle zona 3, de la ciudad de Quetzaltenango.*

Anexo 2. **Tabla con barreno tubular PBT2**

Perforación con barreno tubular (PBT2)					
Ubicación	6 avenida y esquina de la 3 calle de la Zona 2				
Muestra No.	1	2	3	4	5
Profundidad (m)	1.00-1.50	1.50-2.30	2.30-3.00	3.00-3.30	3.30-3.60
Clasificación suelo S.U.	MH	ML	SM	SM	OH
Color	café oscuro	café oscuro	café oscuro	café oscuro	Negro
Tipo	Limo elástico arenoso	Limo arenoso	Arena limosa	Arena limosa	Limo orgánico con arena
Limite líquido	71	40.1	No líquido	No líquido	79.6
Limite plástico	49	32.6	No plástico	No plástico	67.7
Índice plástico	22	7.5	-	-	11.9
% humedad natural	56.5	49.8	44.4	31.6	76.9
Índice liquidez	0.34	2.3	-	-	0.77
Peso unitario natural Kg/m ³	1,650	1,703	1,798	1,811	1,167
Gravedad específica	2.62	2.64	2.70	2.70	2.58
Relación de vacíos	1.48	1.32	1.12	0.96	2.91
qu (T/m ²)	5.10	5.5			6.1

Fuente: Marroquín. (2006). *Detección de suelos críticos para la construcción en los siguientes sectores: A) entre la 3a. calle "D" de la zona 1 y la rotonda de la zona 2, entre la 6a y 7a. av. zona 2. B) entre 17 y 19 av. entre la 1 y 4 calle zona 3, de la ciudad de Quetzaltenango.*

Anexo 3. **Pozo cielo abierto Pc-3**

Pozo cielo abierto Pc-3			
Ubicación	Ubicado patio interior Texaco Dionar 7 avenida 0-61 zona 2		
Muestra No.	1	2	3
Profundidad (m)	0.80-1.00	1.00-2.00	2.00-4.00
Clasificación suelo S.U.	SM	SM	OL
Color	café	café oscuro	Negro
Tipo	Arena limosa	Arena limosa	Limo orgánico
Limite líquido	No líquido	No líquido	49.9
Limite plástico	No plástico	No plástico	42.3
Índice plástico	-	-	7.6
% humedad natural	23.9	30.5	43.3
Índice liquidez	-	-	0.13
Peso unitario natural Kg/m ³	1,536	1,671	1,510
Gravedad específica	2.69	2.69	2.48
Relación de vacíos	1.17	1.1	1.35
Nivel freático	2.37 metros		
Qu (T/m ²)	5.8		

Fuente: Marroquín. (2006). *Detección de suelos críticos para la construcción en los siguientes sectores: A) entre la 3a. calle "D" de la zona 1 y la rotonda de la zona 2, entre la 6a y 7a. av. zona 2. B) entre 17 y 19 av. entre la 1 y 4 calle zona 3, de la ciudad de Quetzaltenango.*

Anexo 4. **Tabla con barreno tubular PBT4**

Perforación con barreno tubular (PBT4)			
Ubicación	6 avenida entre calle A y 1 calle de la Zona 2		
Muestra No.	1	2	3
Profundidad (m)	0.80-1.60	1.60-2.20	2.20-3.20
Clasificación suelo S.U.	SM	CH	OL
Color	café	café oscuro	negro y café
Tipo	Arena limosa	Arcilla	Arcilla orgánica
Limite líquido	32.2	50.2	37.2
Limite plástico	28.2	20.1	29.2
Índice plástico	4	30.1	8
% humedad natural	22.9	50.9	40.9
Índice liquidez	0	1.02	1.47
Peso unitario natural Kg/m ³	1,718	1,710	1,675
Gravedad específica	2.69	2.69	2.52
Relación de vacíos	0.92	1.37	1.12
Nivel freático	2.39 metros		
qu (T/m ²)		4.3	4.4

Fuente: Marroquín. (2006). *Detección de suelos críticos para la construcción en los siguientes sectores: A) entre la 3a. calle "D" de la zona 1 y la rotonda de la zona 2, entre la 6a y 7a. av. zona 2. B) entre 17 y 19 av. entre la 1 y 4 calle zona 3, de la ciudad de Quetzaltenango.*