



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Escenarios sísmicos de la ciudad de  
Puebla, Puebla, México elaborados  
a partir de las técnicas MHVSR y  
EHVSR**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniero Geofísico**

**P R E S E N T A**

Ivan Alvarez Monroy

**DIRECTOR DE TESIS**

M.C. Javier Francisco Lermo  
Samaniego



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021

## *Dedicatoria*

*Este trabajo está dedicado a mi familia. A mis padres, por su apoyo incondicional y su contante motivación; a mis hermanos, con los que he crecido y ahora veo con orgullo y admiración.*

## *Agradecimientos*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México por este ambiente único para el desarrollo humano, el cual, me arropó desde la educación media superior y me brindó todas las herramientas para mi formación.*

*A mis profesores en la Facultad de Ingeniería quienes compartieron sus conocimientos y experiencias para encaminaron mi desarrollo como estudiante.*

*Al maestro Javier Lermo por permitirme participar en tantos proyectos y compartir conmigo sus conocimientos, sin duda alguna fue un apoyo invaluable para formar un mejor ingeniero. También agradezco a mis compañeros en el Instituto de ingeniería, en especial al maestro José Antonio, por brindarme su apoyo para el desarrollo de este trabajo.*

*A mis amigos Roy, Toño, Quique, Fabian, Erick y Rodrigo quienes me han acompañado en tantos momentos inolvidables.*

# ÍNDICE

Índice de Figuras .....	4
Resumen .....	6
Abstract .....	6
<b>1. Introducción .....</b>	<b>7</b>
1.1    Objetivos .....	8
1.2    Ubicación y aspectos geográficos .....	9
1.3    Geomorfología .....	10
1.4    Geología .....	11
1.5    Geotecnia .....	12
1.6    Zonas de Inundación .....	14
<b>2. Marco Teórico .....</b>	<b>15</b>
2.1    Efecto de sitio .....	15
2.2    Parámetros que influyen el efecto de sitio .....	16
2.3    Funciones de transferencia.....	18
2.4    Cálculo de funciones de transferencia .....	18
2.4.1    Razón Espectral Estándar (Standard Spectral Ratio, SSR).....	19
2.4.2    Razón espectral de la componente horizontal a la componente vertical, Técnica de Nakamura para sismos, (EHVSR).....	19
2.4.3    Razón Espectral Relativa a la Componente Vertical, Técnica de Nakamura (MHVSR).....	19
2.5    Relación entre efecto de sitio y daños en edificios .....	21
2.6    Estimación de aceleración en superficie .....	21
2.1    Espectros de respuesta .....	23
<b>3. Análisis y procesado de datos.....</b>	<b>24</b>
3.1    Base de datos.....	24
3.2    Familias espectrales .....	26
3.3    Sismos característicos .....	27
3.6    Acelerogramas Sintéticos.....	31
3.7    Espectros de respuesta .....	33
<b>4. Resultados .....</b>	<b>35</b>
4.1    Mapa de isoperiodos y amplitud relativa .....	35
4.1    Microzonificación sísmica .....	36



4.2	Escenarios sísmicos .....	38
4.3	Relación de daños en infraestructura con los escenarios sísmicas y la microzonificación 41	
<b>5.</b>	<b>Discusión de resultados.....</b>	<b>46</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>48</b>
<b>7.</b>	<b>trabajos citados .....</b>	<b>48</b>
	<b>Anexo 1 Cocientes Espectrales H/V.....</b>	<b>51</b>
	<b>Anexo 2 Base de datos.....</b>	<b>72</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Ubicación de la zona de estudio, Estado de Puebla en color morado, Municipio de Puebla con color gris y límite de la Ciudad de Puebla línea color rojo; la regionalización sísmica de México comprende la Zona A en color amarillo, Zona B en naranja claro, Zona C naranja oscuro y Zona D en color Rojo, (INEGI, 2010), (CFE, 2008). .....	9
<b>Figura 2.</b>	Morfología de la Ciudad de Puebla, conformada por las estructuras del volcán La Malinche, La sierra Amozoc, la fosa Valsequillo y la Sierra Tentzo. ....	11
<b>Figura 3.</b>	Mapa de la geología regional de la Ciudad de Puebla.....	12
<b>Figura 4.</b>	Zonificación geotécnica de la Ciudad de Puebla.....	13
<b>Figura 5.</b>	Zonas de Inundación y ríos de la Ciudad de Puebla.....	14
<b>Figura 6.</b>	Acelerogramas del sismo del 25 de abril de 1989 Ms=6.9 registrados en distintos tipos de suelo en la Ciudad de Acapulco, (CENAPRED, 2014). ....	16
<b>Figura 7.</b>	Perfil estratigráfico real y perfil equivalente. Modificado de Montecillo (1996). ....	17
<b>Figura 8.</b>	Esquema de función de transferencia, (Limaymanta Mendoza, 2009). ....	18
<b>Figura 9.</b>	Modelo estratigráfico de la técnica de Nakamura. ....	20
<b>Figura 10.</b>	Metodología para la estimación de aceleración en superficie en un punto B a partir del registro de aceleraciones en un determinado punto A .....	23
<b>Figura 11.</b>	Esquema conceptual de la realización de un espectro de respuesta a partir de oscilaciones simples. (Medrano Rivera, 2003).....	24
<b>Figura 12.</b>	Ubicación de los puntos de medición de cada campaña, se muestra los ríos en color azul y el límite municipal de Puebla en una línea punteada color negro. Recuadro rojo indica la zona amplificada del centro histórico. ....	26
<b>Figura 13.</b>	Cocientes espectrales H/V de la zona urbana del municipio de Puebla; agrupados por su forma espectral, recuadro superior izquierdo grupo 1, recuadro superior derecho grupo2, recuadro central izquierdo grupo 3, recuadro central derecho, grupo 4 recuadro inferior izquierdo grupo 5 y recuadro inferior izquierdo grupo anómalo.....	28

<b>Tabla 1.</b> Descripción de los sismos de 1985, 1999 y 2017 y las estaciones que registraron su señal en Puebla. ....	29
<b>Figura 14.</b> Acelerogramas de las componentes EW y NS y sus correspondientes espectros de Fourier de los sismos de 1985, 1999 y 2017, registrados por las estaciones SXPU, PHPU y PBPP en la Ciudad de Puebla, México. ....	30
<b>Figura 15.</b> Registros acelerográficos y espectros de Fourier de los sismos de 1985, 1999 y 2017 (negro) comparados con su respectivo acelerograma sintético y espectro de Fourier (morado). ....	31
<b>Figura 16.</b> Acelerogramas sintéticos calculados a partir de la señal del sismo del 19 de septiembre de 2017 Mw 7.1, componente horizontal N-S de la estación PHPU. ....	33
<b>Figura 17.</b> Espectros de respuesta, conjunto de espectros de respuesta simulados para los tres sismos característicos, sismo del 19 de septiembre del 2017 (arriba), sismo del 5 junio de 1999 (centro) y sismo del 19 de septiembre de 1985 (abajo). ....	34
<b>Figura 18.</b> Mapa de isoperiodos propuesto para la Ciudad de Puebla, distribución de amplificaciones dinámicas relativas en la ciudad. ....	35
<b>Figura 19.</b> Propuesta de Microzonificación Sísmica para la Ciudad de Puebla Dividida de colores claros a oscuros en 3 zonas; Zona 1, Zona 2 y Zona 3, la Zona A, en color naranja. ....	37
<b>Figura 20.</b> Escenario sísmico del terremoto del 19 de septiembre de 1985 (Mw 8.1) en la Ciudad de Puebla. Arriba e izquierda, escenario sísmico para un periodo estructural de 0 s PGA; arriba y derecha, escenario sísmico para un periodo estructural de 0.3 s; abajo e izquierda, escenario sísmico para un periodo de 0.8 s; abajo y derecha, escenario sísmico de un periodo de 1.2 s. ....	39
<b>Figura 21.</b> Escenario sísmico del terremoto del 15 de junio de 1999 (Mw 7.0) en la Ciudad de Puebla. Arriba e izquierda, escenario sísmico para un periodo estructural de 0 s PGA; arriba y derecha, escenario sísmico para un periodo estructural de 0.3 s; abajo e izquierda, escenario sísmico para un periodo de 0.8 s; abajo y derecha, escenario sísmico de un periodo de 1.2 s. ....	40
<b>Figura 22.</b> Escenario sísmico del terremoto del 19 de septiembre de 2017 (Mw 7.1) en la Ciudad de Puebla. Arriba e izquierda, escenario sísmico para un periodo estructural de 0 s PGA; arriba y derecha, escenario sísmico para un periodo estructural de 0.3 s; abajo e izquierda, escenario sísmico para un periodo de 0.8 s; abajo y derecha, escenario sísmico de un periodo de 1.2 s. ....	41
<b>Figura 23.</b> Escenario sísmico para un periodo estructural de 0.3 s, sismo de 2017 arriba, sismo de 1999 abajo. Comparación con los daños registrados en cada evento. ....	43
<b>Figura 24.</b> Escenario sísmico para un periodo estructural de 0.8 s, sismo de 2017 arriba, sismo de 1999 abajo. Comparación con los daños registrados en cada evento. ....	44
<b>Figura 25.</b> Mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Puebla y su relación con los daños de los terremotos del 15 de junio de 1999 y 19 de septiembre del 2017 (Parte superior). Parte inferior, detalle de los daños en el centro histórico de Puebla. ....	45

## **RESUMEN**

Se recopilaron los cocientes espectrales H/V, calculados a partir de registros de microtembroles o ruido sísmico ambiental y temblores (llamados MHVSR y EHVSR, por sus siglas en inglés, respectivamente), en al menos 300 puntos de la Ciudad de Puebla. Con los valores de periodo y amplitud relativa se actualizó el mapa de isoperiodos de la ciudad, el cual muestra que las líneas se asocian con los límites de las zonas de inundación y siguen la topografía de la zona. También se propone un nuevo mapa de microzonificación sísmica, el cual divide en 4 zonas a la ciudad de acuerdo con el nivel de peligro sísmico ante la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.

Se elaboró el escenario sísmico de un sismo de fallamiento inverso mediante las señales del sismo del 19 de septiembre de 1985 Mw 8.1, registradas en Puebla; se obtuvieron aceleraciones de hasta 270 gales (1 gal = 1 cm/s<sup>2</sup>, unidad de aceleración en honor a Galileo) en un periodo de 1.2 s en las zonas sur y oeste de la ciudad. Los escenarios de fallamiento normal están representados por los sismos del 15 de junio de 1999 Mw 6.9 y del 19 de septiembre de 2017 Mw 7.0, los cuales generaron aceleraciones de hasta 450 y 650 gales respectivamente, en zonas similares, donde destaca la parte oeste del centro histórico con periodos y amplificación bajos. De acuerdo con los daños reportados, los dos terremotos de intraplaca generaron afectaciones en zonas donde se observa tanto presencia de travertino como periodos de vibración de entre 0.3 y 0.8 s.

## **ABSTRACT**

The curves of H/V spectral ratios, obtained from records of microtremors or environmental seismic noise and earthquakes (called MHVSR and EHVSR, for its acronym in English, respectively), were collected in at least 300 points in the City of Puebla. With the period and relative amplitude values, the isoperiod map of the city was updated, which shows that the lines are associated with the limits of the flood zones and follow the topography of the area. Also, a new seismic microzoning map was built, this one divides the city into 4 zones according to the estimated level of seismic danger in the city in the event of a major earthquake.

The seismic scenario of a reverse faulting earthquake was elaborated using the signals of the earthquake of September 19, 1985 Mw 8.1, registered in Puebla; accelerations of up to 270 gales (1 gal = 1 cm/s<sup>2</sup>, acceleration unit in honor of Galileo) were obtained in a period of 1.2 s in the southern and western areas of the city. The normal faulting scenarios are represented by the earthquakes of June 15, 1999 Mw 6.9 and September 19, 2017 Mw 7.0, which produced accelerations of up until 450 and 650 gales respectively, in similar areas, where the western part of the historic center stands out with low amplification and periods. According to the reported damage, the two intraplate earthquakes generated damage in areas where the presence of travertine and vibration periods of between 0.3 and 0.8 s are observed.

## 1. INTRODUCCIÓN

Debido a la naturaleza impredecible e inevitable que caracteriza a los sismos se limitan las herramientas con las que podemos mitigar sus efectos devastadores, dejándonos con la opción de construir estructuras capaces de resistir las aceleraciones del terreno generadas por ellos (Lizaola, 1990). Estas aceleraciones varían en relación con características propias de cada sismo, como su magnitud, distancia epicentral y el mecanismo de la fuente; aunque, también son afectadas por las propiedades del medio por el que se propagan, dando lugar al fenómeno conocido como efecto de sitio, el cual influye atenuando o amplificando su intensidad además de la duración en que son percibidas.

Es importante considerar el efecto de sitio en el diseño de estructuras civiles sismo-resistentes, sobre todo en casos como el de la ciudad de Puebla, la cual ha mostrado una evidente vulnerabilidad ante el fenómeno sísmico. Dicho fenómeno se genera en la zona de subducción del Pacífico mexicano, como el sismo del 19 de septiembre de 1985 (Mw 8.1), pero también, hay eventos cuyo epicentro se ubica en las limítrofes del estado de Puebla como el sismo del 15 de junio de 1999 (Mw 6.9) y el sismo de 19 de septiembre de 2017 (Mw 7.1).

La ciudad de Puebla se ubica dentro de las 5 primeras ciudades con alto índice poblacional en el país; cuenta con aproximadamente 1 434 000 habitantes (INEGI, 2010). Su crecimiento acelerado y vulnerabilidad sísmica, obliga a un constante estudio de las características dinámicas del terreno; esto con la finalidad de definir criterios en el diseño de obras civiles y una planeación urbana que busque mitigar el riesgo sísmico.

Al evaluar el riesgo sísmico se toman en cuenta características de la zona de estudio como, la geología superficial, la geotécnica y la geomorfología; además, se debe definir una microzonificación sísmica a partir de las amplificaciones relativas y distribución del periodo natural del suelo (CENAPRED, 2014). Este trabajo se evalúa el riesgo sísmico en la ciudad de Puebla a través de información recabada en distintos proyectos realizados en la zona, junto con la elaboración de escenarios sísmicos de eventos de gran magnitud y de distintas fuentes sismogénicas.

En el primer capítulo se realiza una descripción de las características de la zona que contribuyen al estudio del riesgo sísmico. Se toma en cuenta la geología superficial reportada por (CUPREDER, 2011) y la zonificación geotécnica elaborada por (Azomoza, et al., 1998); mientras que la geomorfología y las zonas susceptibles a la generación de valles aluviales o zonas de inundación son tomadas de (Lermo, et al., 2013). Posteriormente, en el marco teórico, se describen los conceptos de algunas características dinámicas del suelo, el fenómeno de efecto de sitio y técnicas para su evaluación, además del término de función de transferencia y amplificación dinámica del suelo.

En el tercer capítulo, se recopiló las curvas del cociente espectral H/V procesadas y analizadas en los proyectos de (Chavez-Garcia, et al., 1995), (Lermo, et al., 2008) y (Hernández Estrada, et al., 2013), utilizando las técnicas MHVSR, (Nakamura, 1989), y la técnica EHVS (Lermo, et al., 1993); se clasificó los cocientes espectrales en familias de acuerdo con su forma y se obtuvo el valor de periodo dominante y amplificación relativa del suelo para cada uno de ellos. (Alvarez Monroy,

et al., 2017) realizan un primer intento por hacer por plantear la distribución del periodo dominante del suelo y una zonificación sísmica de la ciudad con esta base de datos; en este trabajo se realiza un análisis con mayor detalle.

Con la información obtenida se desarrolla un nuevo mapa de periodos dominantes y su amplificación relativa; el cual, sirvió también para proponer una nueva microzonificación sísmica de la ciudad de Puebla, donde se divide en 4 zonas el área de estudio, mejorando las propuestas de microzonificación (Chavez-Garcia, et al., 1995), (Avilés, 1999) y (CUPREDER, 2011) que se basan en aspectos geotécnicos y no en la respuesta del suelo como son los periodos dominantes y su amplificación relativa o no contaban con una densidad de datos suficiente.

Finalmente, en este trabajo se mejora el análisis de los datos y se realiza una estimación de la respuesta sísmica del terreno mediante la construcción de escenarios sísmicos para tres eventos de gran magnitud y con epicentros en distintas zonas sismogénicas registrados dentro de la zona urbana. Estos escenarios son comparados con los daños reportados, con la finalidad de mejorar las normas técnicas complementarias para diseño sísmico del reglamento de construcciones para esta ciudad tan importante.

## **1.1 Objetivos**

El objetivo general de este trabajo es evaluar el comportamiento dinámico del suelo en la Ciudad de Puebla ante el paso de las ondas sísmicas generadas por terremotos de diferentes zonas sismogénicas.

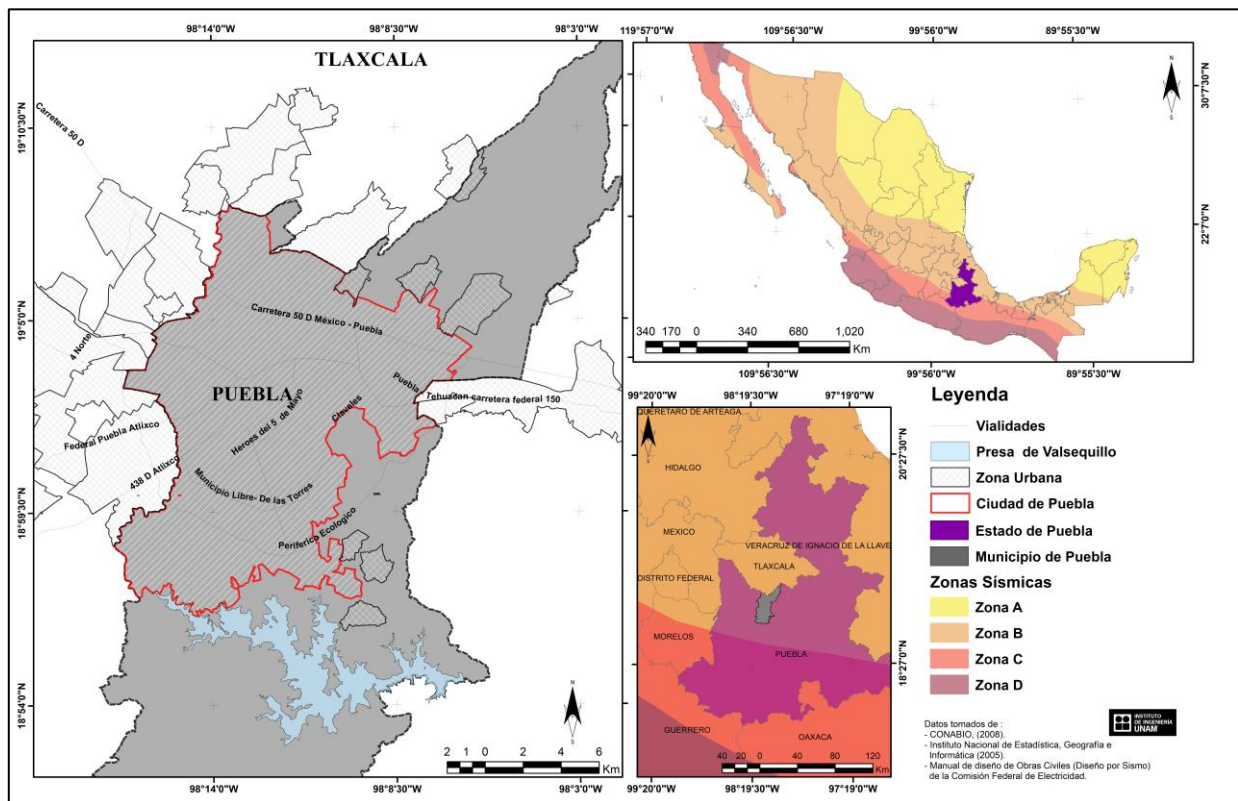
Los objetivos específicos son:

- Agrupar y reinterpretar la distribución de los periodos dominantes y la amplificación relativa del suelo desarrollados mediante la técnica de los cocientes espectrales H/V (técnicas MHVSR y EHVS), en la Ciudad de Puebla.
- Formar un nuevo mapa de isoperiodos y amplificación relativa para la zona urbana de la ciudad de Puebla y con base a esta distribución elaborar una nueva zonificación sísmica para la Ciudad de Puebla.
- Generar acelerogramas sintéticos y espectros de respuesta (ER) en distintos puntos de la ciudad utilizando las razones espectrales analizadas con las dos técnicas mencionadas, con el objetivo de generar escenarios sísmicos para los tres terremotos que han causado daño a esta ciudad.
- Comparar estos escenarios sísmicos con los daños observados en los terremotos del 15 de junio de 1999 (Mw7.0) y 19 de septiembre de 2017 (Mw7.1).

## 1.2 Ubicación y aspectos geográficos

El Estado de Puebla fue fundado en 1823 y se encuentra ubicado en la parte centro-este del país; está delimitado al norte por los estados de Tlaxcala e Hidalgo, al noreste por el estado de Veracruz, al sur por los estados de Oaxaca y Guerrero, y finalmente, al oeste se encuentran los estados de Morelos y México (figura1). Conforman un total de 34,251 Km<sup>2</sup> de superficie; cabe mencionar que la mayor parte de dicha área se encuentra ubicada dentro de la provincia geológica del Eje Neovolcánico Transversal.

El Municipio de Puebla es uno de los 217 municipios en los que se encuentra dividido el estado, se localiza en la parte centro-oeste en una zona geográfica conocida como el valle de Puebla. Comprende un área de 524.31 km<sup>2</sup>, es el quinto municipio más extenso, y representa para el país el cuarto municipio más poblado, después de Iztapalapa, Ecatepec de Morelos y Tijuana, esto de acuerdo con datos del (INEGI, 2010).



Puebla de Zaragoza es la zona urbana más poblada del estado; de acuerdo con datos del INEGI en 2015 en esta ciudad se encuentra el 26.2% de la población estatal, lo que representa lo que representa 1,434,062 habitantes. Es considerada una de las principales ciudades del país junto con la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey. Representa una ciudad que cuenta con gran infraestructura y

desarrollo, no solo por su gran número de habitantes sino también por el crecimiento de actividades económicas como son el comercio y la industria.

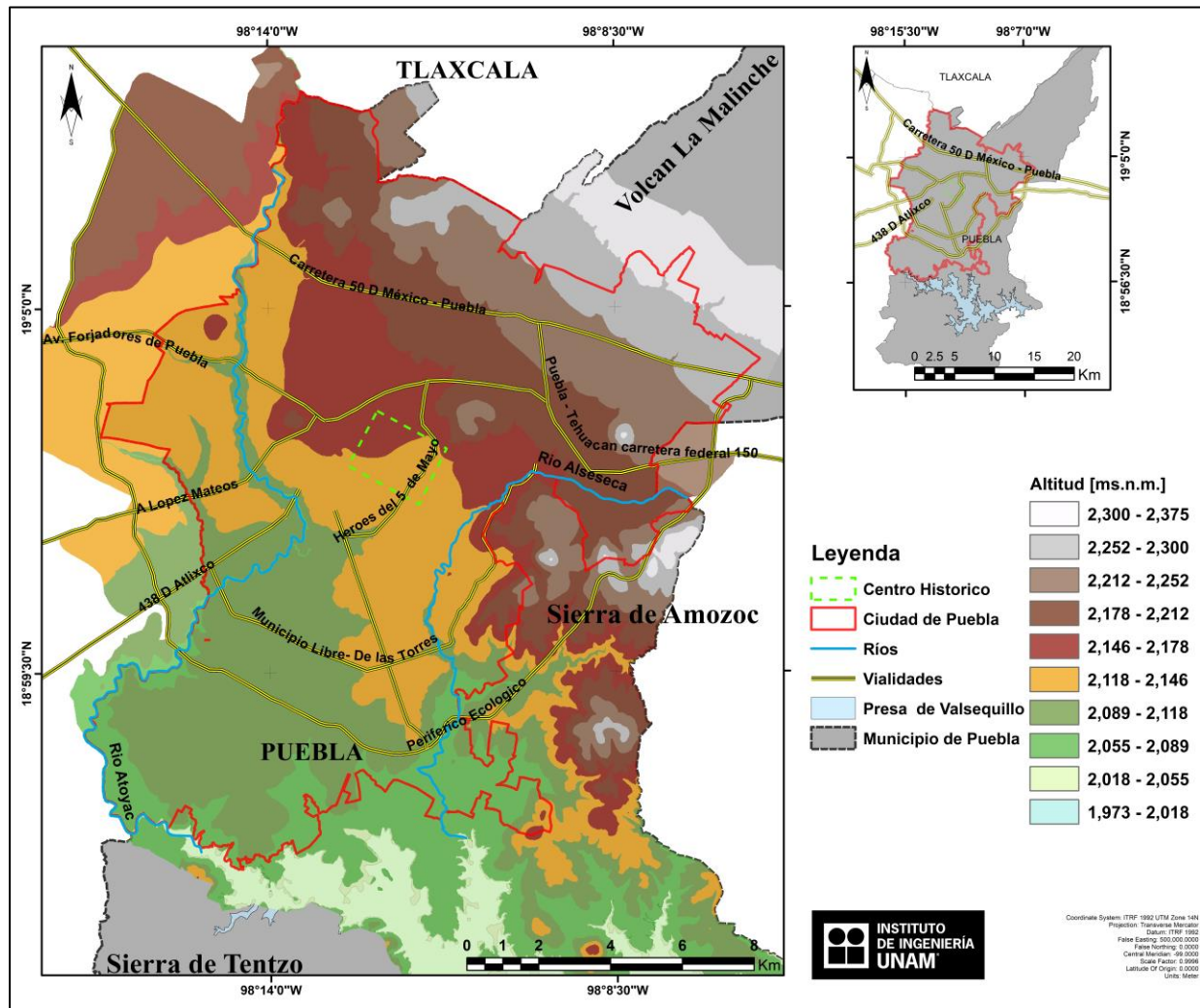
En la figura 1 se muestra la ubicación del Estado de Puebla, en la parte central de la República Mexicana (color morado), la localización del Municipio de Puebla (color gris) y los límites de la Ciudad de Puebla en color rojo; además, se indica la regionalización sísmica de México en donde se aprecia que el Estado se encuentra dentro de la Zona B y C, mientras que el Municipio y Ciudad de Puebla se ubican en la Zona B. Las regiones sísmicas del país comprenden desde la Zona A hasta Zona D y se ilustran de tonalidades amarillas a rojas en el mapa de la figura 1; la Zona A es una región donde no se tienen registros históricos de sismos, las Zonas B y C representan áreas donde se registran sismos con una frecuencia media y la Zona D es la región donde se han reportado grandes sismos históricos y donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente; dicha regionalización fue realizada por Esteva (1970).

### **1.3 Geomorfología**

La principal estructura geológica que podemos encontrar en el municipio de Puebla es el volcán La Malinche; la ciudad se encuentra ubicada a las faldas de esta estructura y el límite municipal alcanza parte de la cumbre. El volcán tiene una altitud de 4,461 m, mientras que sus faldas abarcan un diámetro de hasta 134 km.

Otras de las estructuras presentes en el municipio son las sierras de Amozoc y Tentzo. En el caso de la sierra de Amozoc se caracteriza por su baja altura y disposición irregular, se ubica en la parte centro-este del municipio, está constituida por una serie de lomas con dirección NW-SE que van desde el cerro Tepoxuchitl hasta el cerro de La Cruz en Tepeaca. Con respecto a la sierra Tentzo es una cordillera de lomas que atraviesa al sur del municipio de Puebla de oeste a este; alcanza alturas que oscilan entre los 100 y 400 m sobre el nivel del valle, y se extiende por los municipios de Tecali, Tzicatlacoyan, Huatlatlauca, Molcaxac, Tepexi y Puebla.

Por último, tenemos la depresión de Valsequillo, la cual se extiende en la parte sur del municipio al límite norte de la sierra de Tentzo, su fondo sirve de cause al río Atoyac el cual corre desde el oriente del Municipio hacia el sureste de este, formando el estrecho cañón llamado Balcón del Diablo donde se encuentra localizada la presa Manuel Ávila Camacho o de Valsequillo. Las estructuras que conforman la geomorfología del municipio de Puebla se pueden ubicar en la figura 2.



*Figura 2. Morfología de la Ciudad de Puebla, conformada por las estructuras del volcán La Malinche, La sierra Amozoc, la fosa Valsequillo y la Sierra Tentzo.*

### 1.4 Geología

De acuerdo con el Mapa de Geología Regional elaborado por el centro universitario para la prevención de desastres regionales en Puebla (CUPREDER, 2011) se reportan como estructuras más antiguas, una secuencia mesozoica de rocas calcáreas de areniscas, conglomerados y lutitas con edades que van desde el periodo Jurásico hasta el Cretácico subyacentes a un estrato de calizas, rocas sedimentarias también consideradas de edad Cretácica.

También se pueden encontrar rocas cenozoicas del Terciario, conformadas en su mayoría por rocas volcánicas como andesitas, tobas basaltos y piroclastos. Por último, tenemos el grupo de rocas más jóvenes correspondientes a secuencias vulcano-sedimentarias, depósitos de origen lacustre y aluviones del cuaternario cuya distribución dentro del municipio se puede apreciar en la figura 3.



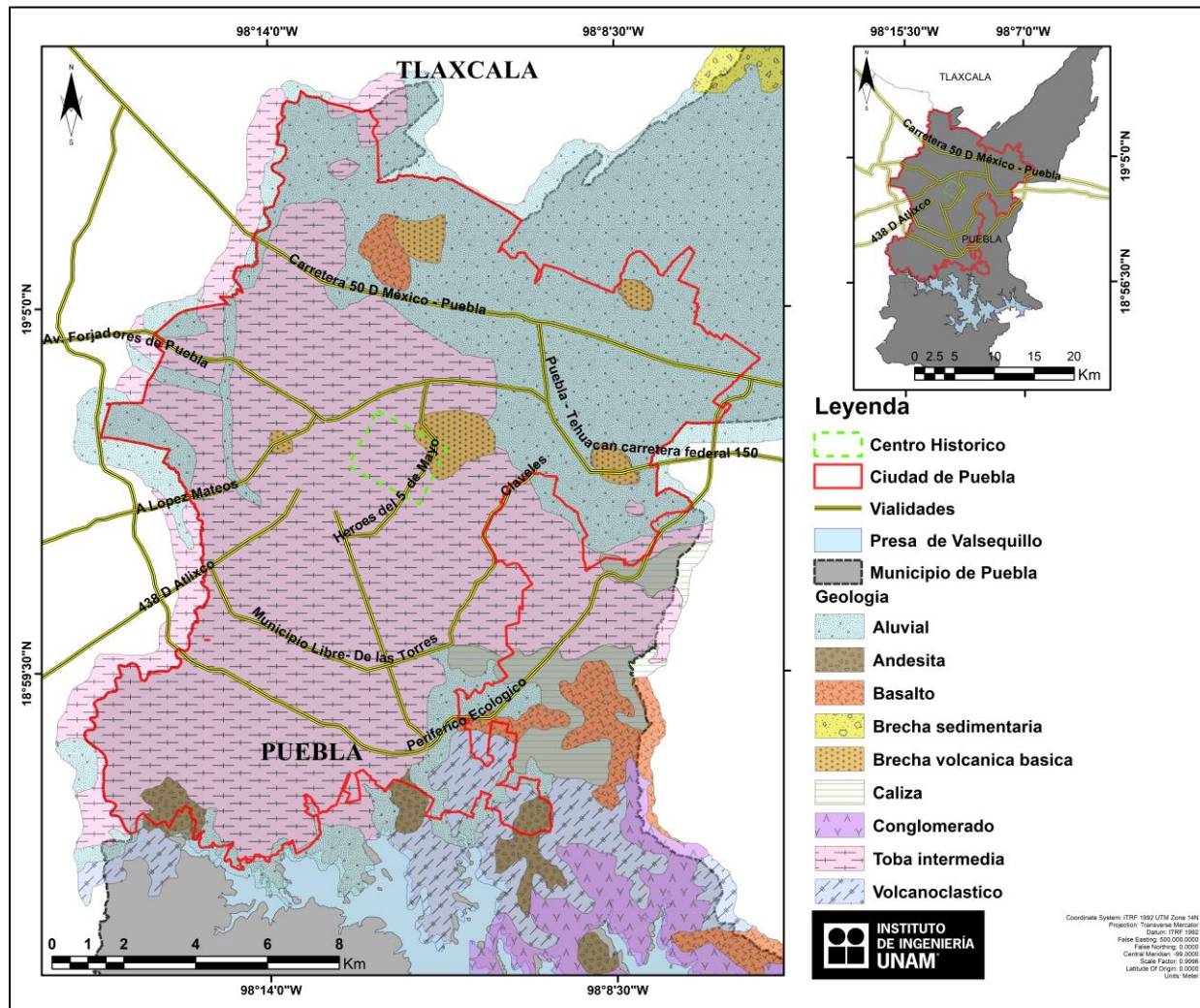


Figura 3. Mapa de la geología regional de la Ciudad de Puebla.

### 1.5 Geotecnia

La zonificación geotécnica elaborada por Azomoza *et al.* (1998) muestra depósitos eólicos de origen volcánico distribuidos prácticamente en toda la zona urbana, los cuales se identifican como Tobas y Lahares cuando se encuentran cementados. Al noreste de la ciudad estos depósitos eólicos se han encontrado en estado suelto conformados por espesores de hasta 20 m de materiales de baja resistencia al esfuerzo cortante y alta compresibilidad

Uno de los rasgos sobresalientes de parte importante de la Ciudad, incluyendo el Centro Histórico, son los depósitos hidrotermales donde el Travertino aparece como cementante de un material granular con espesores variables e intercalado en algunos sitios con arcillas y arenas. Las arcillas expansivas que se ubican en la parte sur y poniente de la Ciudad son de un color gris oscuro y suele presentar agrietamientos; muestran una alta resistencia al esfuerzo cortante en estado seco.

En la parte noroeste y a lo largo de los ríos que atraviesan la Ciudad se encuentran estratos de hasta más de 10 m de depósitos aluviales; se encuentran constituidos de arenas finas uniformes en presencia de niveles friáticos superficiales. Las calizas en el oriente de la ciudad generalmente se encuentran fracturadas y cubiertas por una capa vegetal de poco espesor y ocasional mente por las mismas arcillas expansivas.

Tenemos la presencia de Basaltos y Andesitas sanas o con grados medios de alteración principalmente en los cerros ubicados dentro de la Ciudad como lo son el cerro de Loreto, el de Guadalupe, San Juan, Amalucán y cerro Tepozúchitl. Por último, también se reportaron escorias basálticas en la zona del Cerro de la Paz representadas por arenas y gravas en estado suelto, pero con una resistencia alta si se encuentran confinadas. El mapa de zonificación geotécnica que ilustra lo descrito por (Azomoza, et al., 1998) se encuentra en la figura 4.

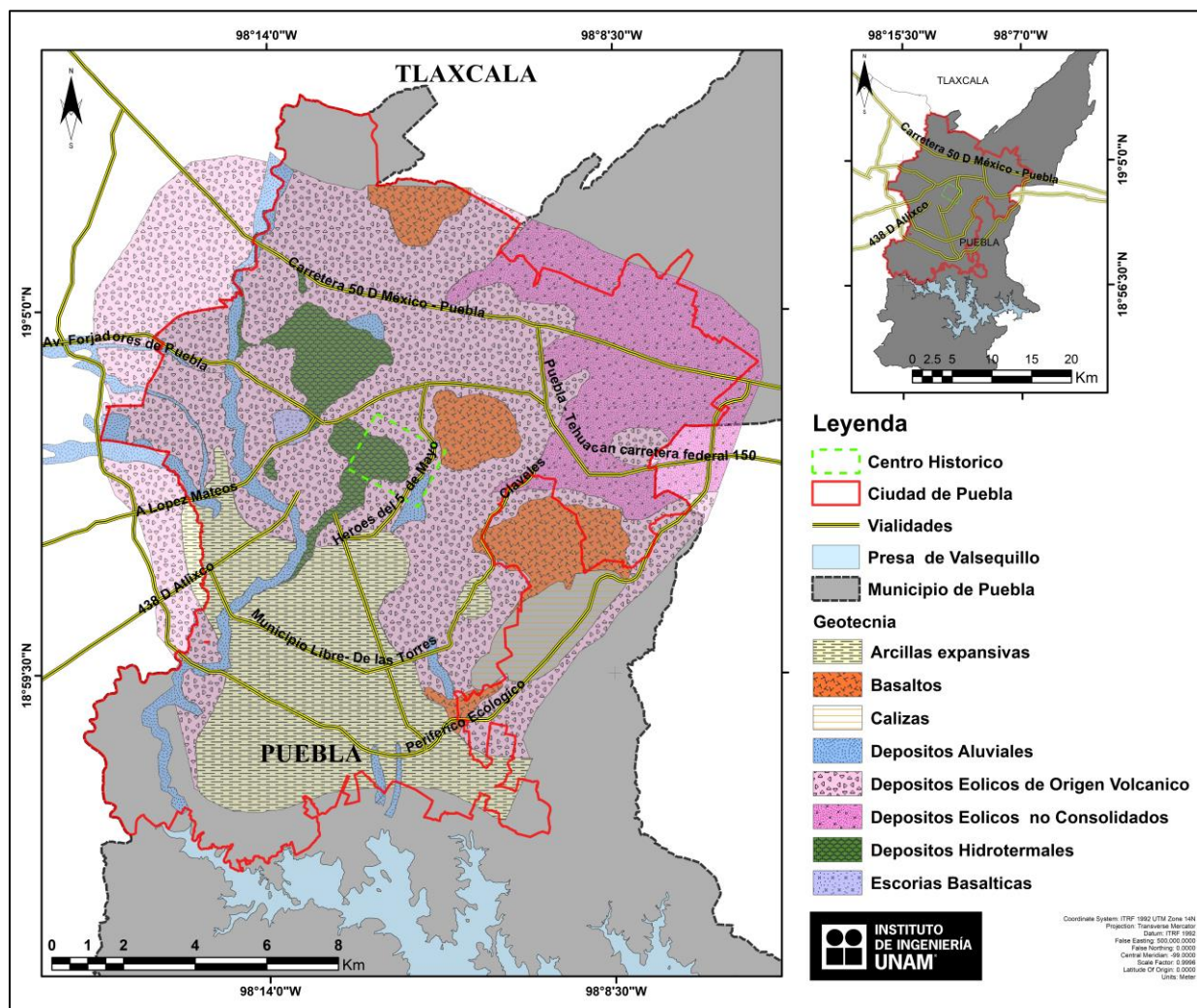


Figura 4. Zonificación geotécnica de la Ciudad de Puebla.



## 1.6 Zonas de Inundación

En el caso de la Ciudad de Puebla el crecimiento urbano ha ocupado las riberas de tres de los principales cauces, Atoyac, Alseseca y San Francisco. Estas áreas representan las zonas más bajas en la ciudad y las más vulnerables a inundaciones; por otro lado, en la parte norte el crecimiento industrial ha dejado zonas expuestas a las barrancas que descienden del volcán la Malinche, y las corrientes que estas llevan en los periodos de lluvia (CMIC, 2012).

El río Atoyac se encuentra en el lado poniente, mientras que la depresión orográfica de Valsequillo y algunos escurrimientos efímeros por la parte sur. Cabe mencionar que el río San Francisco representaba la corriente más significativa para el municipio, cruzaba el Centro Histórico de la Ciudad de norte a sur, pero el crecimiento urbano ocasionó que esta corriente partiera la mancha urbana por la mitad, lo que llevo al entubamiento de su cauce; esto alentó a la construcción de áreas comerciales, las cuales ahora quedaron expuestas a inundaciones por el deficiente drenaje urbano así como una cimentación vulnerable debido a los materiales arcillosos que dejó el cauce.

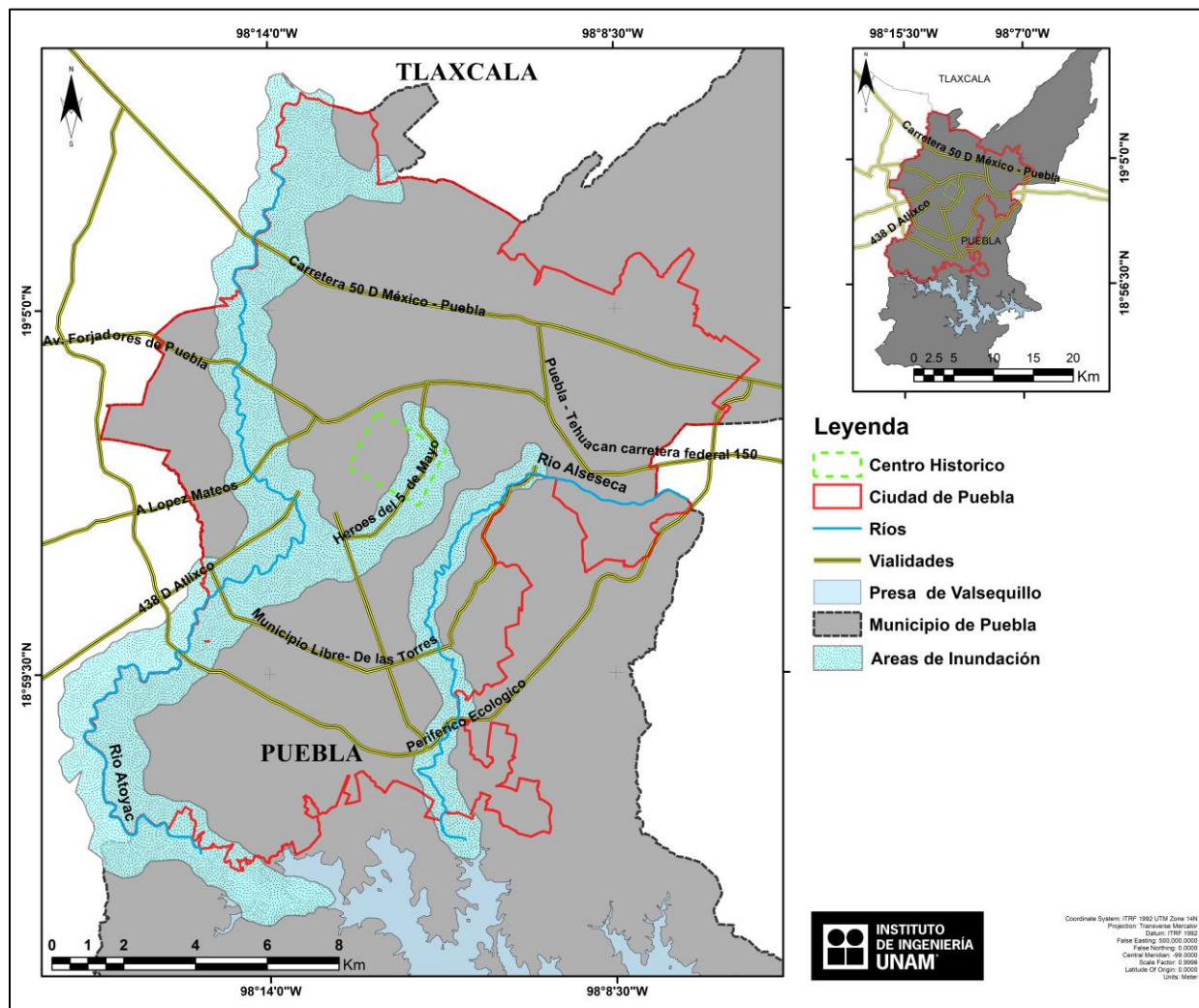


Figura 5. Zonas de Inundación y ríos de la Ciudad de Puebla.

Para delimitar las zonas de inundación, Lermo *et al.* (2013) emplean una metodología que se basa en modelos digitales de elevación generados computacionalmente en SIG, Map Info y Arc View; en esta metodología, se toma como hipótesis que en las zonas de lomeríos se realiza el proceso de erosión hídrica, esto debido a que la energía cinética del flujo aumenta en las zonas de mayor pendiente lo que da lugar a que los sedimentos de distintos materiales transportados en el proceso se concentren en zonas donde la velocidad de flujo disminuye o zonas de pendientes con menor inclinación (los valles).

Las zonas de inundación pueden determinar las áreas de depósito de los materiales erosionados, en partes de la cuenca que con el paso del tiempo genera suelos geotécnicamente blandos, por lo que puede ser de gran ayuda al diseñar campañas de medición de ruido sísmico (Medrano, 2012). Las zonas de inundación de la Ciudad de Puebla se encuentran alrededor del cauce de los ríos como se aprecia en la figura 5.

## **2. MARCO TEÓRICO**

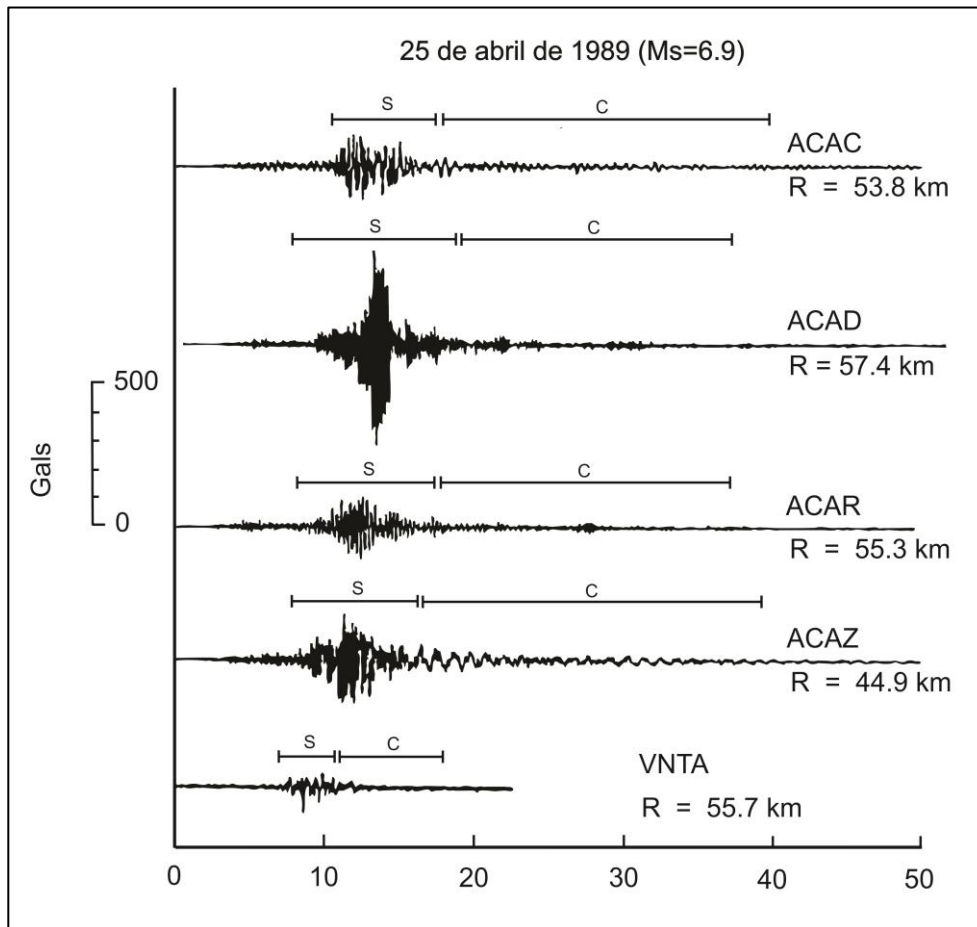
### **2.1 Efecto de sitio**

Se conoce como efecto de sitio a la respuesta sísmica del terreno con características significativamente distintas en amplitud, duración o contenido de frecuencias de un área relativamente reducida con respecto al entorno regional. En otras palabras, podría decirse que el efecto de sitio es aquella condición bajo la cual se llegan a observar intensidades sísmicas notablemente distintas y bien localizadas sin que haya una correlación con la atenuación normal de la energía sísmica con la distancia (CENAPRED, 2014).

Un ejemplo de efecto de sitio se muestra en la figura 6, donde se comparan acelerogramas de un evento sísmico tomado en diferentes sitios de la ciudad de Acapulco; con una distancia epicentral de entre 15 y 60 Km, en cada punto de registro se aprecia un cambio en amplitud, contenido de frecuencias y duración de la señal.

El efecto de sitio se obtiene al calcular la frecuencia y amplitud de registros de sismos o de vibración ambiental, usando la relación espectral entre los movimientos horizontales y verticales (H/V); o también al calcular los espesores y propiedades mecánicas de los estratos que conforman el subsuelo. Lermo *et al.* (1993) demuestran que utilizando microtremores se obtiene una estimación de la frecuencia de resonancia del suelo.

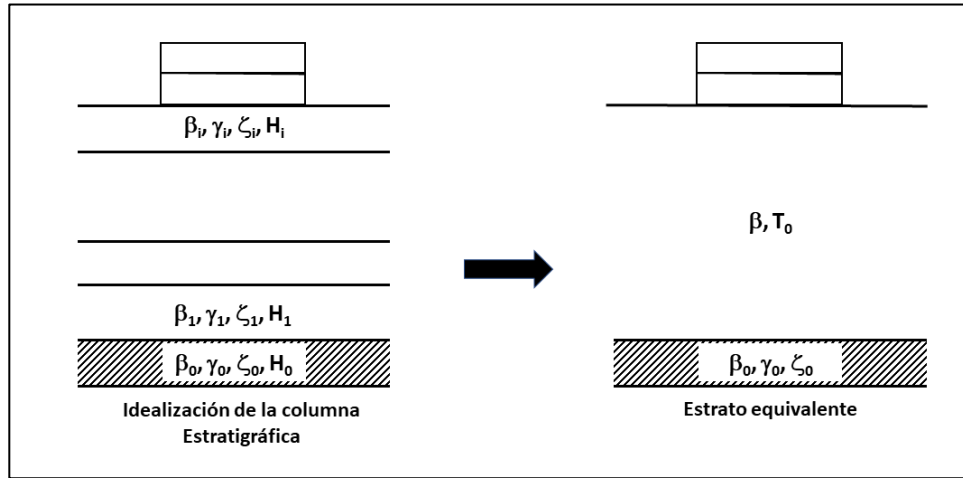
Estudios más recientes (Sánchez-Sesma, et al., 2011) proponen que el cociente H/V obtenido con microtremores MHVSR (Microtremor Horizontal to Vertical Spectral Ratio) es un estimador adecuado del efecto de sitio; ya que, al considerar que el ruido sísmico es una onda de campo difuso que contiene todo tipo de ondas, esta es capaz de describir las propiedades dinámicas del suelo.



**Figura 6.** Acelerogramas del sismo del 25 de abril de 1989 Ms=6.9 registrados en distintos tipos de suelo en la Ciudad de Acapulco, (CENAPRED, 2014).

## 2.2 Parámetros que influyen el efecto de sitio

Al identificar los parámetros que influyen en el fenómeno de efecto de sitio, usualmente es mencionado el método teórico propuesto por Haskell (1962), el cual se basa en una propagación unidimensional de las ondas dentro de un medio estratificado (Limaymanta Mendoza, 2009). Haskell propone su teoría suponiendo que el comportamiento del suelo es lineal en cualquier estrato, estos deben ser horizontales, extenderse lateralmente hasta el infinito y descansar sobre un semiespacio homogéneo; a estas suposiciones hay que agregar una incidencia vertical de las ondas S polarizadas horizontalmente y simplificar el modelo estratigráfico a un solo estrato equivalente que mantenga el periodo dominante ( $T_0$ ) y la velocidad de propagación de la onda S ( $\beta$ ) como se muestra en la figura 7, donde se aprecia que también influyen la densidad del material ( $\gamma_i$ ), amortiguamiento del material ( $\zeta_i$ ) y el espesor del material ( $H_i$ ).



**Figura 7.** Perfil estratigráfico real y perfil equivalente. Modificado de Montecillo (1996).

En este modelo estratificado el tiempo total  $T$  que tardan las ondas en atravesar los estratos para llegar a la superficie depende del cociente del espesor ( $H_i$ ) y la velocidad de propagación de la onda  $S$  ( $\beta_i$ ) de cada estrato.

$$T = \sum \frac{H_i}{\beta_i} \quad (1)$$

Si se simplifica un perfil con cierto número de estratos a un solo estrato de espesor dado por  $H = \sum H_i$  la velocidad de onda quedaría definida por:

$$\beta = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{\beta_i}} \quad (2)$$

Tomando en cuenta la ecuación de onda para incidencia vertical definida por AKI, (1980) tenemos el periodo dominante de vibración del medio  $T_0$  este dado por un cociente entre cuatro veces el espesor del medio y la velocidad de cortante del mismo medio:

$$T_0 = \frac{4H}{\beta} \quad (3)$$

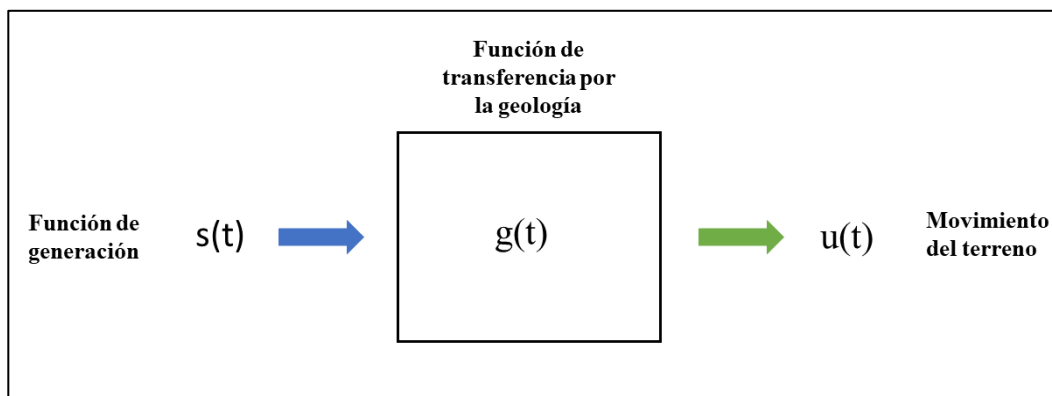
Combinando las ecuaciones 2 y 3 y recordando que  $H$  es un espesor equivalente de todos los estratos que conforman el medio al igual que la velocidad de onda  $S$  que son expresados como una sumatoria de cada estrato en dicho medio, podemos expresar también el periodo de vibración del suelo de la siguiente manera:

$$T_0 = \frac{4 \sum H}{\sum H_i (\sum H_i / \beta_i)} = 4 \sum \frac{H_i}{\beta_i} \quad (4)$$

Esta ecuación valida la hipótesis de un modelo estratificado simplificado a un solo estrato equivalente que conserva las características de la velocidad de onda  $S (\beta_i)$  y periodo dominante ( $T_0$ ); por lo tanto, se puede decir que el periodo fundamental de vibración de suelo y la amplificación relativa para dicho periodo son los parámetros que definen al efecto de sitio, ya que estos engloban las características dinámicas del medio y permiten realizar una estimación numérica del fenómeno.

### 2.3 Funciones de transferencia

Las funciones de transferencia (FT) que se emplean en este trabajo se asemejan a un modelo matemático (figura 8), el cual se encarga de determinar las características dinámicas de un estrato superficial o el movimiento del terreno en función de las características dinámicas de la roca base o suelo firme.



**Figura 8.** Esquema de función de transferencia, (Limaymanta Mendoza, 2009).

Las FT se representan a partir del periodo dominante ( $T_0$ ) y la amplificación relativa ( $A_r$ ); ambos son parámetros que describen las propiedades dinámicas del medio. Por lo tanto, esto supone que la convolución de la señal inicial en el basamento con la función de transferencia, la cual representa las propiedades del medio por la que pasan las ondas, da como resultado el movimiento en superficie producido por dicha señal.

### 2.4 Cálculo de funciones de transferencia

Las FT se pueden calcular empleando tanto metodologías teóricas como empíricas. Los métodos teóricos se basan en modelos matemáticos de propagación de onda, como por ejemplo el método de Haskell, (1962), que se basa en la teoría de propagación unidimensional de ondas, para calcular la función de transferencia (FT) de un medio estratificado; es importante mencionar que estas metodologías requieren información geofísica, geológica y geotécnica con un alto nivel de detalle, por lo que en ocasiones esto representa una desventaja en su aplicación (Lermo, et al., 1994).

Por otro lado, los métodos empíricos se basan en la instrumentación para el registro de señales sísmicas (sensores de velocidad y aceleración), con la finalidad de determinar el periodo dominante o

frecuencia fundamental y la amplificación relativa del suelo. Para ello, se utilizan los registros de movimientos fuertes y débiles además de los registros de vibración ambiental o microtremores.

EL presente trabajo utiliza el cociente espectral H/V como una pseudo función de transferencia empírica (FTE); algunos de los métodos para empleados para el cálculo de dichas funciones son:

#### ***2.4.1 Razón Espectral Estándar (Standard Spectral Ratio, SSR)***

Esta técnica fue aplicada por Borchardt, (1970), la cual consiste en dividir los espectros de Fourier de las componentes horizontales de la estación de interés entre el espectro de Fourier de la estación de referencia la cual debe localizarse en la formación del basamento rocoso preferentemente. Además, para fines de ingeniería sísmica debe cumplir con una velocidad de onda S mínima de 700 m/s.

Las desventajas de esta técnica son:

- Se requiere necesariamente una estación de referencia.
- Se debe obtener registros de sismos simultáneamente en las estaciones de suelo de interés y la de referencia.
- Es necesario el registro de sismos moderados y/o grandes comprendidos a partir de una magnitud  $M_w \geq 5.0$ , para una buena estimación del cociente espectral.

#### ***2.4.2 Razón espectral de la componente horizontal a la componente vertical, Técnica de Nakamura para sismos, (EHVSR)***

A diferencia de la técnica SSR, esta metodología (Earthquake Horizontal to Vertical Spectral Ratio o EHVSR) no requiere de una estación de referencia ya que se basa en la hipótesis de que sólo la componente horizontal es influenciada por la estructura local, por lo que se emplea únicamente la técnica de Nakamura en la zona de interés (Lermo, et al., 1993). Dicha técnica utiliza la fase intensa de la onda de corte para dividir el espectro de amplitud de Fourier de la componente horizontal por el espectro de la componente vertical (H/V); aunque se requiere de una geología relativamente simple, no se tiene el problema de emplear registros simultáneos.

#### ***2.4.3 Razón Espectral Relativa a la Componente Vertical, Técnica de Nakamura (MHVSR)***

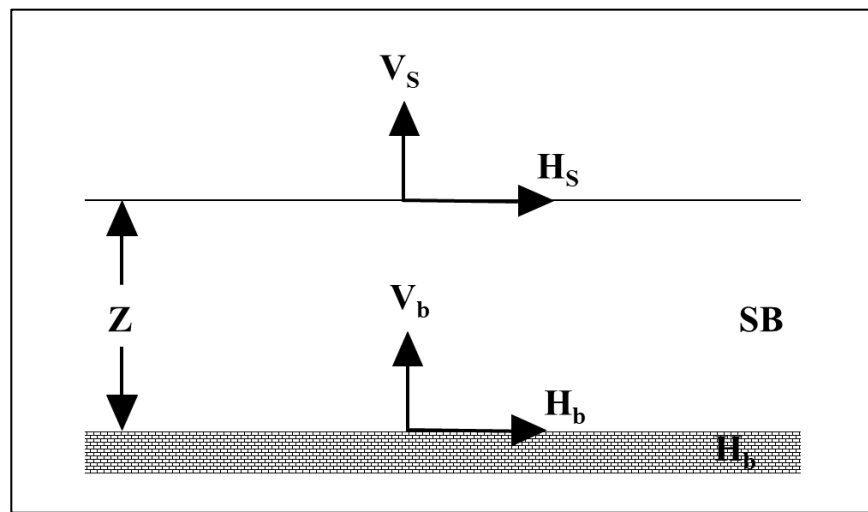
Esta técnica (Microtremor Horizontal to Vertical Spectral Ratio o MHVSR) propuesta por Nakamura, (1989) se basa en el cociente espectral entre la componente horizontal y vertical del registro de microtremores. Nakamura parte de la hipótesis de que los microtremores principalmente son registros de ondas Rayleigh; además de esto, también supone un medio estratificado de suelo



blando que sobreyace a un espacio de suelo firme. Bajo estas condiciones, cuatro son los espectros de Fourier que se involucran en el problema.

- $V_s$ ,  $H_s$ , espectros de Fourier de las componentes vertical y horizontal del movimiento en la superficie.
- $V_b$ ,  $H_b$ , espectros de Fourier de las componentes vertical y horizontal del movimiento en el substrato.

La figura 9 muestra el modelo a partir del cual se desarrolla esta técnica; en esta se puede observar un solo estrato blando (SB) que descansa sobre un semiespacio de roca (R), en el medio SB es por donde se propagan las ondas Rayleigh.



**Figura 9.** Modelo estratigráfico de la técnica de Nakamura.

De acuerdo con Nakamura el efecto de la fuente se encuentra representado por la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{V_s}{V_b} H \quad (5)$$

Donde  $A_s$  es el efecto de la fuente,  $V_s$  es espectro de Fourier de la componente vertical en la superficie,  $V_b$  el espectro de Fourier de la componente vertical en la base rocosa y  $H$  el espesor del estrato de material blando. Por otro lado, el efecto de sitio  $S_E$  está determinado por el cociente del espectro de Fourier de la componente horizontal en superficie  $H_s$  con el espectro de Fourier de la componente horizontal en la base rocosa  $H_b$  (Definición de Función de Transferencia Empírica FTE), como lo describe la ecuación siguiente:

$$S_E = \frac{H_s}{H_b} \quad (6)$$

Para compensar esta expresión por el efecto de fuente, define una relación espectral de efecto de sitio modificada,  $S_M$ , como sigue:

$$S_M = \frac{S_E}{A_s} = \frac{\frac{H_s}{H_b}}{\frac{V_s}{V_b}} = \frac{\frac{H_s}{V_s}}{\frac{H_b}{V_b}} \quad (7)$$

Nakamura comprobó experimentalmente la siguiente relación:

$$\frac{H_b}{V_b} = 1 \quad (8)$$

Siguiendo el procedimiento de Nakamura, al aplicar la relación anterior a la ecuación 7 se obtiene:

$$S_M = \frac{H_s}{V_s} \quad (9)$$

Esto implica que la función de transferencia de capas superficiales puede ser calculada con registros de microtemores en la superficie y que la componente vertical de éstas mantiene las características de la componente en el basamento o sustrato.

### **2.5 Relación entre efecto de sitio y daños en edificios**

De acuerdo con diversos estudios, por ejemplo (Seed, 1986), se concluye que en estructuras bajas de periodo relativamente corto se espera daños máximos e intensidad sísmica máxima cuando se encuentran desplantadas en depósitos de suelo de poco espesor (periodo corto) e intensidad y daños mínimos en depósitos de suelos profundos (periodos largos). Por el contrario, en estructuras altas de periodo largo se espera daños máximos e intensidades sísmicas máximas cuando se encuentran desplantadas en depósitos de gran espesor (periodo largo) y daños mínimos en depósitos de poco espesor (periodo corto).

Estas conclusiones sugieren que cuando el periodo predominante de la estructura es similar a la del terreno puede desarrollarse el efecto de resonancia y la respuesta del edificio será muy elevada, en caso contrario, cuando estos periodos son diferentes no existirá una interacción fuerte entre el suelo y la estructura y la respuesta estructural es baja.

### **2.6 Estimación de aceleración en superficie**

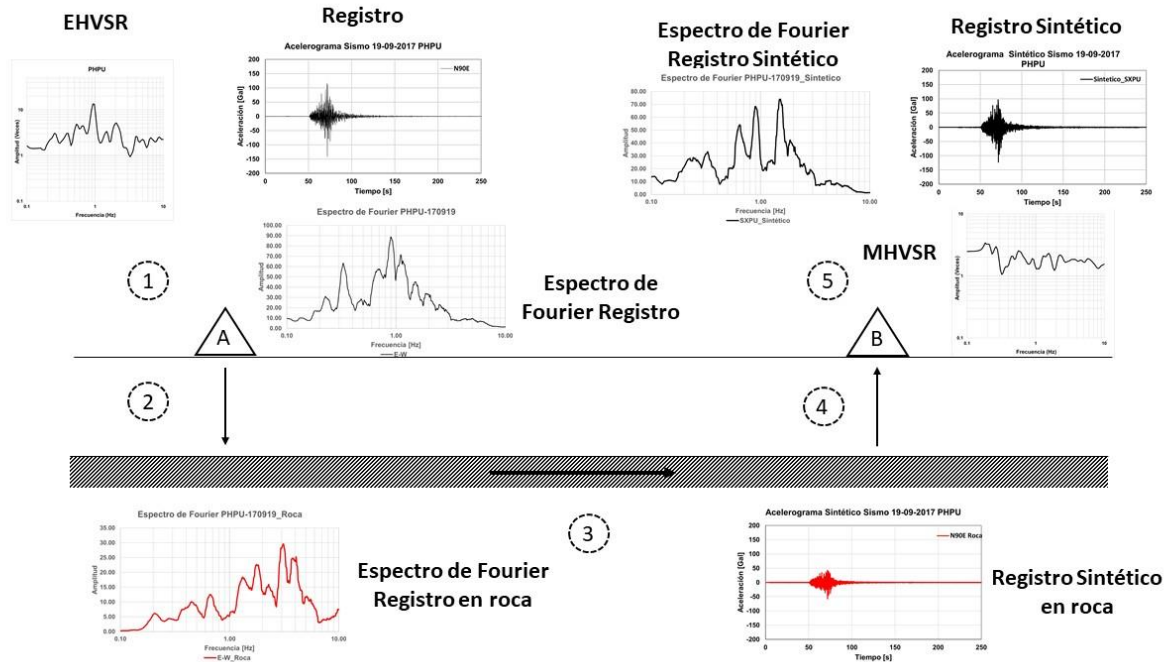
Es posible evidenciar el efecto de sitio a través del conjunto de registros de un sismo realizados en distintos puntos de la zona de estudio, esto, al analizar en conjunto las diferencias en amplitud y duración de las señales. Sin embargo, es poco común tener un gran número de estaciones registrando la sismicidad en alguna zona en específico, por lo que se recurre a generar señales sintéticas que logren reproducir las diferencias de amplificación de las señales sísmicas; para ello se necesita de

una señal libre de efecto de sitio y una función de transferencia que describa adecuadamente las propiedades dinámicas del suelo para determinar la respuesta del sitio de interés.

Nakamura, (1989) propuso un enfoque alternativo específico del sitio para evaluar los efectos del sitio, es decir, la técnica de relación espectral horizontal-vertical (H/V) (MHVSR). MHVSR no requiere un modelo de sitio y se puede aplicar en registros de ruido o terremoto (Lermo, et al., 1993). Por lo tanto, el método MHVSR es bastante rentable y, por lo tanto, ha sido el foco de numerosas investigaciones revisadas por muchos (Bard, 1999). Existe un consenso de opinión de que MHVSR se asemeja a la función de transferencia empírica (FTE) en forma (alineación de picos y valles) y se puede utilizar para evaluar de manera confiable la frecuencia de resonancia fundamental del sitio (Kawase, et al., 20018).

En este trabajo se utilizó el cociente espectral H/V para estimar el nivel de amplificación en las señales sintéticas que se calcula con la metodología descrita en la figura 10. Donde se muestra paso a paso la estimación de acelerogramas sintéticos en superficie en un Punto B, a partir de las aceleraciones registradas en roca (Punto A). La metodología consiste en:

- 1) En el Punto A se cuenta con un EHVSR, que, en este caso, es el promedio de varias estimaciones de H/V obtenidas de los registros de sismos de diferente magnitud y el Registro de una señal sísmica el cual requiere estar libre de efecto de sitio.
- 2) Para corregir la señal por efecto de sitio, se aplica la transformada rápida de Fourier al registro de la señal sísmica; de esta forma, se trabaja con el espectro de amplitud de dos señales en el dominio de las frecuencias, el EHVSR y el Espectro de Fourier del Registro. A estos espectros se aplica la operación matemática de Deconvolución para así sustraer la amplificación del sitio en la señal. Es importante mencionar que los espectros de Fourier deconvolucionados toma únicamente el espectro de amplitud, mientras que el espectro de fase se emplea para obtener la señal sintética resultante en el dominio del tiempo.
- 3) El resultado de la corrección por efecto de sitio es un espectro de Fourier del registro en roca; esta señal sintética, ya no cuenta con la amplificación que produce el efecto de sitio, y al aplicar la transformada inversa de Fourier se obtienen el Registro en roca del sismo.
- 4) Para mover la señal del basamento a la superficie en el punto B, nuevamente utilizamos los espectros de amplitud de Fourier de dos señales; se requiere de un MHVSR que represente el grado de amplificación y periodo dominante característico de dicho punto y el espectro de Fourier del registro en roca. Con estas señales se realiza la operación matemática de Convolución para esta vez multiplicar el efecto de sitio a la señal sísmica.
- 5) El resultado de la convolución es un Espectro de Fourier del Registro Sintético, el cual, al aplicarle la transformada inversa de Fourier, pasamos del dominio de las frecuencias al dominio del tiempo, para obtener Registro Sintético que se estima para el punto B. Dicho registro representa las aceleraciones del registro en el punto A, pero con el efecto de sitio estimado en el punto B.

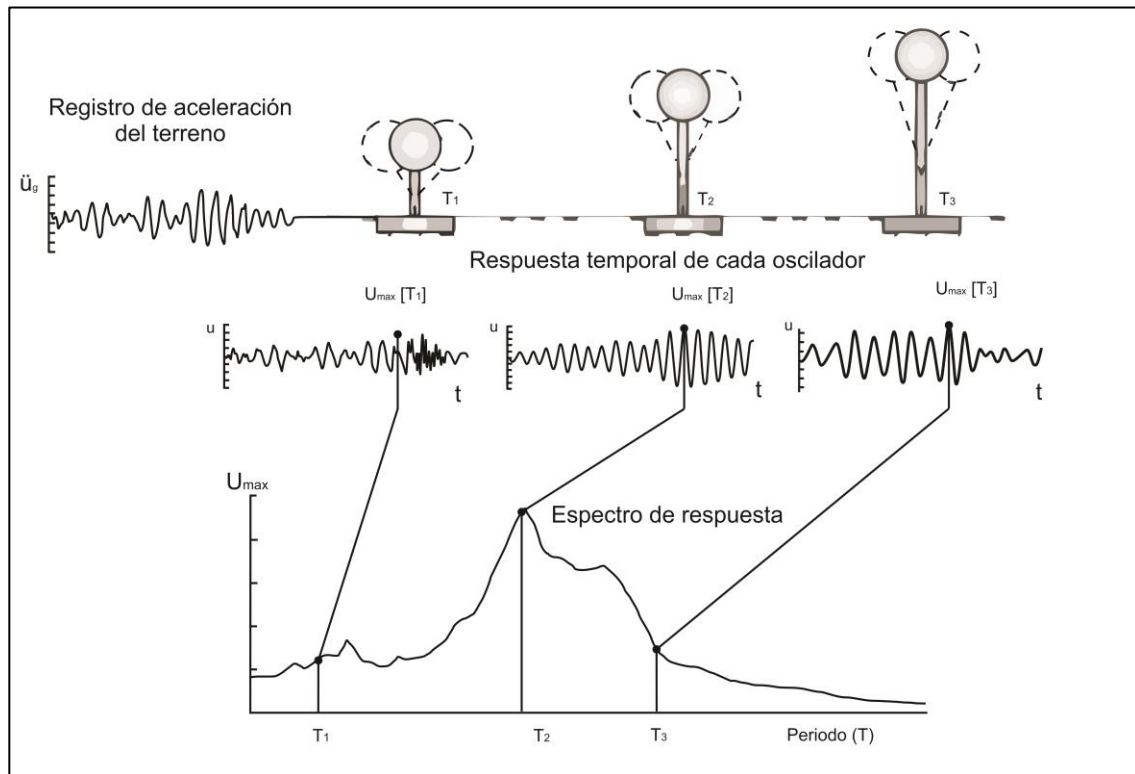


**Figura 10.** Metodología para la estimación de aceleración en superficie en un punto B a partir del registro de aceleraciones en un determinado punto A

## 2.1 Espectros de respuesta

El espectro de respuesta es definido como la respuesta máxima en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración entre otros parámetros, que produce una acción dinámica determinada sobre el medio o una estructura. Los espectros se representan en periodo o frecuencia en las abscisas y en las ordenadas la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento ( $\xi$ ).

De forma conceptual, un espectro de respuesta se construye al considerar una serie de estructuras de un grado de libertad o análogamente a oscilaciones simples (conjunto de osciladores) con diferentes periodos de vibración  $T$  y con igual factor de amortiguamiento,  $\xi$  (Figura 11). Si se aplica la acción de un mismo terremoto a todos los osciladores (por medio de un registro de aceleración) cada uno de estos tendrá una respuesta distinta. Una vez calculada la respuesta en cada uno de los osciladores se determina el valor máximo absoluto de aceleración, estos valores se manifiestan de forma gráfica en función del periodo de vibración  $T$ . Entonces para cada valor de periodo  $T$ , le corresponde un valor de la respuesta máxima de cada oscilador (Medrano Rivera, 2003).



**Figura 11.** Esquema conceptual de la realización de un espectro de respuesta a partir de oscilaciones simples. (Medrano Rivera, 2003)

### 3. ANÁLISIS Y PROCESADO DE DATOS

El Instituto de Ingeniería de la UNAM ha participado en varios proyectos que llevan a cabo el estudio de las características dinámicas del suelo en la ciudad de Puebla (Chavez-Garcia, et al., 1995); (Lermo, et al., 2008); (Hernández Estrada, et al., 2013); en este trabajo se analizan tres en particular cuyo enfoque fue el determinar las propiedades del periodo dominante y la amplificación relativa del suelo mediante las técnicas de los cocientes espectrales H/V (MHVSR Y EHVSR).

#### 3.1 Base de datos

Se recopilaron los datos procesados y analizados de los siguientes trabajos:

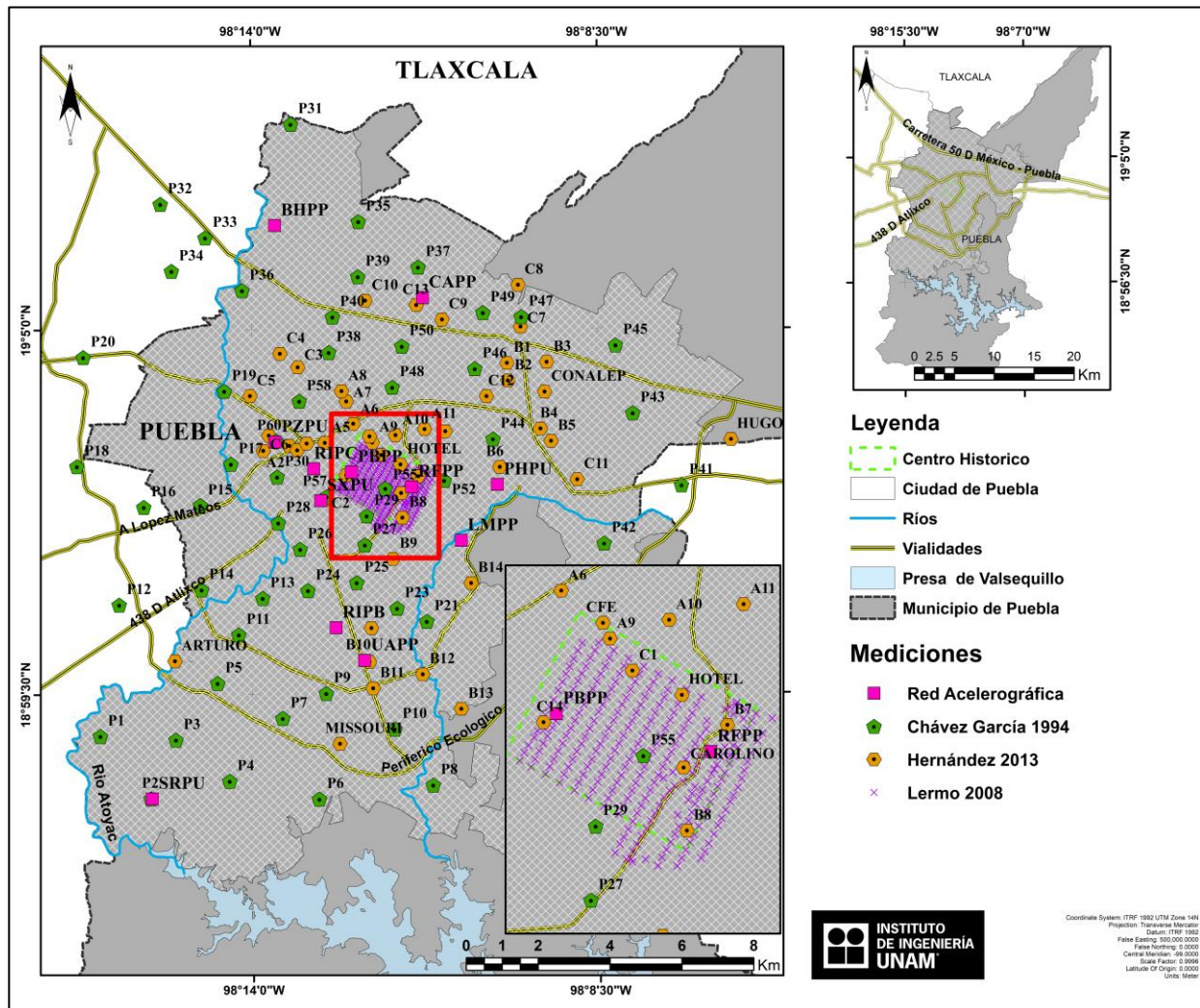
1. Chavez-Garcia, *et al.*, (1995), quienes registraron microtemores en 39 sitios, utilizando un sismógrafo DR100 de Sprengnether, acoplado a tres sismómetros marca Kinematics de 5 s de periodo natural; además procesaron acelerogramas de 4 estaciones de la red sísmica de Puebla (Serrano, 1990). Por último, instalaron 6 estaciones para el registro de sismos

regionales, logrando el registro de 7 sismos, con los cuales comparan la técnica de la razón estándar (SSR), con la EHVSR.

2. Lermo, *et al.*, (2008) describen una metodología empleada para llevar a cabo una propuesta de zonificación sísmica del centro histórico de la ciudad Puebla; basado en la reglamentación Vs 30. Se describe desde el proceso de adquisición de los datos, hasta la obtención de los modelos de velocidad de cortante que se determinaron a través de un modelo teórico relacionando estudios geotécnicos y estudios geofísicos. En este trabajo se obtuvieron 200 puntos aproximadamente en los cuales se realizaron registros de vibración ambiental, datos que después fueron procesados mediante la técnica de cocientes espectrales H/V para microtemores.
3. Hernández Estrada, *et al.*, (2013) realizaron el registro de vibración ambiental en 52 puntos utilizando sismómetros y acelerómetros. Los sismómetros fueron CMG-40T y CMG-40TD de Guralp Systems, mientras que los acelerómetros fueron K2, Etna y Basalt de Kinometrics, esto fue con la finalidad de evaluar el comportamiento de los distintos equipos en frecuencias de entre 0.1 y 1 Hz, lo que permitió descartar los datos obtenidos con acelerógrafos, por no mostrar amplificaciones en este rango de frecuencias y subestimar amplitudes en frecuencias más altas.
4. La red acelerográfica de la ciudad de Puebla cuenta con poco más de 10 estaciones de las cuales se obtuvieron registros de movimientos fuertes distribuidos en distintas zonas de la ciudad. Cada estación cuenta con instrumentos de alta precisión que registran la aceleración del terreno en tres direcciones (N-S, E-W y vertical) (Serrano, 1990). Con el catálogo de sismos del Anexo 3, se logró obtener los cocientes espectrales de 12 estaciones de la red acelerográfica cuyas funciones se obtuvieron mediante la metodología de los cocientes espectrales entre las componentes horizontales y la vertical para sismos (Lermo, et al., 1993).

En la figura 12 se muestran los puntos de medición de las distintas campañas analizadas; en color verde la ubicación de los datos de (Chavez-Garcia, et al., 1995), en color morado, la parte del centro histórico con los datos de (Lermo, et al., 2008), para una mejor visualización se presenta un acercamiento de la zona, en color naranja, los datos de (Hernández Estrada, et al., 2013) y por último en recuadros rosas las estaciones acelerográficas de la red de la Ciudad de Puebla.

La base de datos que se integró con alrededor de 150 cocientes espectrales (H/V); estos están agrupados para su análisis con un intervalo de frecuencias de 0.1 Hz a 10 Hz y con la misma frecuencia de muestreo. Las figuras de cada cociente espectral se muestran en el Anexo 1.



**Figura 12.** Ubicación de los puntos de medición de cada campaña, se muestra los ríos en color azul y el límite municipal de Puebla en una línea punteada color negro. Recuadro rojo indica la zona ampliada del centro histórico.

### 3.2 Familias espectrales

Considerando los rasgos predominantes de la forma espectral en el conjunto de cocientes H/V se formaron 5 principales grupos o familias, los cuales se muestran en la figura 13.

Después de analizar el conjunto de cocientes espectrales por su forma, se descartan varios de los datos con el fin de conservar únicamente aquellos que cumplieran con las características de las familias formadas; también se descartaron algunos de los datos que fueron medidos con instrumentación que limita el rango de frecuencias del espectro, ya que estos figuran una mala representación de las propiedades dinámicas del suelo; no muestran amplificación en frecuencias menores a 1 Hz y subestiman la amplitud en altas frecuencias. Los datos restantes están agrupados bajo las siguientes características:

- La familia 1 no muestra amplificación clara dentro del espectro de frecuencias analizado, y su amplitud en general no rebasa un valor de 3.
- La familia 2 presenta un pico de amplificación claro en frecuencias de entre 4 y 8 Hz, algunos también muestran un segundo pico con menor amplitud en frecuencias de entre 1 y 2 Hz.
- La familia 3 muestra su pico principal de amplitud en frecuencias de 2 a 4 Hz; también algunos de los datos tienen un segundo pico de amplitud en frecuencias de entre 1 y 2 Hz.
- La familia 4 la componen cocientes espectrales que tienen un claro pico principal de amplificación en frecuencias de entre 1 y 2 Hz; la respuesta característica de esta familia es representativa de la zona, no solo es la que mayor número de datos posee, sino que también suele mostrarse como una respuesta secundaria dentro de otras familias.
- La familia 5 se caracteriza por presentar el pico principal de amplificación en frecuencias bajas, las cuales van de entre 0.4 y 1 Hz.
- Existe un grupo de cocientes H/V marcados como anómalos ya que presentan características que no concuerdan con las de otras familias.

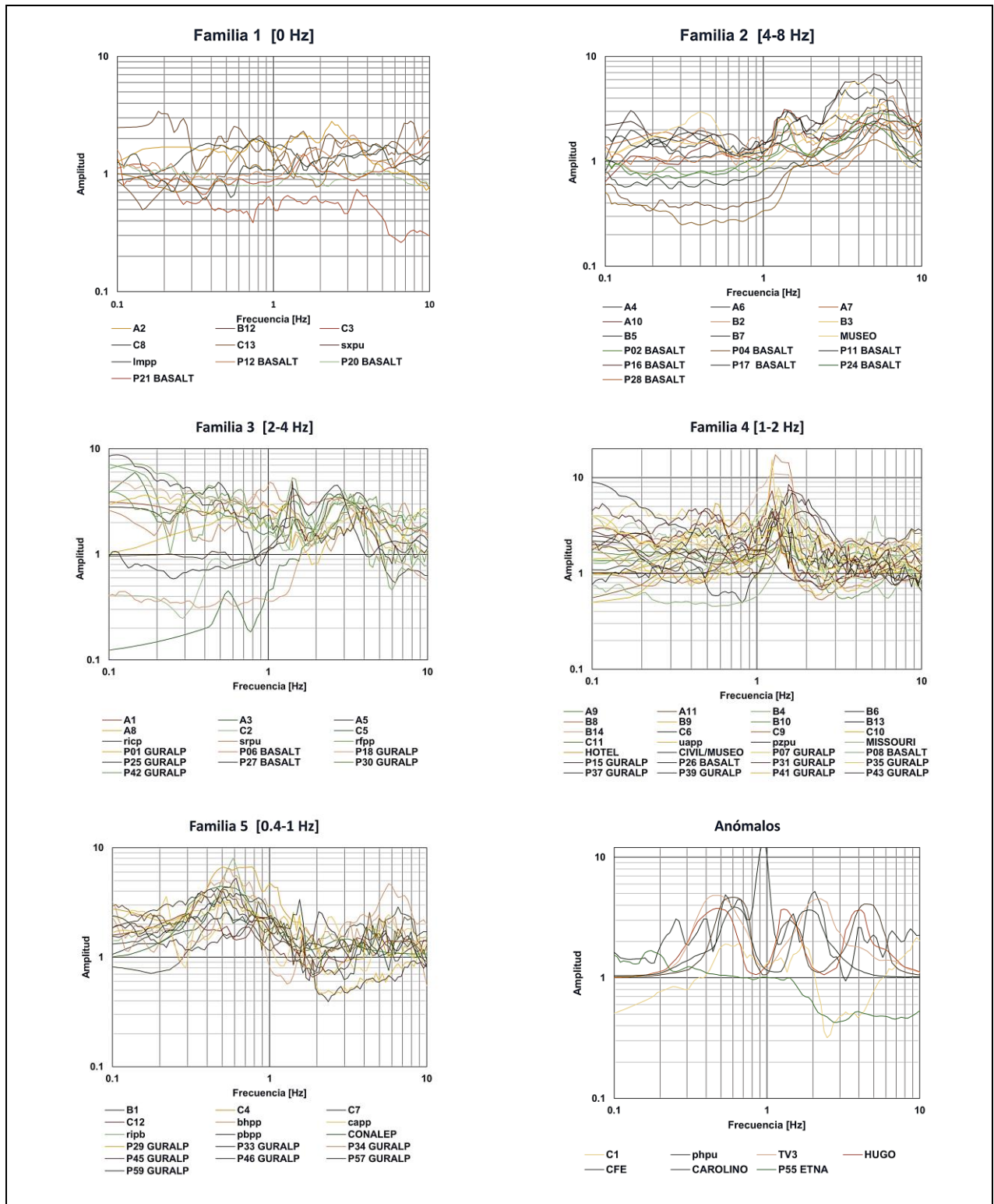
Los cocientes espectrales mostrados en la figura 13 no son todos los utilizados en este trabajo, se muestran únicamente los más representativos de cada familia para ilustrar mejor las características de cada una de ellas. El análisis completo de cada cociente espectral se presenta en las tablas del Anexo 2; se muestra la ubicación de cada cociente espectral, la amplitud y la frecuencia utilizados, así como la familia a la que es asignado.

### **3.3 Sismos característicos**

Para poder utilizar las señales sísmicas provenientes de distintas zonas sismogénicas en la elaboración de los escenarios sísmicos, se revisó la “Base de datos de registros acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana”, manejada por el instituto de Ingeniería de la UNAM, esta contiene las estaciones que permanentemente están registrando movimientos fuertes en la ciudad de Puebla. Se obtuvo la señal de 3 importantes sismos, el sismo del 19 de septiembre de 1985 Mw 8.1, el sismo del 19 de septiembre de 2017 Mw 7.1 y el sismo del 15 de junio de 1999 Mw 7.0; estos registros se obtuvieron de distintas estaciones de la Ciudad de Puebla.

El resumen de las características de estos eventos y las estaciones que lograron registrarlos se encuentran descritos en la tabla 1.





**Figura 13.** Cocientes espectrales H/V de la zona urbana del municipio de Puebla; agrupados por su forma espectral, recuadro superior izquierdo grupo 1, recuadro superior derecho grupo 2, recuadro central izquierdo grupo 3, recuadro central derecho, grupo 4 recuadro inferior izquierdo grupo 5 y recuadro inferior izquierdo grupo anómalo.

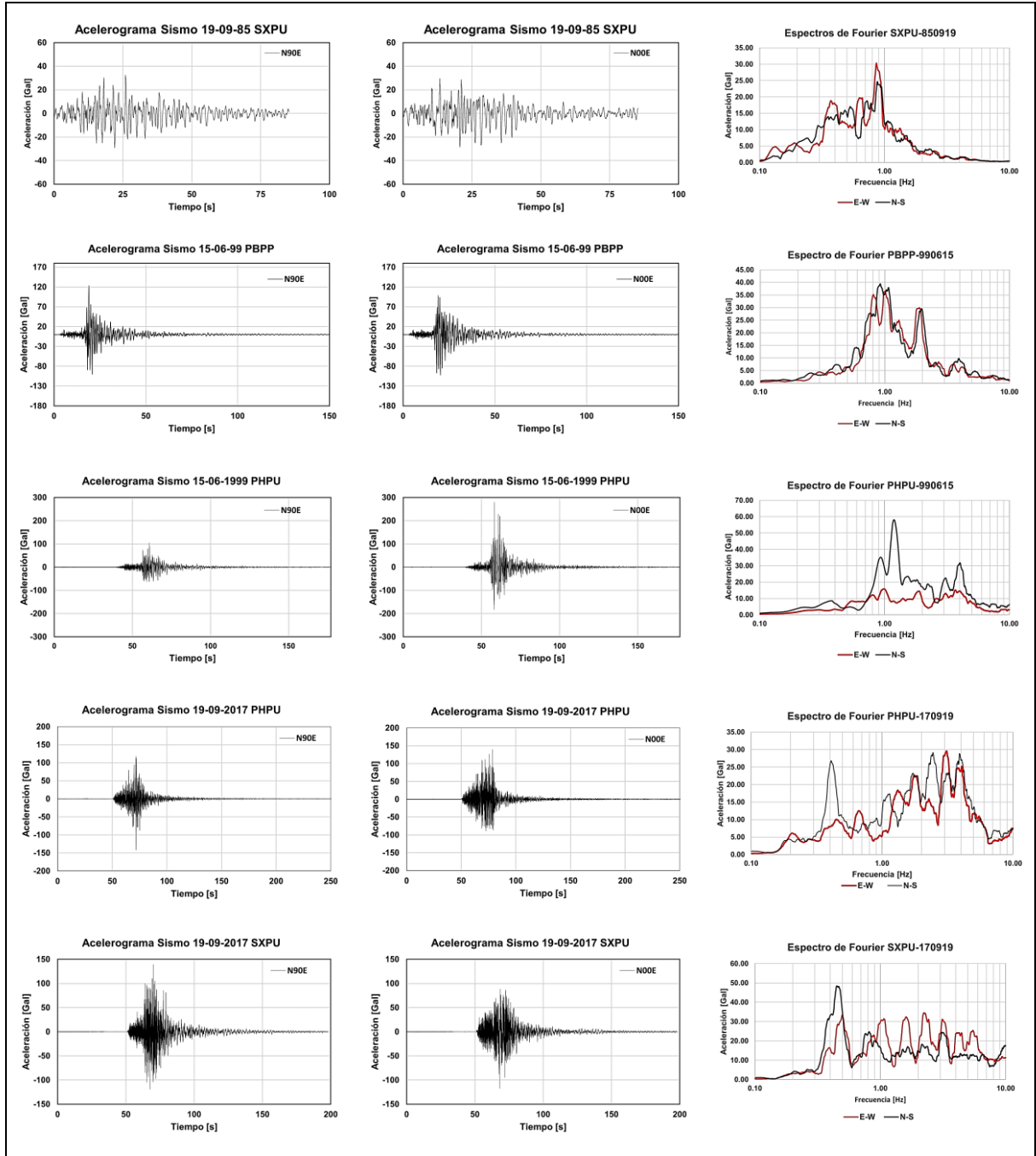
**Tabla 1.** Descripción de los sismos de 1985, 1999 y 2017 y las estaciones que registraron su señal en Puebla.

Estación	Ubicación	Sismo
Sismex Puebla (SXPU)	19.03994 lat. N, 98.21508 long. W	○ Fecha del sismo: <b>1985/09/19</b>
		○ Magnitud: Mw = 8.1
		○ Epicentro: 18.081 lat. N, 102.942 long. W.
		○ Profundidad focal (km): 15
Parque La Habana, (PHPU)	19.044223 lat. N 98.168466 long. W	○ Fecha del sismo: <b>2017/09/19</b>
		○ Magnitud: Mw=7.1
Sismex Puebla (SXPU)	19.039943 lat. N 98.215087 long. W	○ Epicentro: 18.4 lat. N, 98.72 long. W
		○ Profundidad focal (km): 57
Parque La Habana, (PHPU)	19.044223 lat. N 98.168466 long. W	○ Fecha del sismo: <b>1999/06/15</b>
		○ Magnitud: Mw=7.0
Paseo Nicolás Bravo, (PBPP)	19.041 lat N 98.208 long. W	○ Epicentro: 18.18 lat, N 97.51 long. W
		○ Profundidad focal (km):69

Para el sismo de 1985 se cuenta con el registro únicamente en una de las estaciones de la red acelerográfica mientras que de los otros eventos se cuenta con su registro en dos estaciones cada uno. Tomando en cuenta cada una de las componentes del registro, se analizaron 10 señales sísmicas a las cuales se les aplicó la transformada de Fourier para visualizar el espectro de amplitudes de cada una de ellas; la gráfica de cada espectro se encuentra en la Figura 14, donde se observa del lado derecho los espectros de Fourier y del lado izquierdo las señales sísmicas de las componentes horizontales por estación. Comienza con la señal del sismo de 1985, registrado por la estación SXPU, seguido de las señales del sismo de 1999 registrado por las estaciones PBPP y PHPU y por último las señales del sismo de 2017 registrado por las estaciones PHPU y SXPU (Figura 14).

Comparando los espectros de Fourier de cada señal, se distingue que el sismo de 1985 claramente presenta una mayor amplitud en bajas frecuencias, los picos de máxima amplificación se encuentran en frecuencias menores a 0.9 Hz en ambas componentes; en contraste, los eventos de 1999 y 2017 en los registros de la estación PHPU muestran una amplificación en frecuencias mayores a 0.9 Hz. En la estación SXPU para el registro del sismo de 2017 no se observa un claro comportamiento, enfatizando la componente EW la cual presenta picos de mayor amplitud en un amplio espectro de frecuencias, mientras que el registro de 1999 en la estación PBPP muestra un espectro de Fourier con amplitudes altas en frecuencias entre 0.8 y 2 Hz (figura 14). Tomando en cuenta estas características, así como los valores de aceleración observada en cada evento, se determinó emplear las señales:

- Del sismo del 19 de septiembre de 1985 la componente EW registro de la estación SXPU.
- Del sismo del 15 de junio de 1999 la componente NS registro de la estación PHPU.
- Del sismo del 19 de septiembre de 2017 la componente EW registro de la estación PHPU.

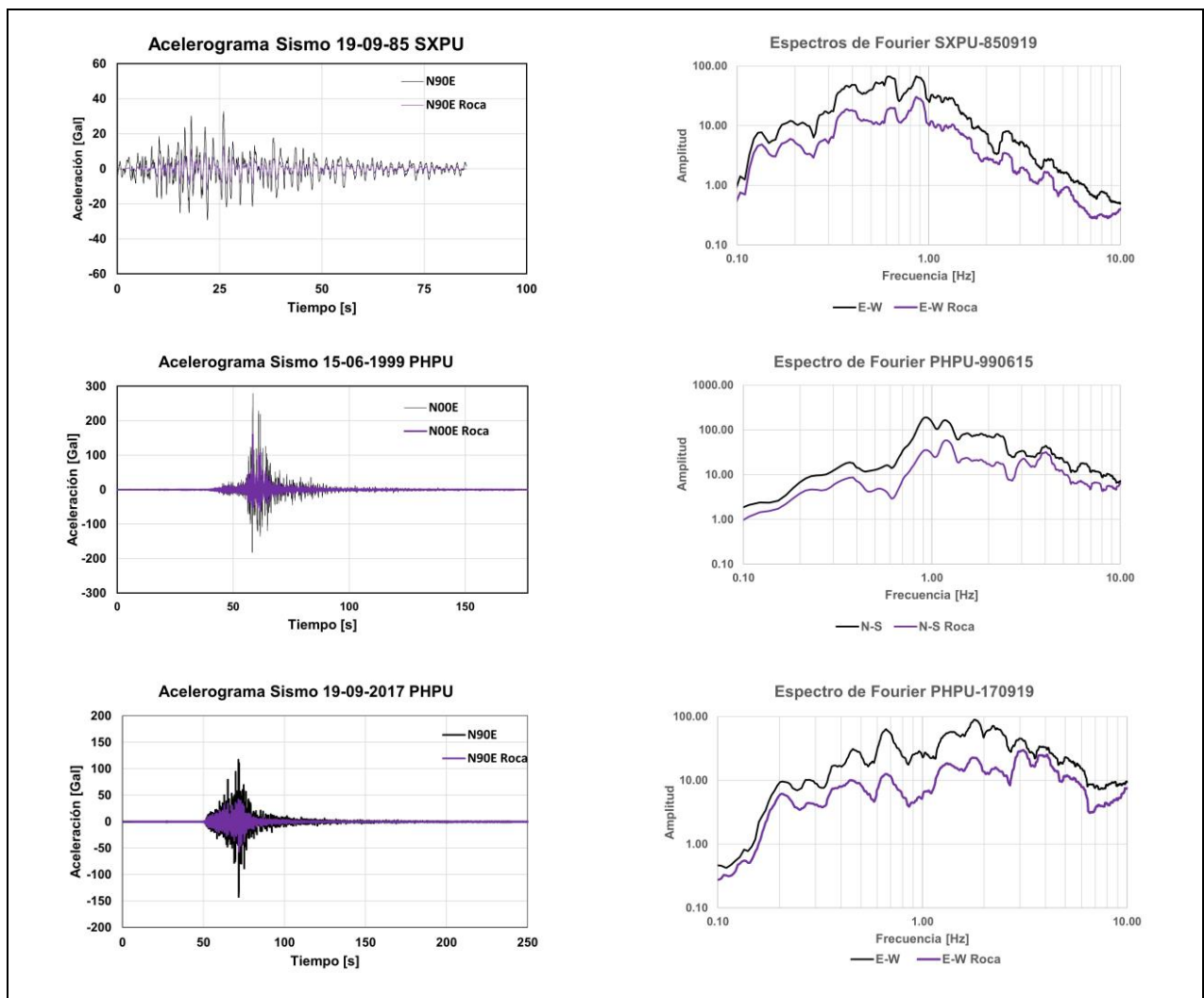


**Figura 14.** Acelerogramas de las componentes EW y NS y sus correspondientes espectros de Fourier de los sismos de 1985, 1999 y 2017, registrados por las estaciones SXPU, PHPU y PBPP en la Ciudad de Puebla, México.

### 3.6 Acelerogramas Sintéticos

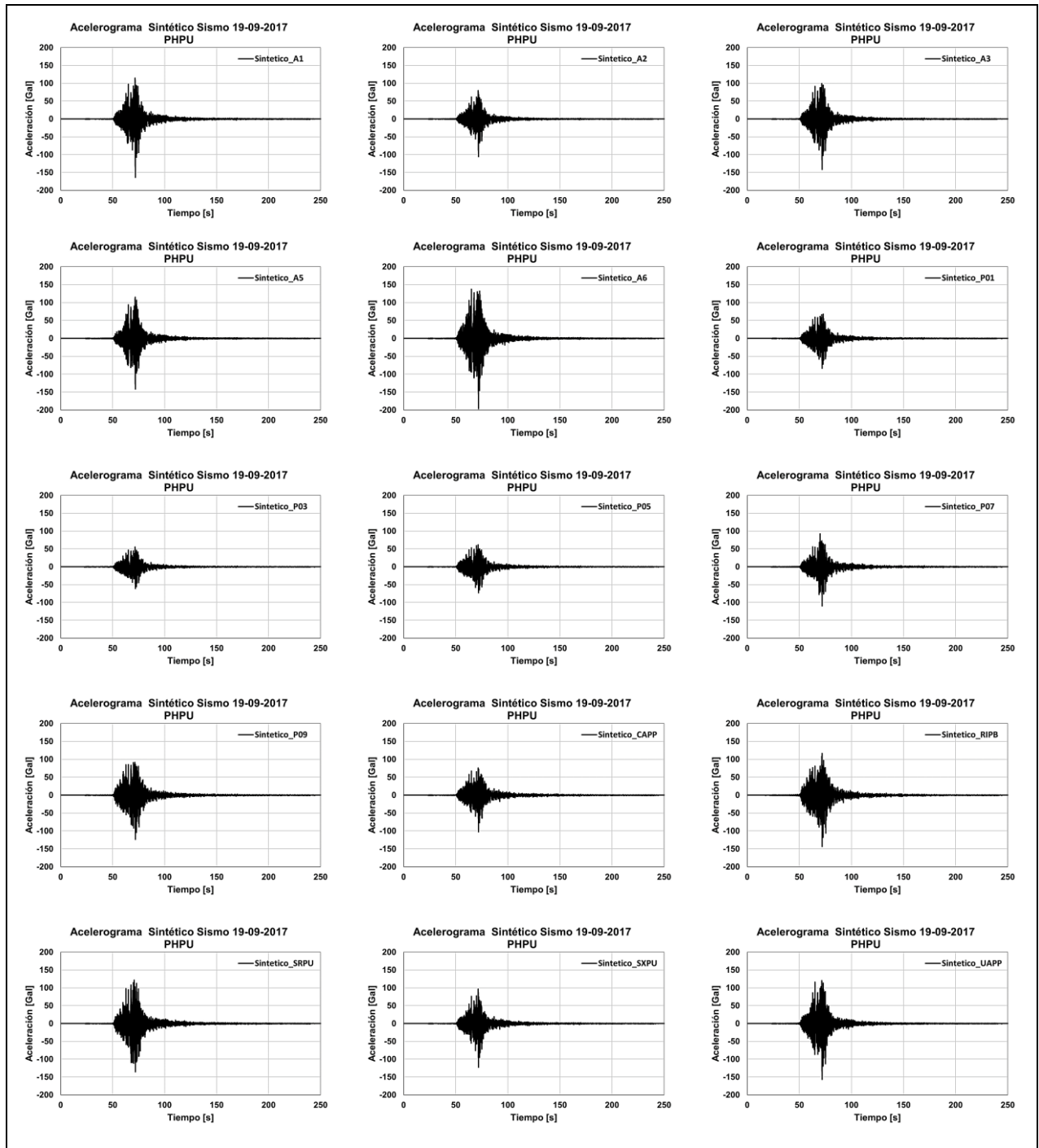
A partir del registro de cada señal sísmica y los cocientes espectrales de varios puntos en la ciudad de Puebla, se lleva a cabo la metodología descrita en el capítulo 2.6 para el cálculo de aceleraciones en superficie.

Se utilizó el EHVSR de las estaciones SXPU y PHPU, como representación de las características del medio en cada punto; a los acelerogramas de cada evento se les calculó el espectro de amplitud de Fourier utilizando el programa Degtra A4. Se realizó la operación de deconvolución entre los espectros de Fourier de cada señal y los cocientes H/V utilizando una rutina en el programa MATLAB; el resultado se pasó al dominio del tiempo aplicando la transformada inversa de Fourier incluida en la rutina mencionada; el resultado final es la señal corregida por efecto de sitio considerándola una señal sintética en roca.



**Figura 15.** Registros acelerográficos y espectros de Fourier de los sismos de 1985, 1999 y 2017 (negro) comparados con su respectivo acelerograma sintético y espectro de Fourier (morado).

En la figura 15, se muestra una comparación entre la señal sísmica de cada evento en color negro y su respectivo acelerograma sintético corregido por efecto de sitio en color morado; también se calculó el espectro de amplitud de Fourier para realizar una comparación entre señales. En los tres casos se puede apreciar que la señal corregida presenta una menor amplitud y menores aceleraciones.



**Figura 16.** *Acelerogramas sintéticos calculados a partir de la señal del sismo del 19 de septiembre de 2017 Mw 7.1, componente horizontal N-S de la estación PHPU.*

Se observa en la figura 15 que el registro sísmico del evento de 1985 presenta aceleraciones de entre 30 y 40 Gal, además, el acelerograma del sismo de 1999 alcanza los 200 Gal y las aceleraciones pico registradas en el sismo de 2017 rebasan los 130 Gal. En comparación, la señal del terremoto de 1985 en roca apenas alcanza los 20 Gal de aceleración, así como una amplitud de casi 30; el sismo de 1999 en roca muestra aceleraciones de al menos 140 Gal y el espectro de amplitud llega a 80; por último, el sismo de 2017 corregido llega a los 50 Gal, con amplitudes de 40.

La señal en roca de cada sismo se propaga a los puntos de la ciudad donde se cuenta con un MHVSR. Se multiplica el espectro de Fourier de las señales sísmicas con los cocientes H/V calculados con microtemores utilizando una rutina en MATLAB; nuevamente, la rutina aplica la transformada inversa de Fourier, tomando la parte imaginaria de la fase del sismo original, para expresar el resultado de la convolución en el dominio del tiempo, y obtener un acelerograma sintético en cada uno de los puntos analizados.

Los acelerogramas sintético calculados en superficie se muestra en la figura 16; se obtuvieron en 15 puntos de la ciudad para el sismo de 2017. Las señales sintéticas son de los puntos, A1, A2, A3, A5, A6, P01, P03, P05, P07, P09, CAPP, RIPB, SRPU, SXPU, UAPP: todas están graficadas bajo la misma escala, y se puede apreciar las diferencias en amplificación de la señal entre los puntos mostrados.

### **3.7 Espectros de respuesta**

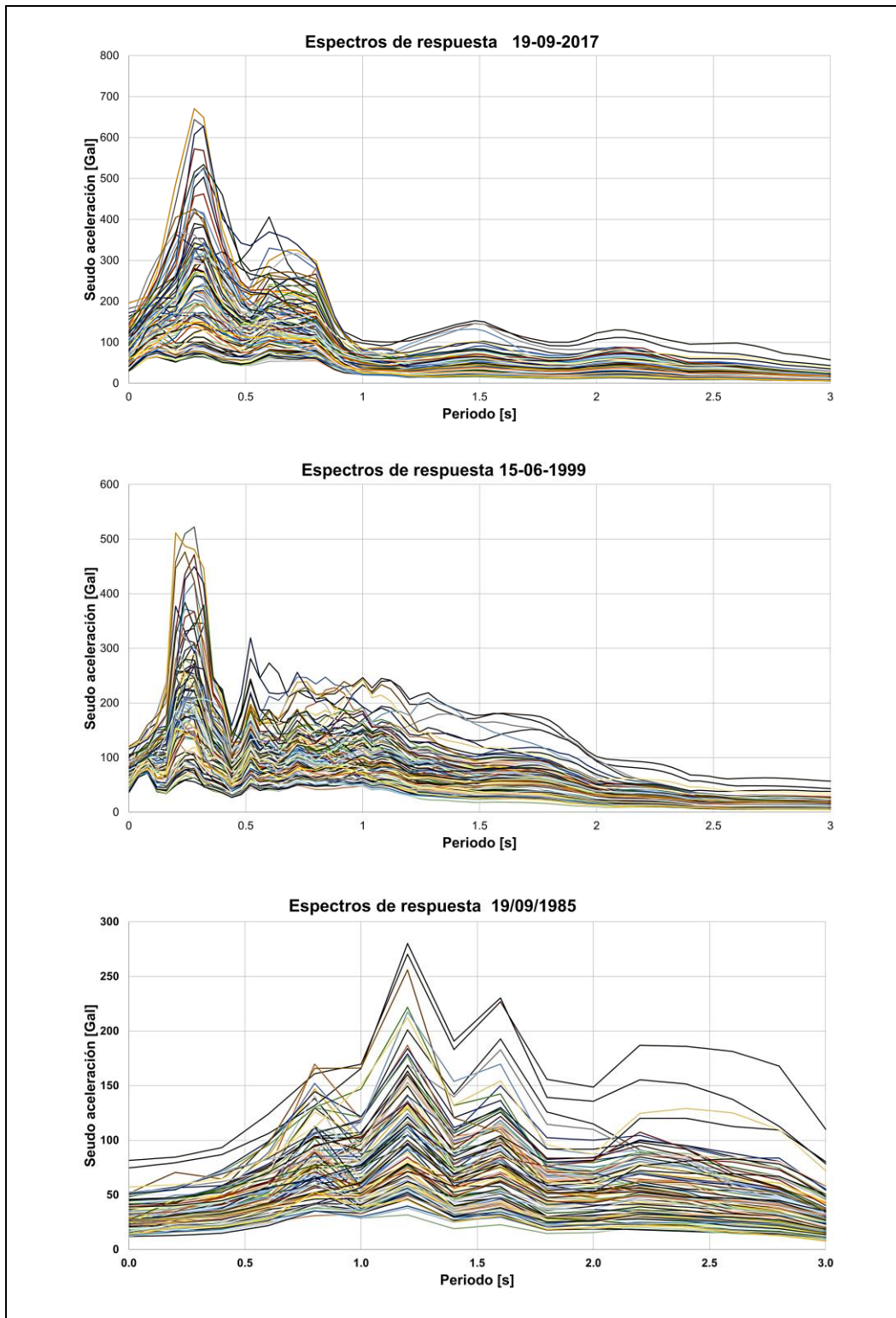
Los acelerogramas sintéticos generados para distintos puntos de la Ciudad de Puebla, se emplearon como señal para obtener espectros de respuesta en seudo aceleración y con un amortiguamiento de 5% de su valor crítico para periodos de 0 a 3 segundos.

En la figura 17 se aprecia el conjunto de espectros de respuesta agrupados por sismo; primero en la parte superior se encuentran los espectros calculados para el sismo de 1985, el pico máximo de seudoaceleración se encuentra alrededor de 1.2 segundos, aunque también presentan picos con valores altos en 0.8 y 1.6 segundos; la seudoaceleración para este grupo de espectros de respuesta alcanza los 280 gal.

En la parte central de la figura 17 se encuentra el grupo de espectros de respuesta que corresponden al sismo de 1999, estos muestran picos máximos en periodos alrededor de 0.3 segundos, el valor más alto de seudoaceleración generada alcanza los 500 Gal.

Por último, en la parte inferior de la figura 17 se aprecian los espectros de respuesta generados para el sismo de 2017 sus picos con valores máximos se encuentran alrededor de 0.3 y 0.4 segundos los cuales alcanzan hasta 650 Gal de seudoaceleración.



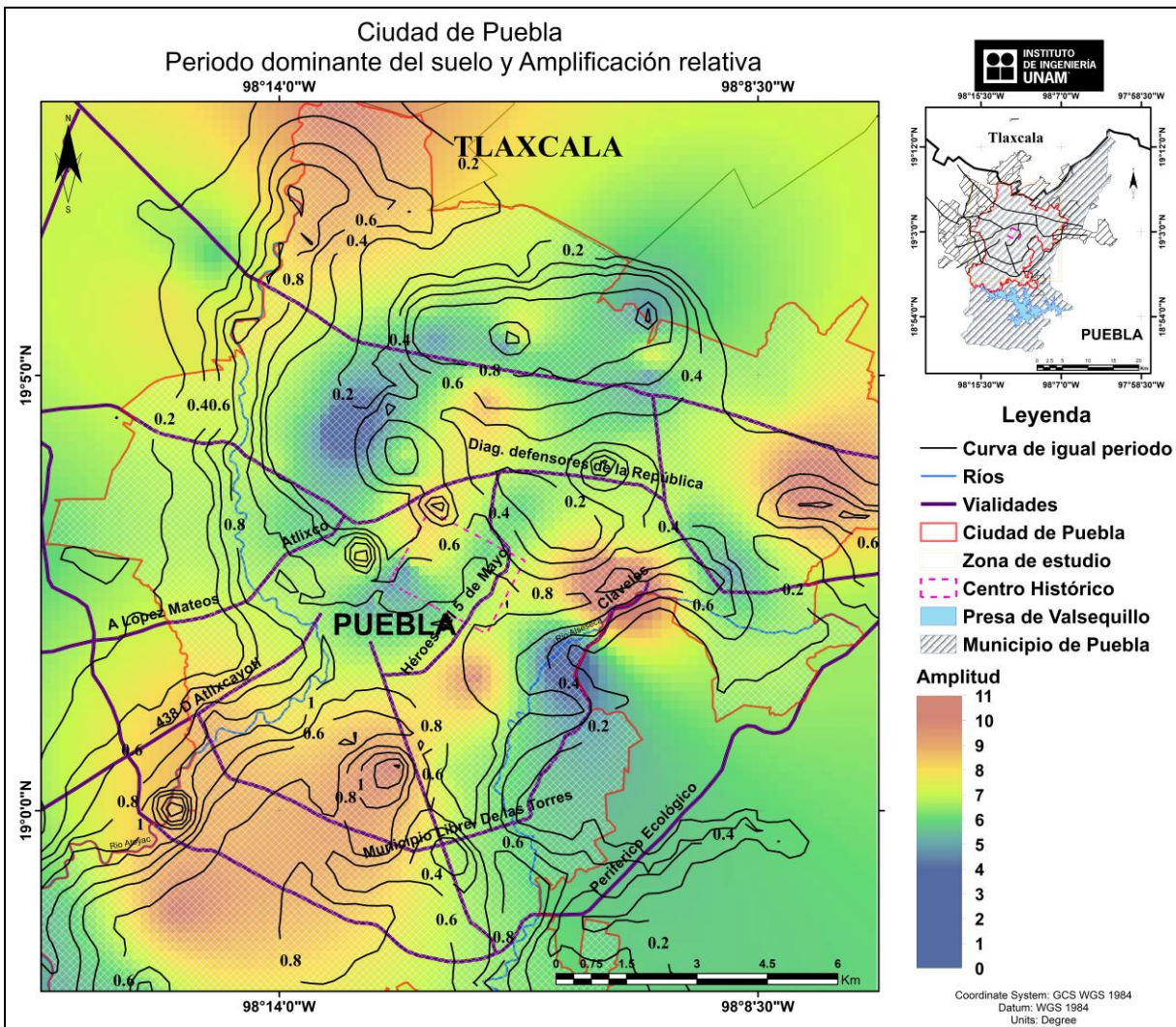


**Figura 17.** Espectros de respuesta, conjunto de espectros de respuesta simulados para los tres sismos característicos, sismo del 19 de septiembre del 2017 (arriba), sismo del 5 junio de 1999 (centro) y sismo del 19 de septiembre de 1985 (abajo).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Mapa de isoperiodos y amplitud relativa

A partir del conjunto de cocientes espectrales (H/V) se obtuvo el valor del periodo dominante del suelo y la amplificación dinámica relativa de dicho periodo, con estos valores y su distribución espacial, se elaboró un mapa de líneas de igual periodo y con colores que se degradan de azul a rojo la amplificación relativa juntos para la Ciudad de Puebla (figura 18).



*Figura 18. Mapa de isoperiodos propuesto para la Ciudad de Puebla, distribución de amplificaciones dinámicas relativas en la ciudad.*

Al compararlo con el mapa de isoperiodos publicado por (Hernández Estrada, et al., 2013) se puede observar que ahora si se tiene una mayor densidad de puntos, sobre todo en la zona del centro histórico, lo que mejoró la distribución de las líneas de igual periodo.



Otro cambio fundamental con relación del mapa de isoperiodos propuesto por Hernandez, (2013) es la conjunción del mapa de la amplificación relativa junto con el mapa de isoperiodos; la cual muestra las zonas menos vulnerables (de color azul) y las zonas de mayor vulnerabilidad (de color rojo), que corresponden las primeras a zonas con depósitos hidrotermales y los segundos a depósitos aluviales, arcillosos y eólicos (figura 4).

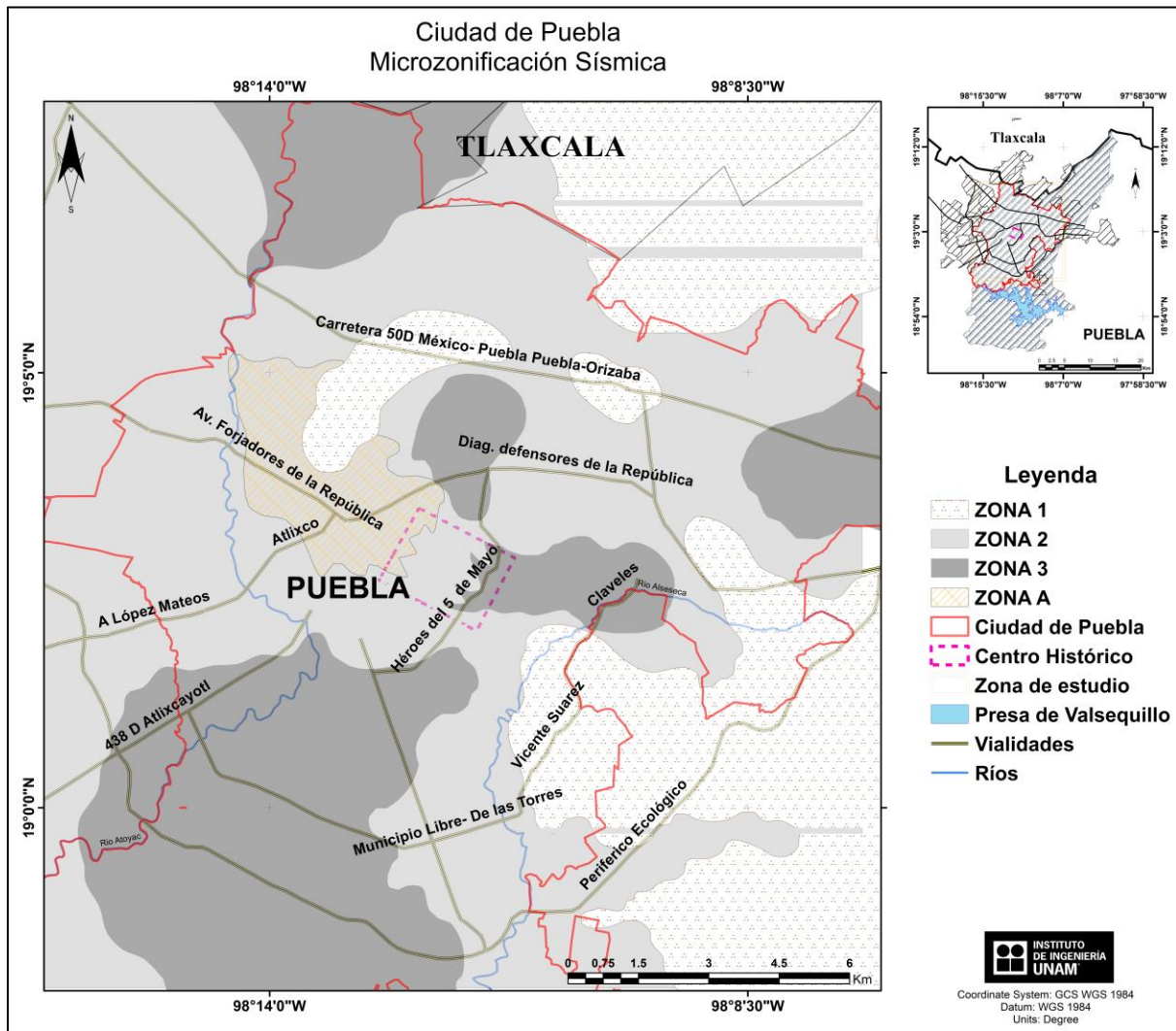
Este mapa de isoperiodos y su amplificación relativa juntos, donde las líneas continúan con la tendencia de limitar las zonas de inundación y seguir la topografía de la zona; se puede apreciar en la zona sur de la ciudad, que es el área con menor altitud, y las zonas de inundación, donde se espera que exista una mayor acumulación de sedimentos y suelo blando, es donde podemos encontrar las curvas de periodo que van desde los 0.8 a los 2 s y es también el área donde se encuentran los valores más altos de amplitud, alcanzando las 11 veces de amplificación. Por otro lado, en la zona este y la parte norte se encuentran limitadas por la curva de 0.2 s, en áreas donde se encuentra la mayor altitud, es decir, la sierra de Amozoc y las faldas del Volcán La Malinche. En la parte oeste también podemos encontrar como limite la curva de 0.2 s, aunque es necesario mencionar que solo representa el cierre de la curva de periodo ya que no se cuenta con datos que puedan generar una mejor interpolación. Por último, cabe mencionar que, en la zona del centro de la ciudad, se encuentran periodos de entre 0.4 y 0.8 s, con una pequeña zona en la parte noroeste donde se alcanzan periodos de 1 s.

#### **4.1 Microzonificación sísmica**

Este concepto usualmente consiste en la caracterización de unidades litológicas o suelos cuyas respuestas dinámicas frente a terremotos son semejantes; además, se evalúa la peligrosidad de efectos inducidos como las fallas geológicas, licuefacción, etc.

Por otro lado, dado el avance o popularidad que ha tenido la técnica de Nakamura o MHVSR para la estimación de efecto de sitio, así como la utilización del periodo dominante y su amplificación relativa, obtenida de la razón espectral H/V (Bard, 1999; Sánchez-Sesma, *et al.*, 2011; Kawase, Mori, & Nagashima, 20018), para el desarrollo de mapas de zonificación; se suele emplear dicha técnica en vez de utilizar la distribución de los tipos de suelo o roca; sin embargo, todavía queda una gran incógnita sobre el uso de estos dos parámetros.

Aun cuando ya se ha demostrado que el valor de la amplitud en la frecuencia fundamental o dominante es válido (Kawase, *et al.*, 20018) su valor en el comportamiento del suelo de esta ciudad es de mayor importancia que los valores del periodo dominante Si observamos la figura 18, donde hemos graficado estos dos parámetros juntos, se puede notar en la parte norte la curva de igual periodo (0.4 a 0.8 s) pero con valores de amplificación relativa bajos o nulos. Estas zonas, como se ve en la siguiente sección (escenarios sísmicos), también muestran valores de aceleración bajos.



**Figura 19.** Propuesta de Microzonificación Sísmica para la Ciudad de Puebla Dividida de colores claros a oscuros en 3 zonas; Zona 1, Zona 2 y Zona 3, la Zona A, en color naranja.

Se elaboró la microzonificación de la ciudad tomando en cuenta el valor de la amplificación relativa, dividiéndola la zona urbana de la Ciudad de Puebla en 3 subzonas como se observa en la figura 19:

- **Zona 1 o zona alta**, marcada de color blanco con triángulos de color café claro, la cual abarca las zonas altas como la parte norte y la parte este de la ciudad, donde se encuentra las estribaciones del volcán La Malinche y la sierra de Amozoc respectivamente, así como los volcanes monogenéticos como el Cerro de la Paz, Cerro de Amalucan, etc. Como se mencionó, las curvas de igual periodo pueden llegar hasta valores de 0.8 s, pero con una amplificación relativa baja, menores a los 3 o 4 veces.
- **Zona 2 o zona intermedia**, marcada de color gris claro, y se distribuye en la mayoría del área de la ciudad, como se puede apreciar en la Figura 19. Las curvas de igual periodo

también pueden llegar hasta valores de 0.8 s, pero con amplificaciones entre 5 a 8 veces de amplificación.

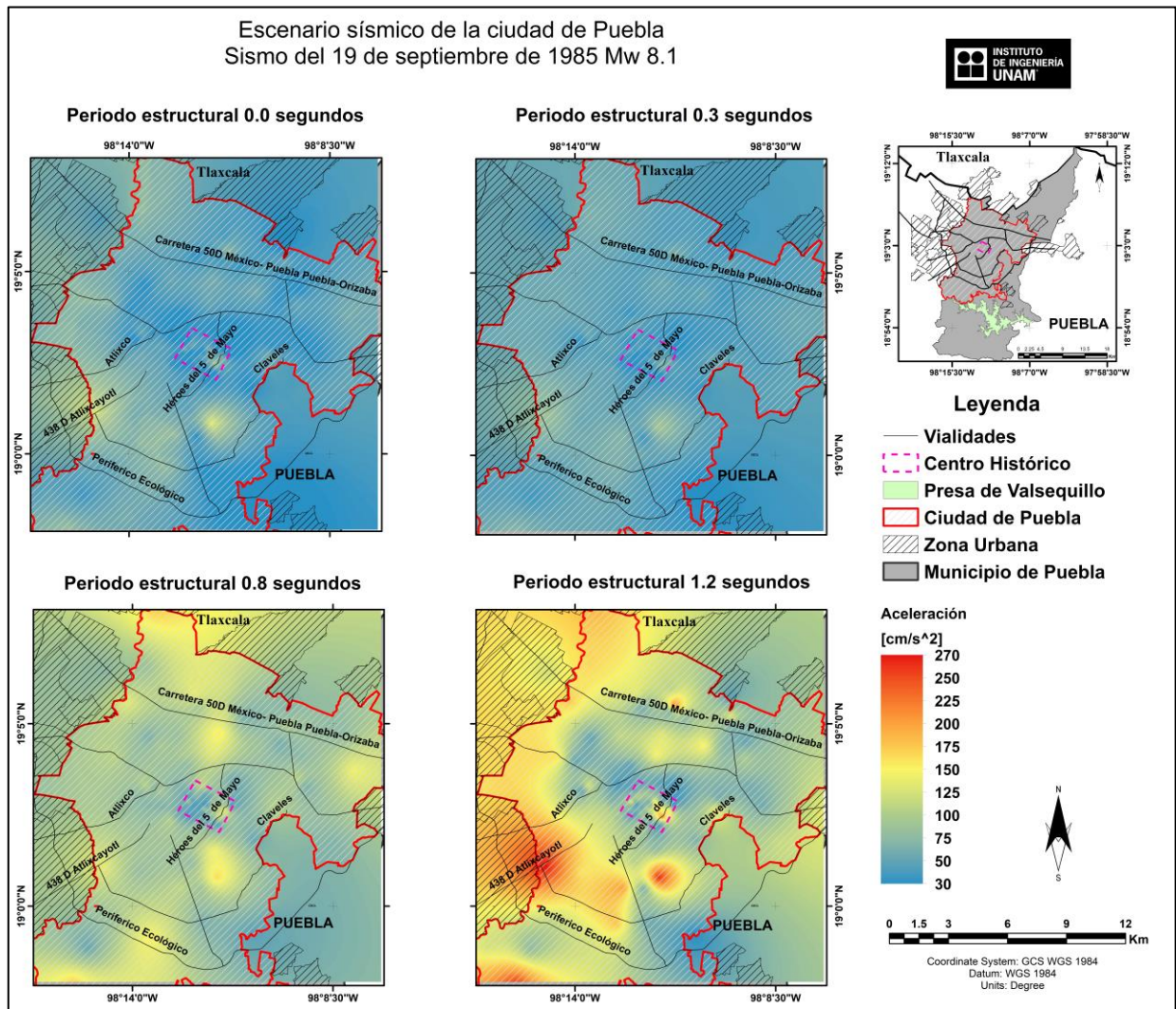
- **Zona 3 o zona baja**, marcada con un color gris oscuro, abarca la mayoría de las zonas bajas de la ciudad, incluyendo los ríos, cuyo valor de amplificación es el máximo encontrado en la ciudad y se muestran valores de periodo mayores a los 0.8 s, así como en la parte central de la ciudad, cercana al Centro Histórico y Av. Héroes del 5 de mayo, en donde antiguamente corría el Rio San Francisco.
- **Zona anómala**, marcada en color naranja, donde se presentan valores de amplificación relativa bajas al igual que el periodo dominante menor a 0.3 segundos. Lermo et al., 2008, encontró que los daños ocurridos tras el paso del terremoto del 15 de junio de 1999 (Mw6.9), se debieron porque las edificaciones cuando estas fueron construidas, una parte de su cimentación se encontraban en depósitos de travertino sano o alterado y la otra en depósitos de suelos blandos.

#### 4.2 Escenarios sísmicos

Los espectros de respuesta de la figura 17, muestran que los picos máximos de aceleración se encuentran alrededor de los 0.3 y 0.8 segundos en el caso de los eventos sísmicos de intraplaca y entre 0.8 y 1.5 segundos en el sismo de subducción; por ello, se decidió elaborar el escenario sísmico para estos periodos estructurales. Por otro lado, también se desarrolló un escenario para PGA o cero segundos, debido a que en este periodo se puede afectar a estructuras de 1 o 2 pisos.

En la figura 20 se presentan los escenarios sísmicos del terremoto del 19 de septiembre de 1985 Mw 8.1; este mostró aceleraciones de entre 30 y 270 gal, siendo el periodo estructural con la mayor aceleración el de 1.2 s, además, se aprecia que en periodos bajos casi no muestra intensidad, pero en periodos más altos la aceleración aumenta y se define claramente zonas de mayor intensidad, las cuales se encuentran en la parte oeste de la ciudad. Una de estas zonas de máxima intensidad, se muestra claramente en la parte suroeste, en dirección a la salida a Atlixco por la carretera federal 38 D y su intersección con el periférico ecológico.

El escenario del terremoto del 15 de junio de 1999 Mw 6.9 se ilustra en la figura 21; se puede apreciar que las aceleraciones oscilaron entre los 40 y 440 gal, y el escenario de un periodo estructural de 0.3 s es el de mayor aceleración percibida. Para el escenario de 0 s se alcanza en pocos puntos una aceleración de 150 gal, mientras que en 0.8 s se muestran mayor número de zonas donde se rebasa claramente los 175 gal de intensidad y en 1.2 s vuelve a disminuir el área donde se perciben aceleraciones mayores a los 175 gal. En el periodo estructural de 0.3 s se delimita claramente un área con aceleraciones que alcanzan su valor máximo de 440 gal, ubicado muy cerca del centro histórico de la ciudad, al oeste del centro histórico al sur de la carretera 50D México-Puebla.



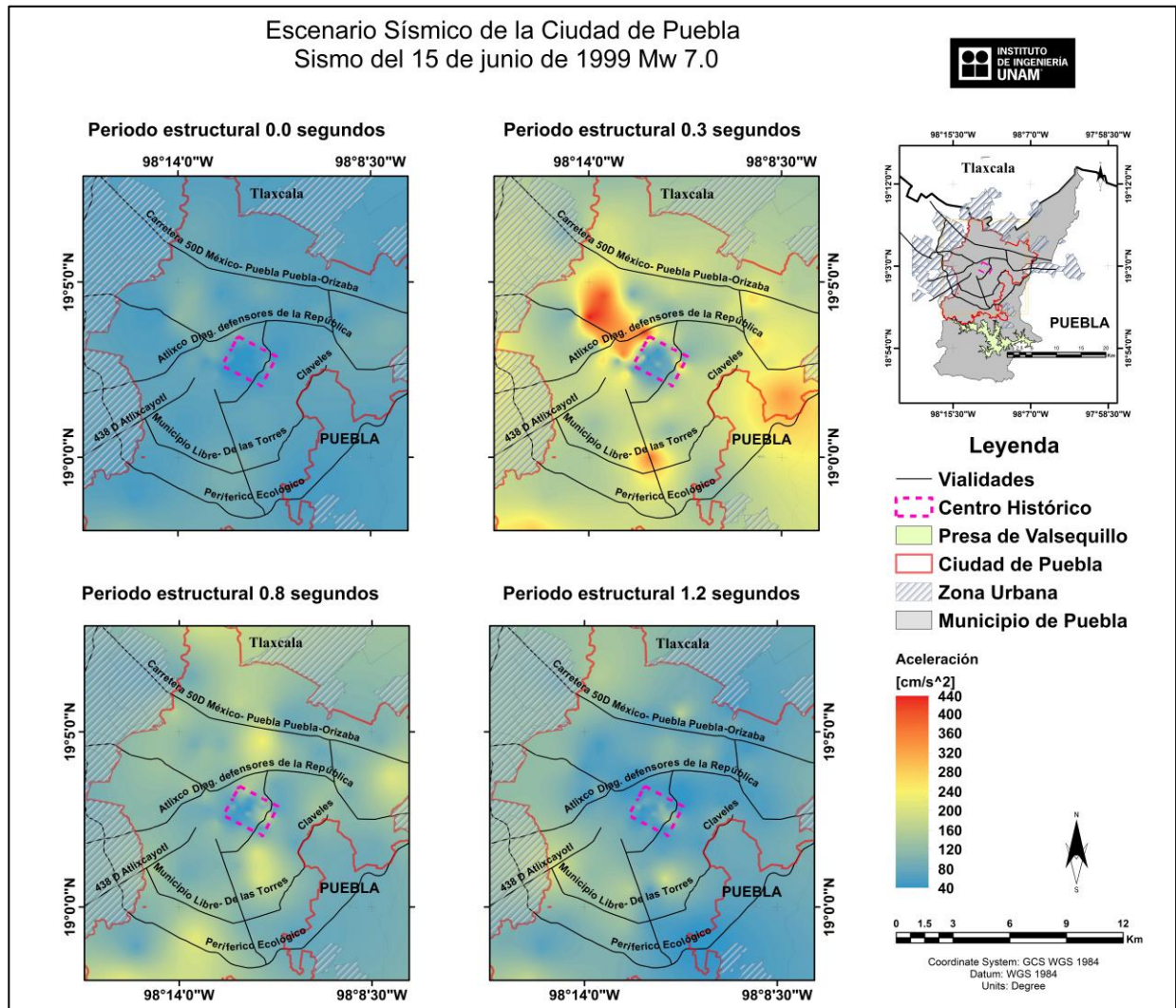
**Figura 20.** Escenario sísmico del terremoto del 19 de septiembre de 1985 (Mw 8.1) en la Ciudad de Puebla. Arriba e izquierda, escenario sísmico para un periodo estructural de 0 s PGA; arriba y derecha, escenario sísmico para un periodo estructural de 0.3 s; abajo e izquierda, escenario sísmico para un periodo de 0.8 s; abajo y derecha, escenario sísmico de un periodo de 1.2 s

Por último, en la figura 22 se presenta el escenario sísmico del evento del 19 de septiembre de 2017 Mw 7.1, el cual muestra un comportamiento similar al evento de 1999; el periodo estructural que presenta la mayor intensidad es el de 0.3 s, seguido del escenario de 0.8 s y para este evento el periodo estructural de menor intensidad es el de 1.2 s. Como se puede observar, la escala muestra aceleraciones de entre 40 y 650 gal, una diferencia de intensidad considerable con respecto al evento de 1999; las zonas de máxima aceleración se encuentran presentes en la parte oeste del centro y en la salida este de la ciudad, entre la sierra de Amozoc y las faldas del volcán La Malinche.

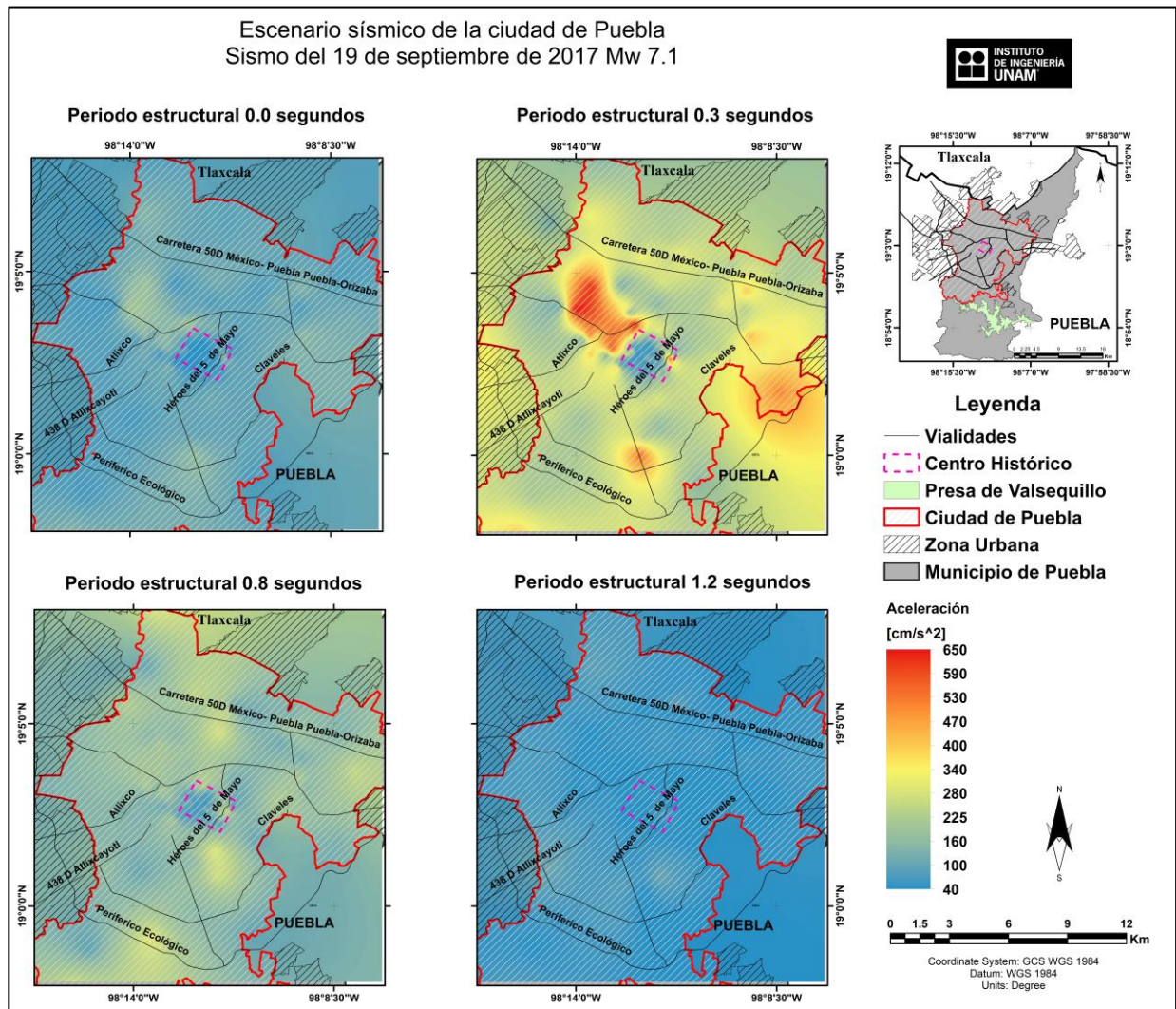
Al analizar los 4 periodos estructurales de cada escenario sísmico con la misma escala, se ilustra la diferencia de intensidades que existe entre cada uno de ellos; para los eventos de fallamiento normal, los cuales generan un movimiento con frecuencias más altas, muestra los valores de intensidad más



grande en periodos bajos 0.3s; además las zonas que presentan dichas aceleraciones máximas se encuentran ubicadas en áreas con un periodo de vibración del suelo de entre 0.2 y 0.8, es decir, en sitios ubicados dentro de la zona 2 de la zonificación sísmica propuesta. Por otro lado, el sismo de 1985, generado en la zona de subducción por un fallamiento inverso, registró un movimiento con frecuencias bajas en comparación a los movimientos de intraplaca analizados; el periodo estructural que percibió la mayor intensidad es el de 1.2 segundos, y las zonas que registran las mayores aceleraciones se ubican dentro de la zona 3 de la propuesta de zonificación sísmica de este trabajo, es decir en un área con periodo de vibración des suelo de entre 0.8 y 2 segundos.



**Figura 21.** Escenario sísmico del terremoto del 15 de junio de 1999 (Mw 7.0) en la Ciudad de Puebla. Arriba e izquierda, escenario sísmico para un periodo estructural de 0 s PGA; arriba y derecha, escenario sísmico para un periodo estructural de 0.3 s; abajo e izquierda, escenario sísmico para un periodo de 0.8 s; abajo y derecha, escenario sísmico de un periodo de 1.2 s.



**Figura 22.** Escenario sísmico del terremoto del 19 de septiembre de 2017 (Mw 7.1) en la Ciudad de Puebla. Arriba e izquierda, escenario sísmico para un periodo estructural de 0 s PGA; arriba y derecha, escenario sísmico para un periodo estructural de 0.3 s; abajo e izquierda, escenario sísmico para un periodo de 0.8 s; abajo y derecha, escenario sísmico de un periodo de 1.2 s.

### 4.3 Relación de daños en infraestructura con los escenarios sísmicas y la microzonificación

Para el caso de los sismos de fallamiento normal que se analizaron, fue posible recuperar un registro de los daños a la infraestructura de la ciudad para cada evento. Los daños registrados en el sismo del 15 de junio de 1999 se tomaron del trabajo de (Lermo, et al., 2008), mientras que los daños registrados del sismo de septiembre de 2017 se tomaron de (ERN, 2020). En la Figura 23 se compara el escenario sísmico de 2017 para un periodo estructural de 0.3 s con los daños registrados; donde se puede apreciar que gran número de daños que se encuentra dentro de las zonas de máxima intensidad la cual alcanza aceleraciones de 640 gal, aunque otro importante número de daños se

ubica en zonas donde no se resalta una máxima intensidad como es la Zona 2 de la zonificación sísmica propuesta y los valores de aceleración alcanzan los 350 gal. Se realizó un acercamiento a la parte del zócalo de la ciudad, donde existe un importante número de daños; se puede apreciar que hay varios en zonas donde se calculan 550 gal de aceleración, en contraste con una pequeña zona que no rebasa los 150 gal de aceleración y se ubica en un periodo de vibración del suelo de entre 0.4 y 0.8 s, lo que es posible que genere las afectaciones registradas de la zona.

De igual manera en la figura 23 se analiza el sismo del 15 de junio de 1999; en comparación con el sismo de 2017 se aprecia que las zonas de máxima intensidad se encuentran distribuidas de manera similar, únicamente se puede apreciar la diferencia de intensidades en las escalas que ambos escenarios están representados. Los daños registrados en el centro histórico se ubican en su mayoría en la zona que no presenta una aceleración importante pero la ruptura del sismo se generó en frecuencias de entre 0.2 y 1 s de acuerdo con los espectros de respuesta calculados, lo que coincide con el periodo fundamental de vibración del suelo marcado como Zona 2, aunado a su cercanía con las zonas de máxima aceleración, serían los causantes de las afectaciones.

Finalmente, en la Figura 24 se muestra el mapa de microzonificación sísmica propuesta y su relación con los daños observados después de los dos terremotos analizados de fallamiento normal. Como podemos notar los daños provocados por estos dos terremotos, nuevamente confirma lo observado en el trabajo de (Lermo, et al., 2008) en referencia de que los daños ocurridos tras estos terremotos se debieron porque las edificaciones cuando estas fueron construidas, una parte de su cimentación se encontraban en depósitos de travertino sano o alterado y la otra en depósitos de suelos blandos.



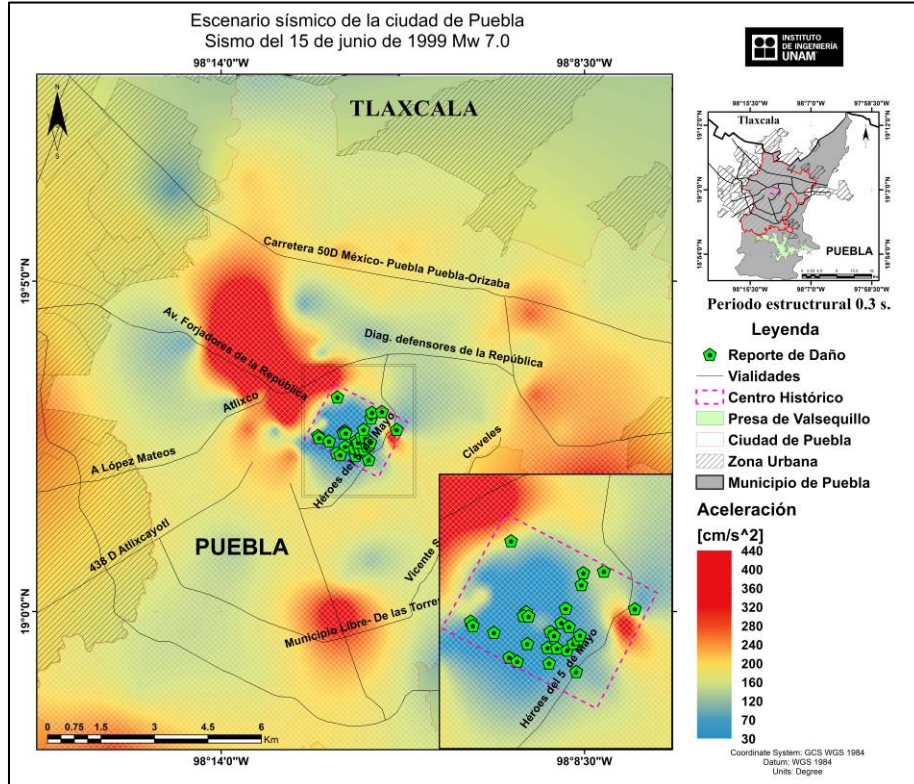
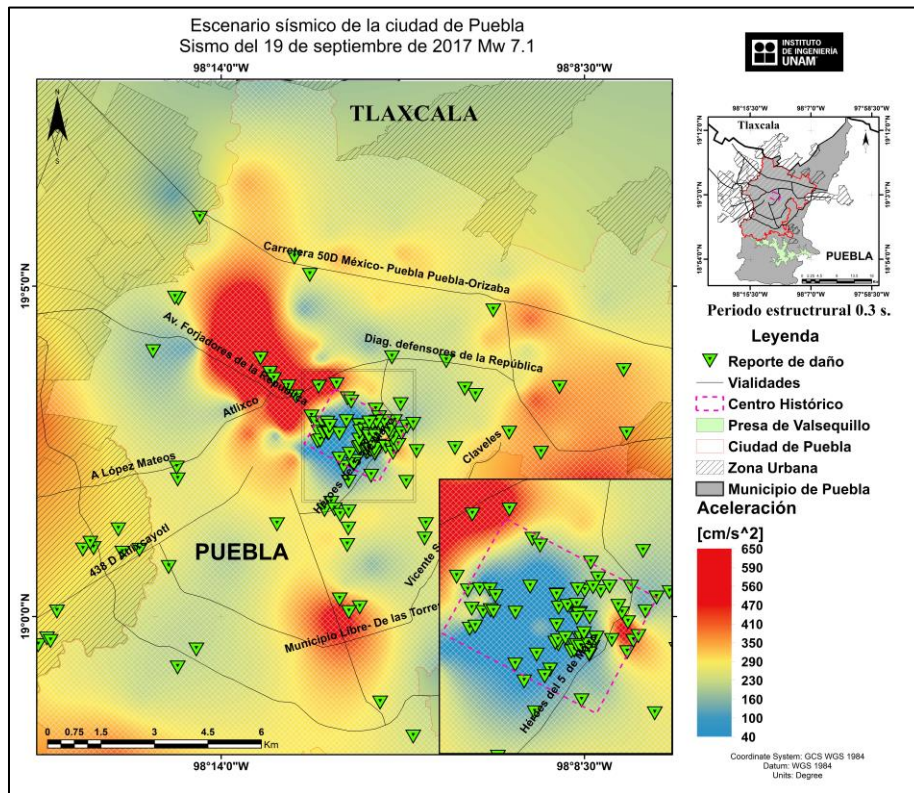
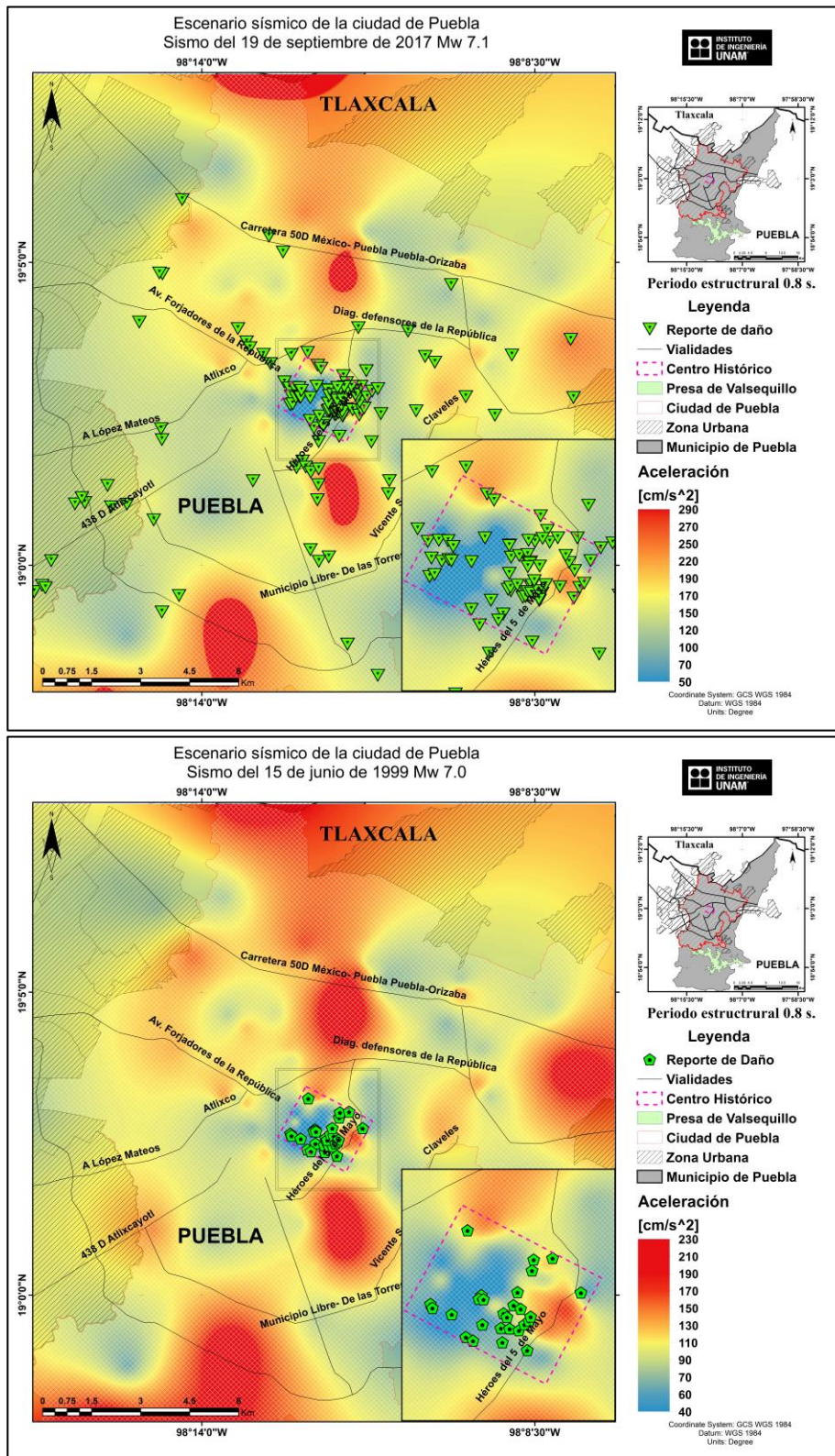
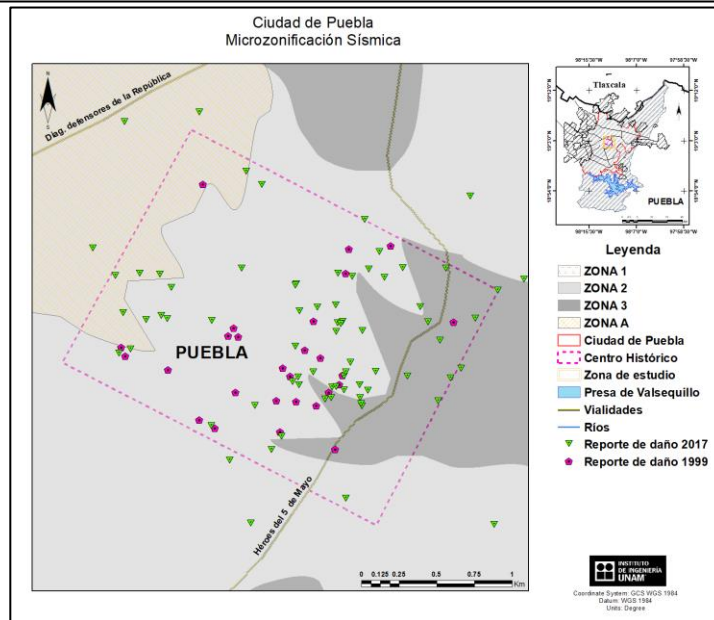
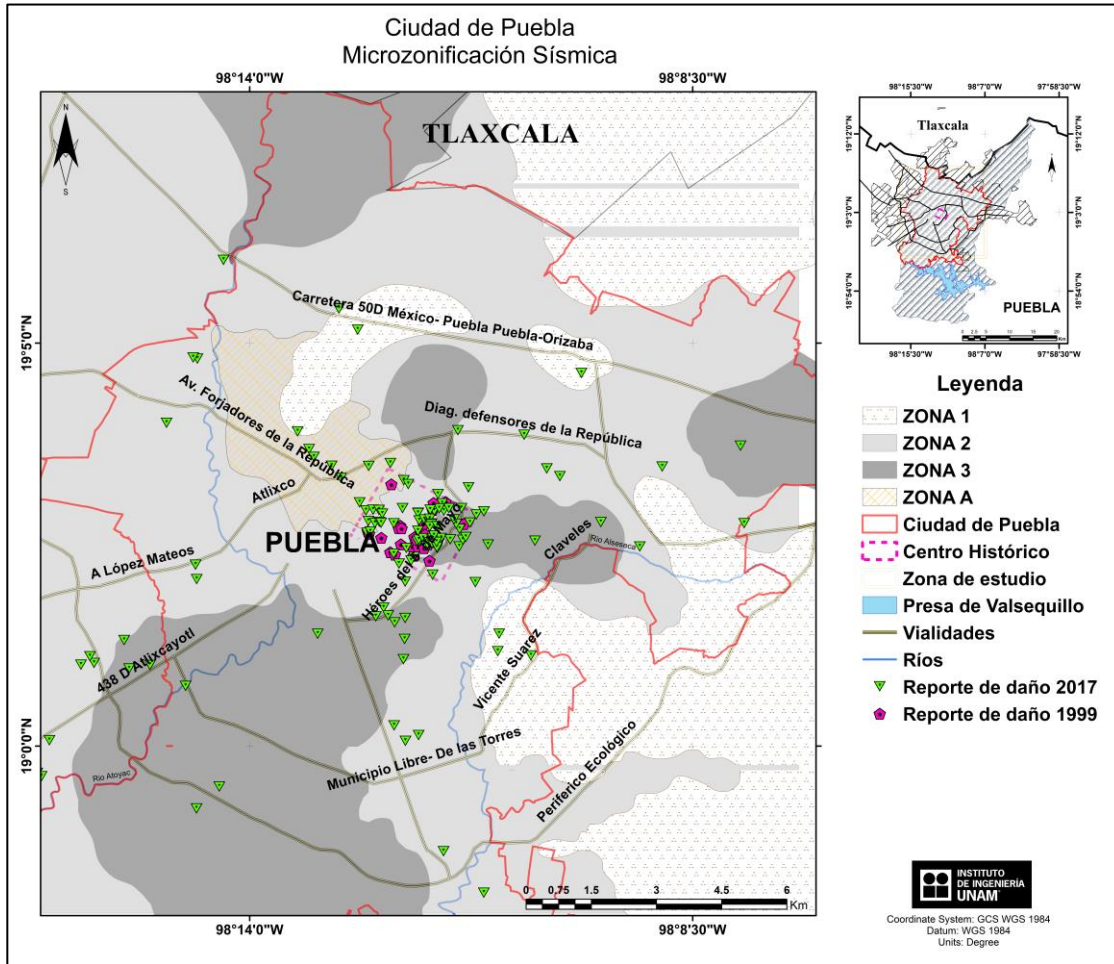


Figura 23. Escenario sísmico para un periodo estructural de 0.3 s, sismo de 2017 arriba, sismo de 1999 abajo. Comparación con los daños registrados en cada evento.





**Figura 24.** Escenario sísmico para un periodo estructural de 0.8 s, sismo de 2017 arriba, sismo de 1999 abajo. Comparación con los daños registrados en cada evento.



**Figura 25.** Mapa de microzonificación sísmica para la ciudad de Puebla y su relación con los daños de los terremotos del 15 de junio de 1999 y 19 de septiembre del 2017 (Parte superior). Parte inferior, detalle de los daños en el centro histórico de Puebla.

## 5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En México pocas son las ciudades que cuentan con la instrumentación y los estudios necesarios para conocer a fondo el comportamiento dinámico del suelo sobre el cual se construye; el alto costo monetario de una red Acelerográfica o de realizar estudios geotécnicos suficientes para estudiar cada zona, dan pie al desarrollo y mejoramiento constante de metodologías como las que se describen en este trabajo.

Con respecto a la metodología de los cocientes espectrales H/V, podemos concluir con algunas consideraciones necesarias para un correcto análisis de las propiedades dinámicas del suelo y el riesgo sísmico. Por ejemplo, es importante considerarla con sus ventajas y limitaciones, es decir, como una metodología rápida y eficiente para un análisis preliminar de la zona, pero, que requiere de otros estudios para reducir incertidumbres; en el caso de este proyecto, se tomó en cuenta la información disponible y de libre acceso que va desde la geología superficial, la zonificación geotécnica, la morfología de la zona y las zonas de inundación.

Es necesario realizar las mediciones y procesamiento de los cocientes H/V bajo ciertas recomendaciones que garanticen la calidad de los datos como realizarlas con instrumentación de banda ancha y procurando contar con el mayor tiempo posible de registro (que supere los 60 min), esto con la finalidad de conseguir un espectro de análisis confiable desde los 0.2 a los 20 Hz, y que la amplitud muestre claramente los picos de mayor amplificación. En este proyecto se tuvo que descartar varios de los datos por la instrumentación y los tiempos de medición que no lograron reconstruir correctamente los espectros de cada cociente.

El análisis en conjunto de los cocientes espectrales H/V proporcionó un panorama del comportamiento dinámico del suelo de la ciudad; dividir las curvas analizadas, en familias de acuerdo con su forma, establece puntos con un comportamiento similar en cuanto a al periodo dominante de vibración del suelo y su nivel de amplificación. Este resultado se extiende al interpolar dichos puntos y formar líneas de igual periodo, las cuales se analizan en conjunto con la topografía, las zonas de inundación, la amplitud relativa para establecer el mapa de isoperiodos de la ciudad.

El mapa de isoperiodos delimita las zonas de periodos altos, mayores a 0.8 s, en la parte sur de la ciudad, aunque también se encuentran distribuidas a través de la ciudad, rodeando los cauces de los ríos Alseseca y Atoyac y las zonas de inundación. Los periodos más bajos se encuentran en la parte este de la ciudad, rodeando la sierra de Amosoc, y en la parte norte al volcán La Malinche, en donde se encuentran periodos menores a 0.2 s; en el resto de la ciudad se encuentran distribuidas líneas de igual periodo intermedias de entre 0.2 y 0.8 s.

En cuanto al cálculo de aceleraciones en superficie, la metodología que se realizó en este proyecto, emula satisfactoriamente el proceso de amplificación y atenuación de la señal sísmica, por lo que logra reproducir las aceleraciones que genera un sismo en varios puntos de interés, a partir del registro de la señal en una sola estación.

En conclusión, se logra un resultado confiable, a pesar de solo tomar en cuenta la amplitud de la señal, sin modificar su duración; además es preciso realizar la corrección por efecto de sitio de la señal sísmica que se va a propagar, con la finalidad de no sobreestimar las aceleraciones calculadas.

En los escenarios sísmicos se puede apreciar claramente las diferencias en intensidad entre eventos; el primer factor, atribuido a la cercanía del evento. A pesar de que sismo de 1985 es el de mayor magnitud, Mw8.1, presenta las menores intensidades, entre 20 y 270 gal, ya que se originó a unos 500 Km de la ciudad; el sismo de 1999, con magnitud Mw 7.0, presentó aceleraciones de entre 30 y 450 gal, su epicentro se encuentra a unos 70 km de profundidad y a 120 Km de distancia de la ciudad; por último, el sismo de 2017 mostró aceleraciones de entre 40 y 650 gal y su epicentro se encuentra a 80 km de la ciudad a una profundidad aproximada de 80 km.

La contribución más importante de los escenarios fue limitar zonas de máxima aceleración para los distintos tipos de evento. El sismo de 1985 muestra la mayor intensidad en periodos altos, de aproximadamente 1.2 s, las zonas se ubican en la parte sur de la ciudad, cercanas al río Atoyac y la carretera 48 D a Atlixco; algunas zonas resaltan en el centro de la ciudad, que se pueden atribuir al antiguo río San Francisco, el cual pudo dejar varias capas de sedimento blando.

El escenario del sismo de 1999 comparte similitud con el del sismo de 2017; presentaron su máxima aceleración en periodos de 3 s, la zona de mayor intensidad se ubica principalmente en la parte oeste de la ciudad, cercana al centro histórico y las avenidas Adolfo López Mateos y Forjadores de la Republica; en ambos sismos para periodos de 0.8 s se puede encontrar aceleraciones de hasta 300 gal, los cuáles se encuentran en un área extensa del este del centro histórico y algunos puntos de la parte norte y sur de la ciudad.

Con la información de los escenarios sísmicos junto con los mapas de geología, geomorfología, inundaciones y sobre todo con el mapa de geotécnica, se realiza una microzonificación de la ciudad con base en la distribución de la amplificación relativa, ya que las curvas de igual periodo dominante del suelo presentan un conflicto con los valores de la amplificación relativa y con las aceleraciones obtenidas en los escenarios sísmicos.

En la mayoría de los mapas de microzonificación sísmica realizadas con esta técnica hay una relación casi directa en cuanto a que, si se tiene un mayor periodo, la amplificación relativa también crece; sin embargo, por la presencia de depósitos de travertino en esta ciudad esta característica cambia, por tal razón se dio una mayor validez a la amplificación relativa que a las curvas de igual periodo para definir los límites de la nueva microzonificación sísmica para esta ciudad.



## 6. CONCLUSIONES

1. Se desarrolló un mapa de isoperiodos y su amplificación relativa juntos, donde las líneas continúan con la tendencia de limitar las zonas de inundación y seguir la topografía de la zona; se puede apreciar en la zona sur de la ciudad, que es el área con menor altitud, y las zonas de inundación, donde se espera que exista una mayor acumulación de sedimentos y suelo blando, es donde podemos encontrar las curvas de periodo que van desde los 0.8 segundos a los 2 segundos y es también el área donde se encuentran los valores más altos de amplitud, alcanzando las 11 veces de amplificación.
2. Se desarrolló un nuevo mapa de microzonificación sísmica para la ciudad con base en la distribución de la amplificación relativa y tomando en cuenta la distribución del periodo dominante del suelo, la topografía, geología y geotecnia. La ciudad se divide en 4 subzonas de acuerdo con el nivel de riesgo de afectaciones en la ciudad tras la ocurrencia de un sismo de gran magnitud.
3. Se realizaron mapas de escenarios sísmico para 3 eventos determinísticos; el sismo del 19 de septiembre de 1985 Mw. 8.1, representativo de un sismo de fallamiento inverso, el cual generó aceleraciones en un periodo de 1.2 s de hasta 270 gal en la parte sur y oeste de la ciudad. Los eventos del 15 de junio de 1999 Mw. 6.9 y 19 de septiembre 2017 Mw. 7.1, fueron eventos de fallamiento normal que afectaron la Ciudad de Puebla con aceleraciones de hasta 450 y 650 gal respectivamente, en zonas similares, en donde se destaca la parte oeste del centro histórico, en donde se encuentran periodos y valores de amplificación bajos.
4. Se encontró que los daños provocados por los dos terremotos de intraplaca de fallamiento normal están relacionados con los depósitos de travertino, los cuales dan lugar a un periodo de vibración bajo en el terreno, pero, los eventos de fallamiento normal produjeron las máximas aceleraciones en periodos de entre 0.3 y 0.8 s, por lo que la mayoría de las afectaciones se observan en las Zona 2 y la Zona anómala marcadas en la propuesta de microzonificación mostrada en este trabajo.

## 7. TRABAJOS CITADOS

- AKI. (1980). Scattering and attenuation of shear waves in the lithosphere. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 85(B11), 6496-6504.
- Álvarez Monroy , I., Lermo Samaniego , J. F., & Martínez González, J. A. (2017). Escenarios sísmicos para la zona urbana del municipio de Puebla, Puebla, México; sismos de subducción e intraplaca. *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Guadalajara, Jal.
- Auvinet, G. Y. (1976). Zonificación de suelos de la ciudad de Puebla. *Memorias de la VIII Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*. Guanajuato, Gto.
- Avilés. (1999). *Ante proyecto de Normas Técnica para el diseño por sismo, Reglamento de Construcciones para el Municipio de Puebla*. Puebla, México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

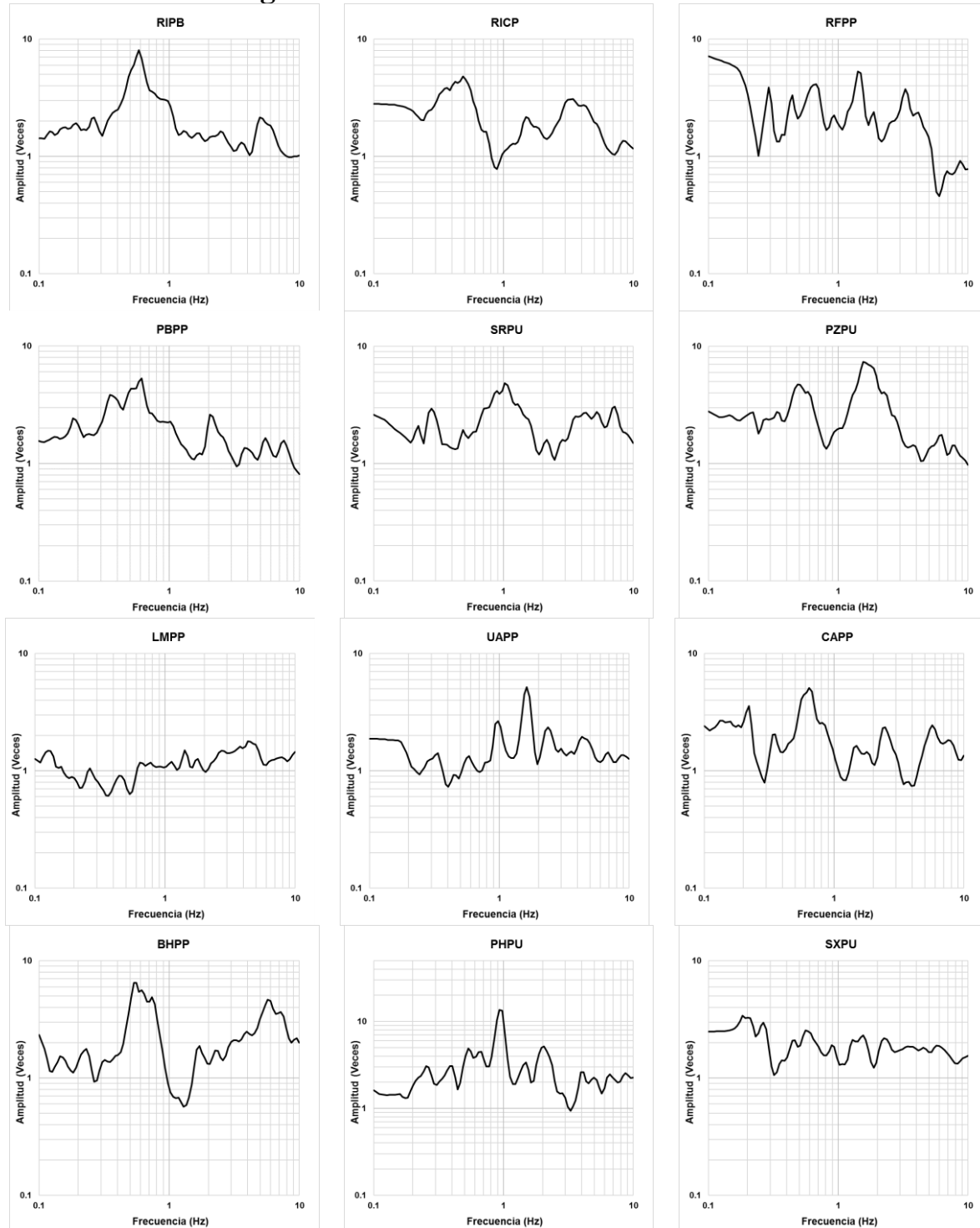
- Azomoza, G., Vera, A., & Reyes, L. (1998). Zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla. *Memorias del XIX Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*. Puebla.
- Bard, P. Y. (1999). Microtremor measurement: A tool for site effect estimation? *Elsevier, Earth-Science Reviews*, 205-277.
- Bard, P. Y. (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation. En P.-Y. Bard, *The effects of surface geology on seismic motion* (Vol. 3, págs. 1251-1279).
- Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1(60), 29-61.
- CENAPRED, C. N. (2014). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos*. México: CENAPRED.
- CFE, C. F. (2008). *Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo*. México .
- Chavez-Garcia, Cuenca, J., Lermo, J. F., & Mijares, H. (Abril de 1995). Seismic Microzonation of the City of Puebla, Mexico. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. 2, págs. 545-548. Missouri: Missouri University of Science and Technology. Obtenido de <https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/03icrageesd/session07/1>
- CMIC, C. M. (2012). *Atlas de Riesgos Naturales Municipio de Puebla*. (G. municipal, Ed.) Puebla, Puebla, Puebla .
- CUPREDER, C. U. (2011). *Programa municipal de desarrollo urbano sustentable de Puebla*. Puebla: BUAP.
- ERN. (2020). *Evaluamos Riesgos por Naturaleza*. Obtenido de Visualizador de inmuebles con daños en México: <https://serv.ern.com.mx/VisualizadorERN>
- Esteva, L. (1970). *Regionalización sísmica de México para fines de ingeniería* (Serie Azul ed.). México: Instituto de ingeniería Unam.
- Haskell, N. A. (1962). Crustal reflection of plane P and SV waves. *J. Phys. Earth*(67).
- Hernández Estrada, A. F., Reinoso Angulo , E., Huerta Garnica , B., Ordaz Schroeder, M. G., Lermo Samaniego , J. F., & Veraz Felipe, L. (2013). Revisión de los efectos de sitio en las ciudades de Puebla, Guadalajara y Acapulco. *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Voca de Río, Veracruz.
- INEGI, I. N. (2010). *Síntesis socio demográfica municipal de Puabla*. Puebla.
- Kawase, H., Mori, Y., & Nagashima, F. (20018). Difference of horizontal-to-vertical spectral ratios of observed earthquakes and microtremors and its application to S-wave velocity inversion based on the diffuse field concept. *Earth, Planets and Space*, 1(70), 1.

- Lermo Samaniego , J. F., Martínez González , J. A., Angulo Carrillo , J., Zuñiga A., Á. R., Valle Orozco , R., & Espinosa Villalpando , L. Á. (2013). *Mapa de isoperiodos y clasificación de terrenos con fines de diseño por sismo para el municipio de Puebla, Pue.* México, D.F.: Coordinación de Ingeniería Sismológica, Instituto de Ingeniería-UNAM.
- Lermo, J. F., & Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, 1574-1594.
- Lermo, J., Ovando, E., & Limaymanta, M. (2008). Empirical transfer functions to build soil classification maps for seismic design. *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering*. Bejin, China: WCEE.
- Limaymanta Mendoza, F. M. (2009). *Uso de familias espectrales obtenidas con registros de sismos y microtemores para la clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico. Aplicación en las ciudades de Veracruz Boca del Río, Oaxaca y Acapulco.* Universidad Nacional Autónoma De México. México: Facultad de Ingeniería.
- Lizaola, R. S. (1990). Instrumentación Sísmica del estado de Puebla. *Elementos Ciencia y Cultura*, 2(14), 37-47.
- Medrano Rivera, V. H. (2003). *Estimación de espectros de respuesta en suelos de la ciudad de Puebla utilizando la teoría de vibraciones aleatorias* . México : Tesis Licenciatura .
- Montecillo , T. R. (1996). *Estimación empírica de efectos de sitio en el Distrito Federal.* México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Nakamura, Y. (1 de Febrero de 1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface.
- Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez , M., Iturrarán-Viveros , U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin , L., . . . Rodríguez-Castellanos, A. (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered médium. *Geophys. J. Int.*(186), 221-225. Retrieved from <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x>
- Seed, B. H. (1986). Influencia de las condiciones locales de suelo en movimientos del terreno y en daños a edificios durante sismos. *Octava conferencia Nabor Carrillo* (pág. 187). Mexicana de Mecánica de Suelos.
- Serrano, R. (1990). Instrumentación sísmica del estado de Puebla. *Elementos, Ciencia y Cultura*, 2, 37-47.

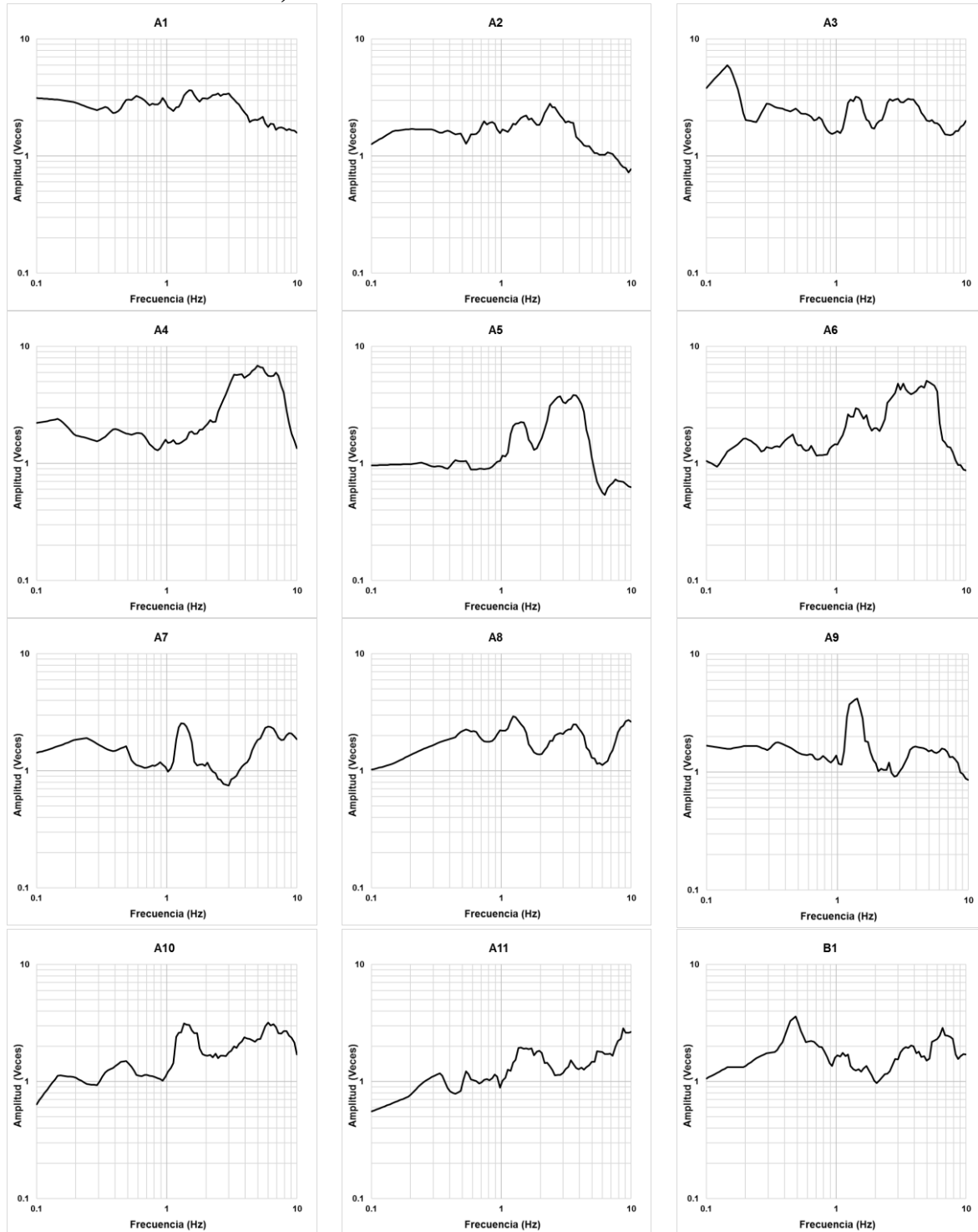


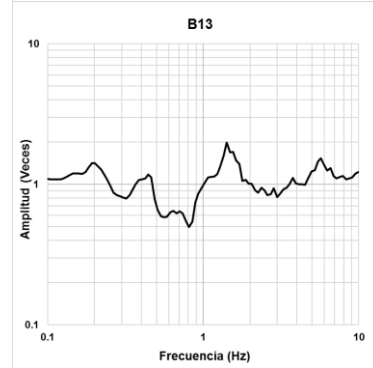
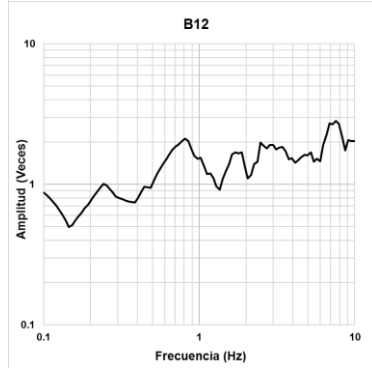
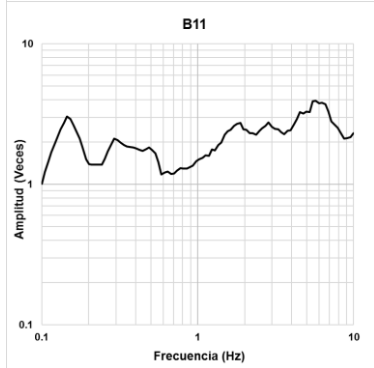
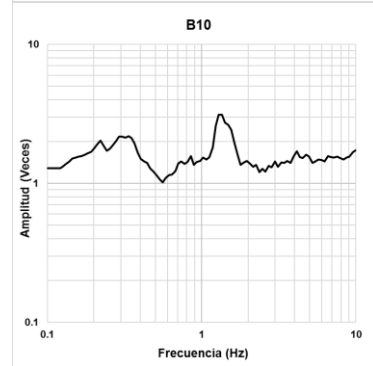
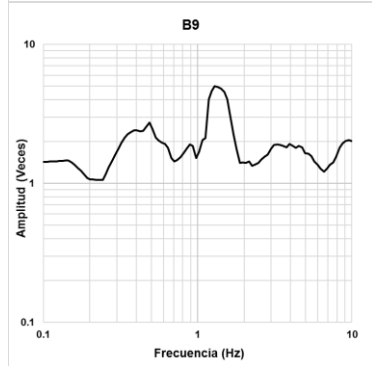
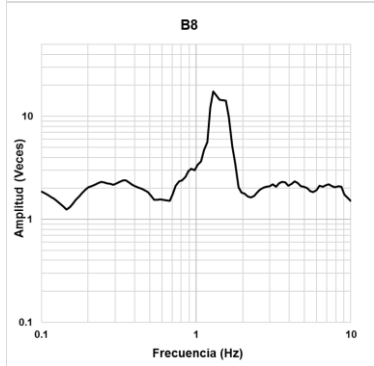
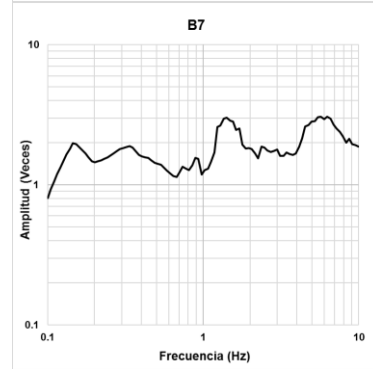
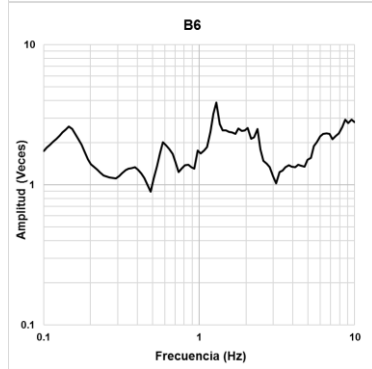
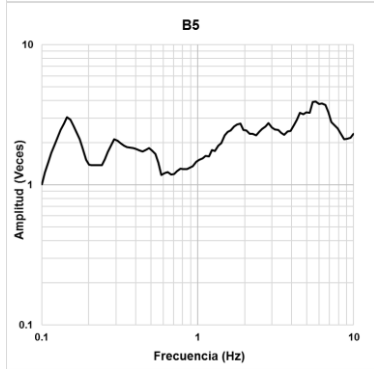
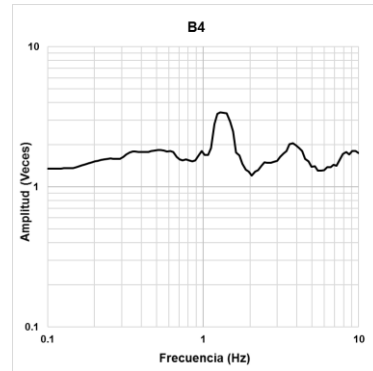
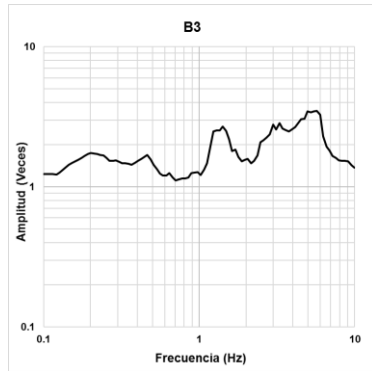
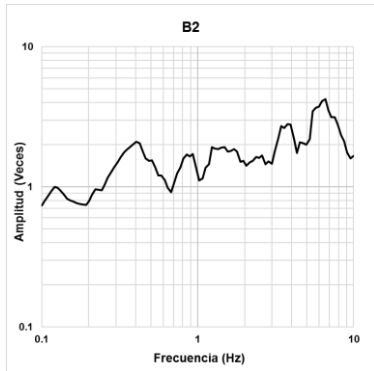
# ANEXO 1 COCIENTES ESPECTRALES H/V

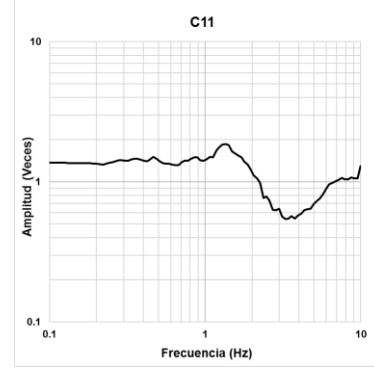
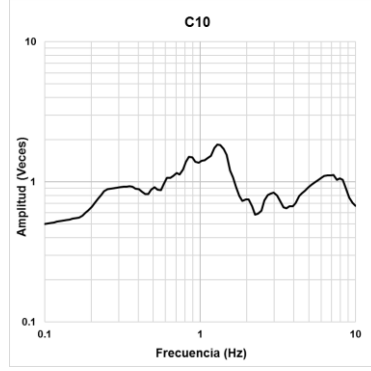
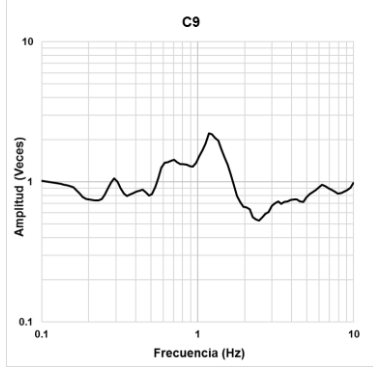
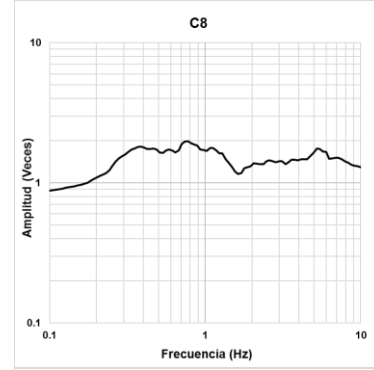
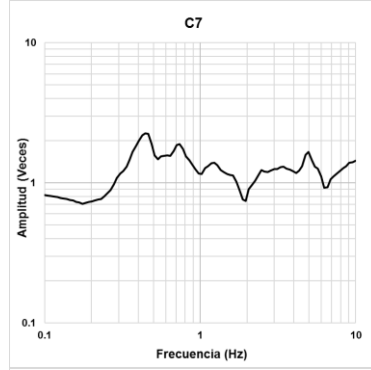
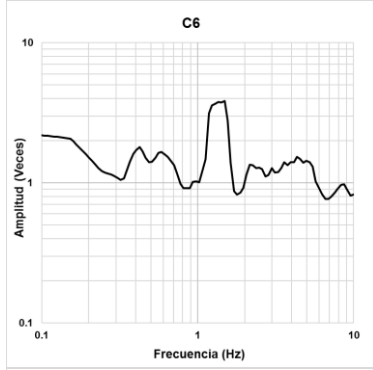
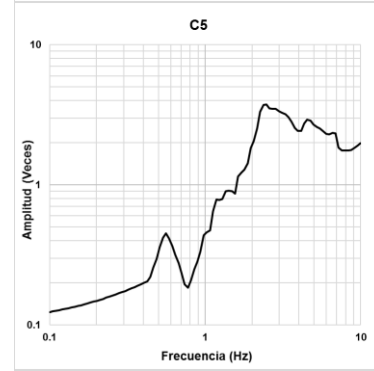
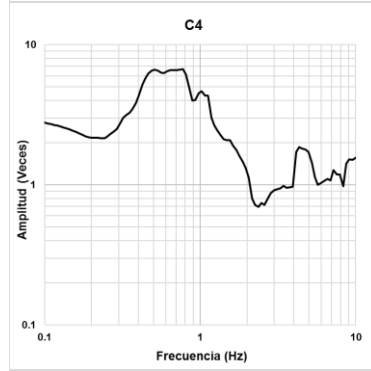
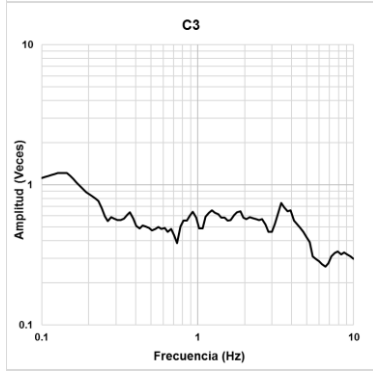
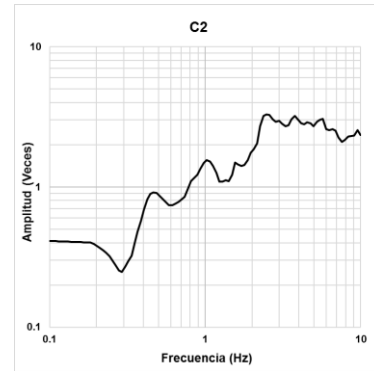
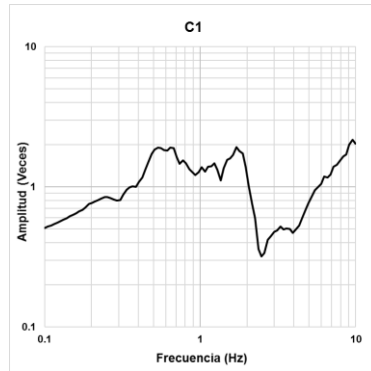
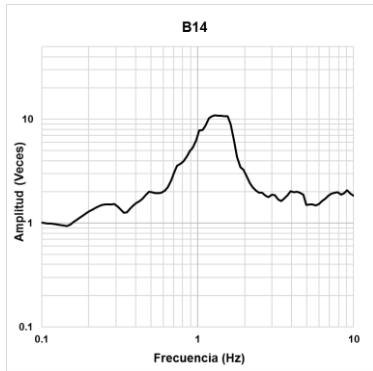
## Estaciones Acelerograficas

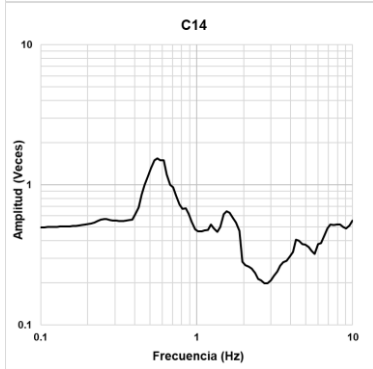
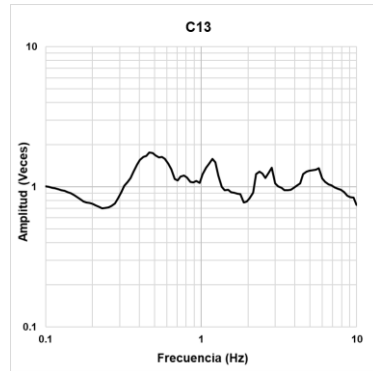
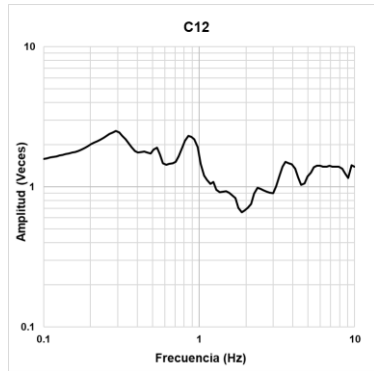
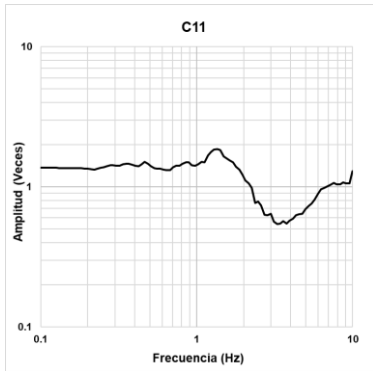


# Chávez-García et al., 1995

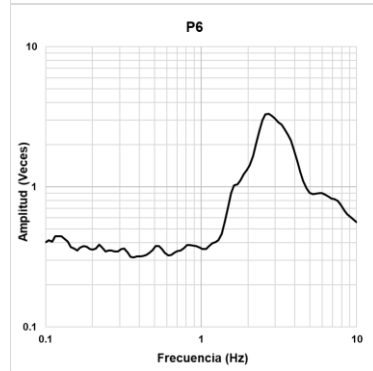
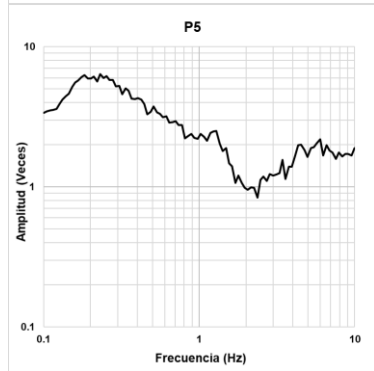
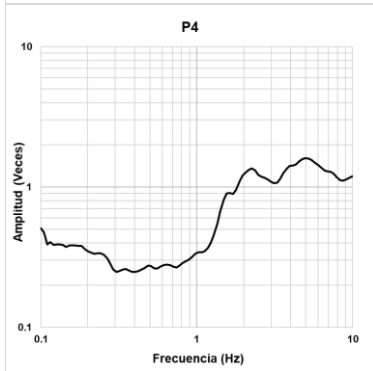
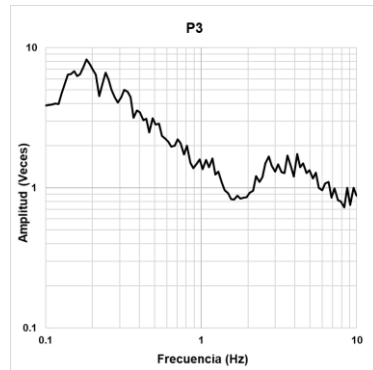
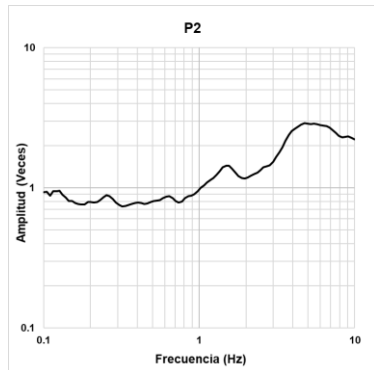
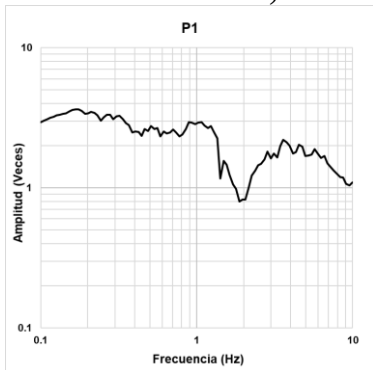


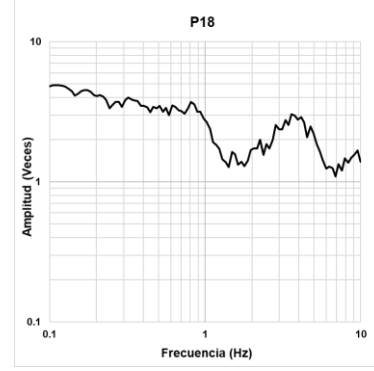
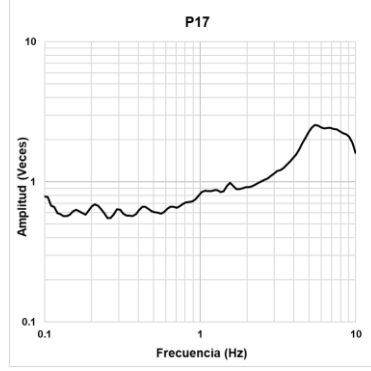
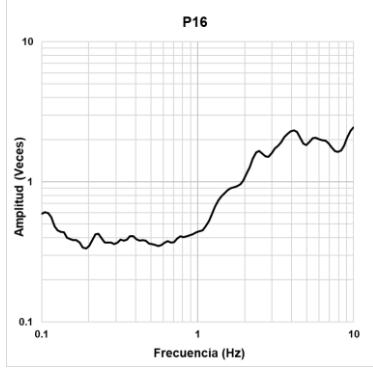
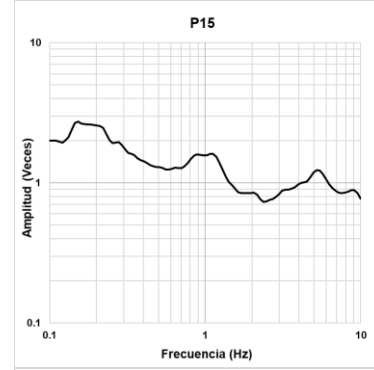
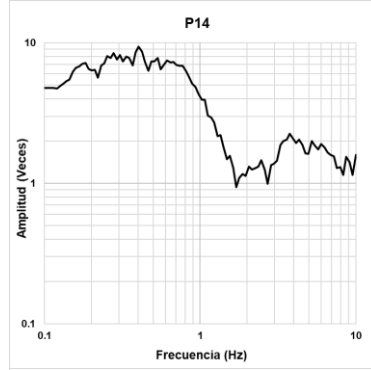
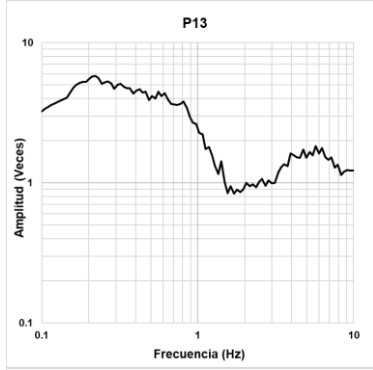
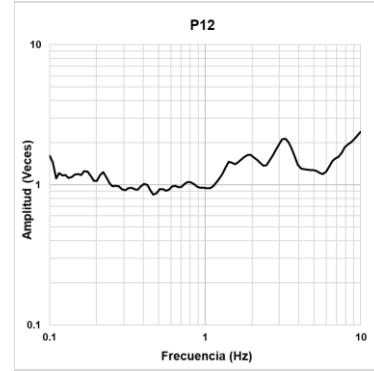
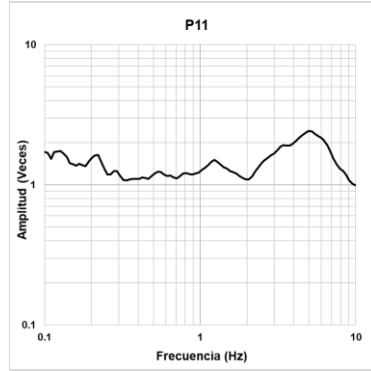
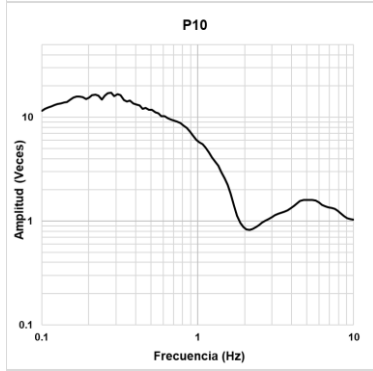
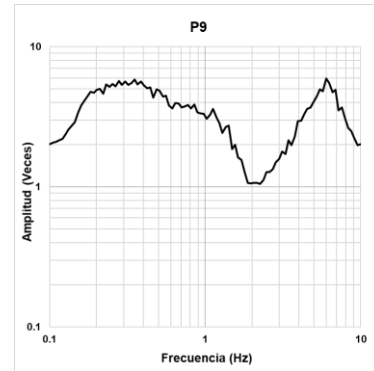
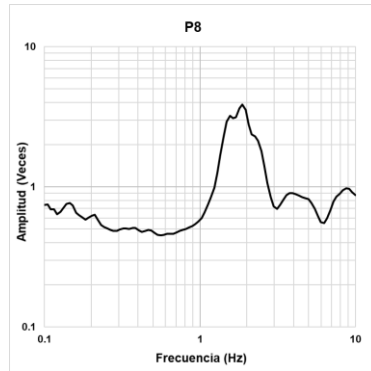
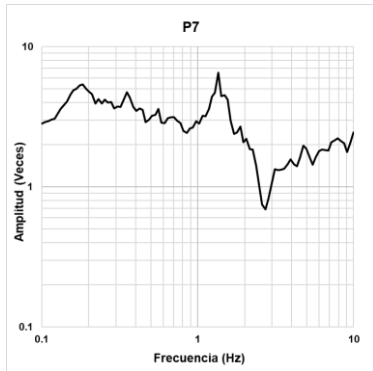


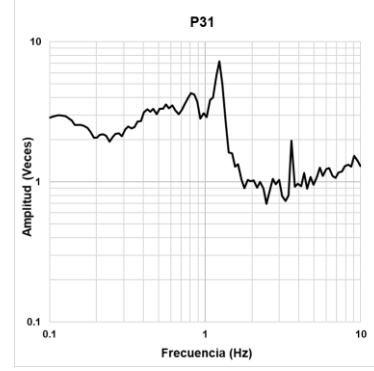
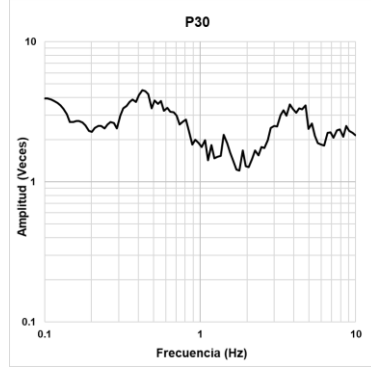
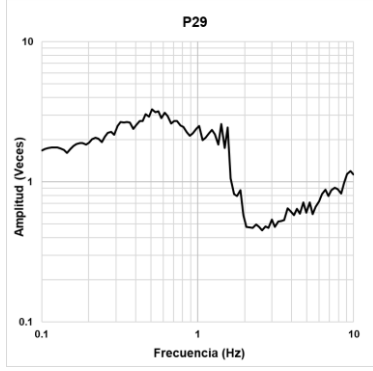
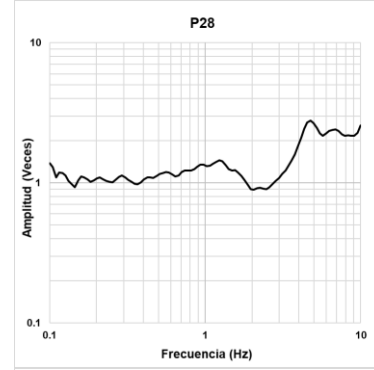
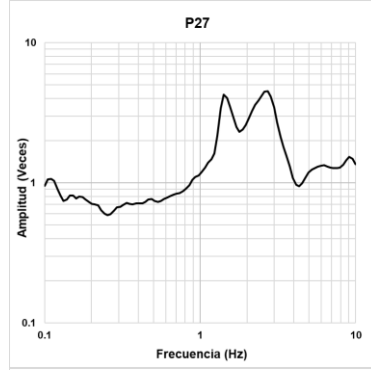
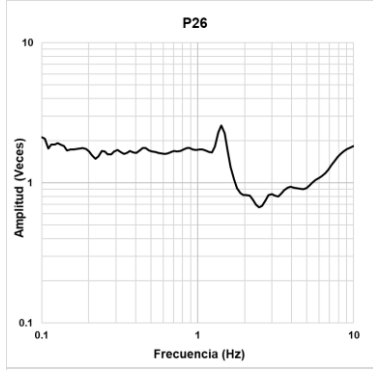
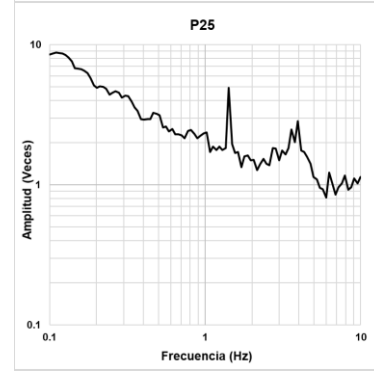
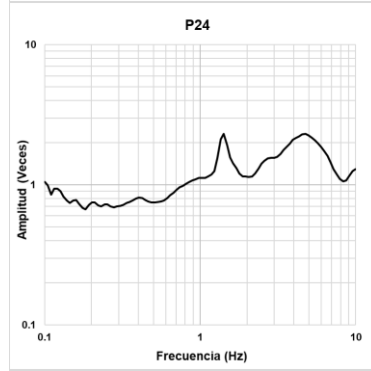
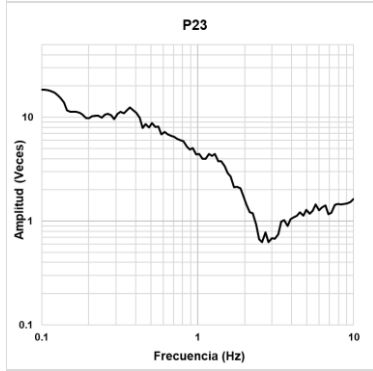
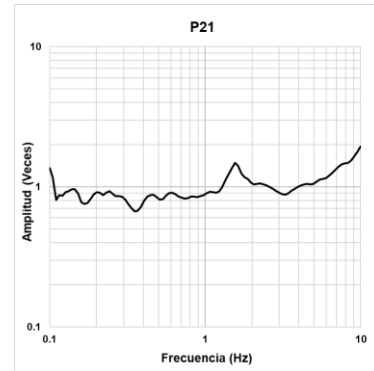
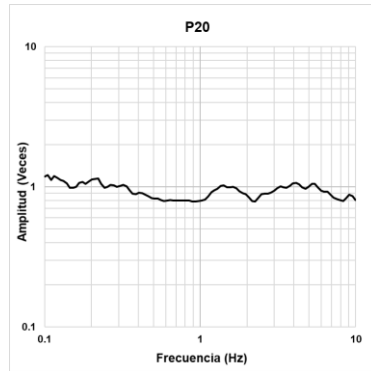
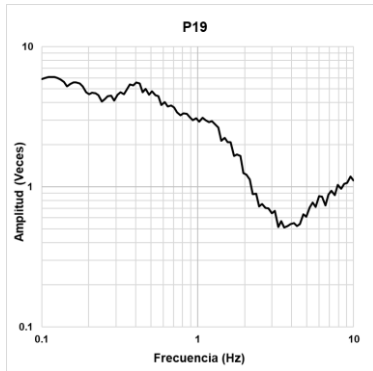




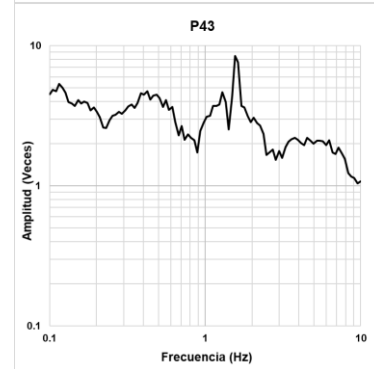
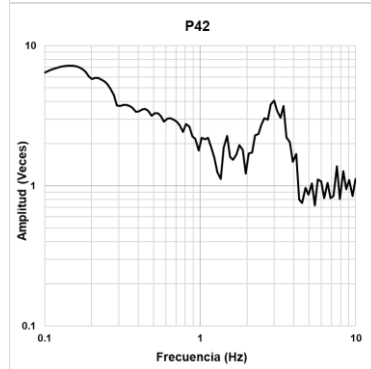
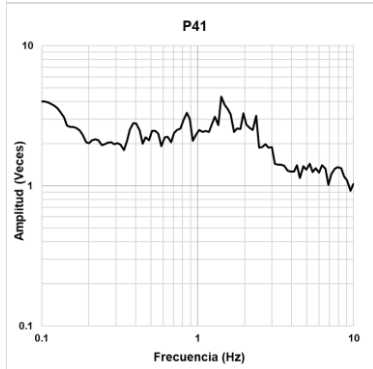
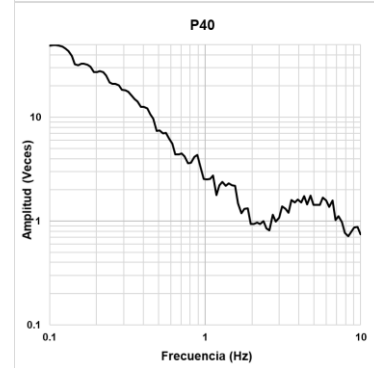
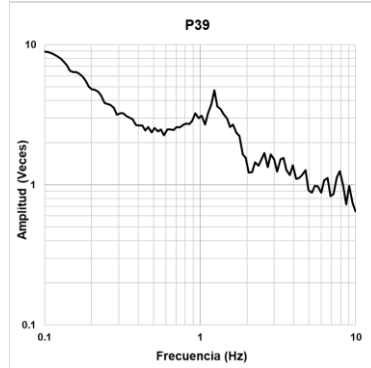
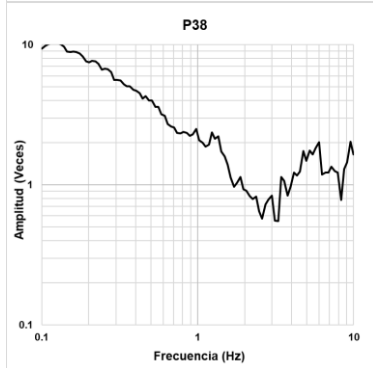
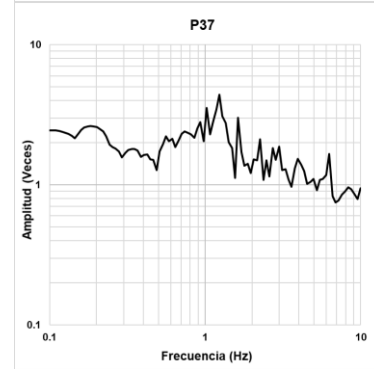
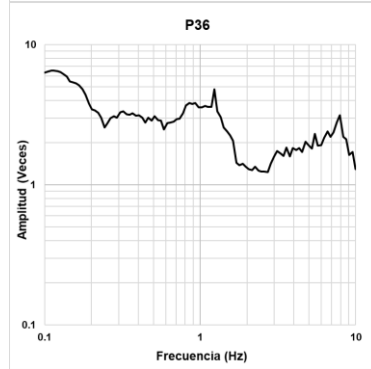
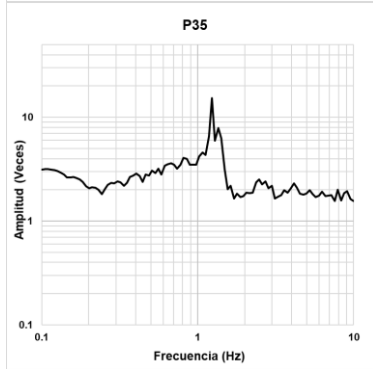
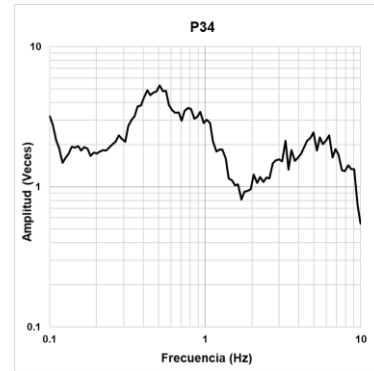
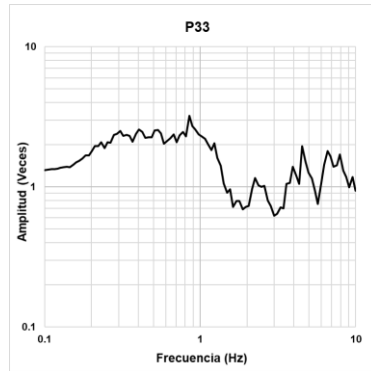
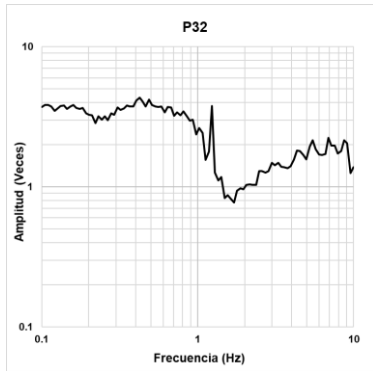
**Hernández et al., 2013**







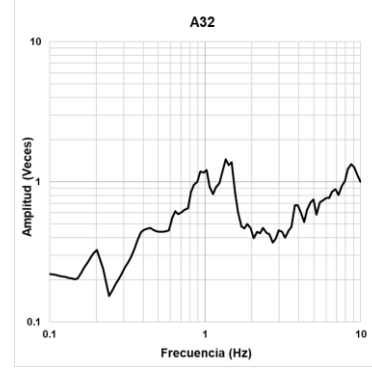
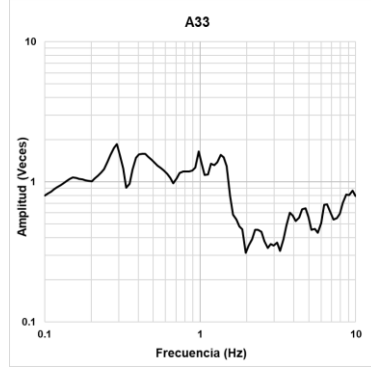
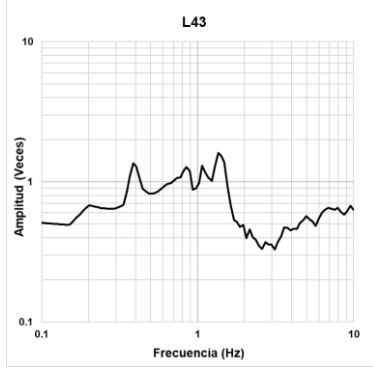
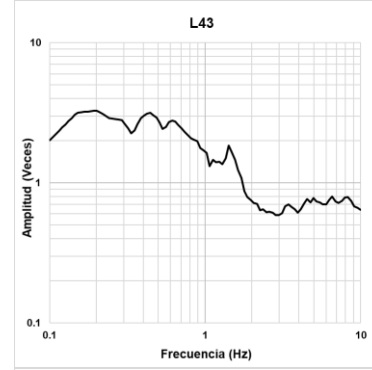
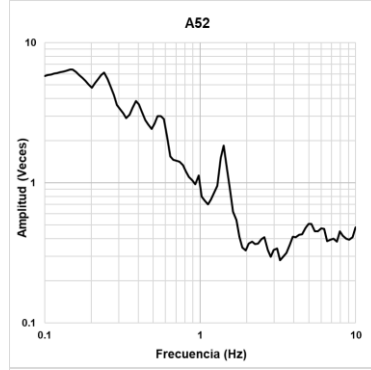
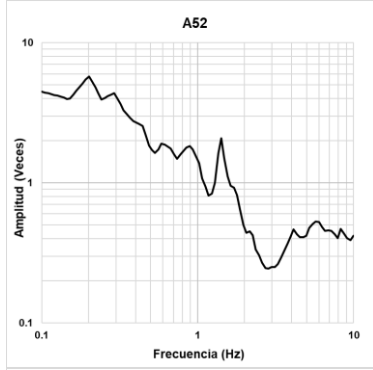
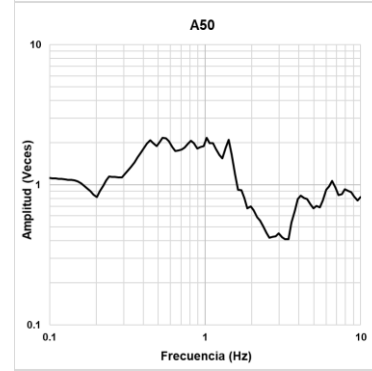
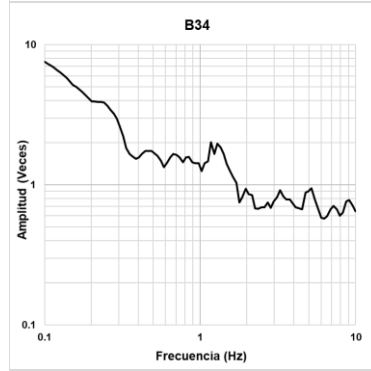
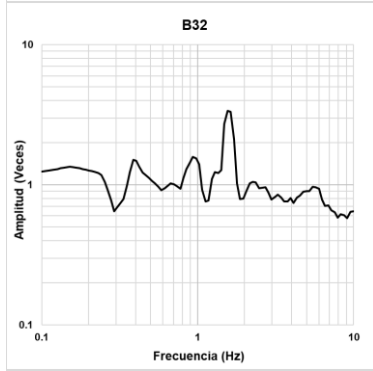
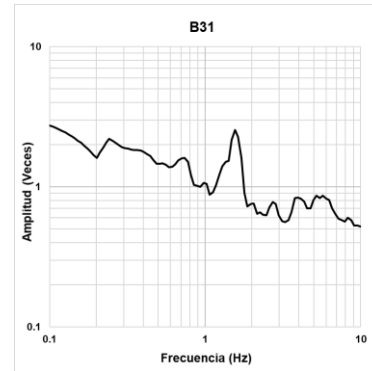
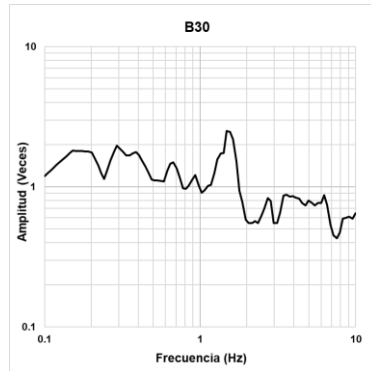
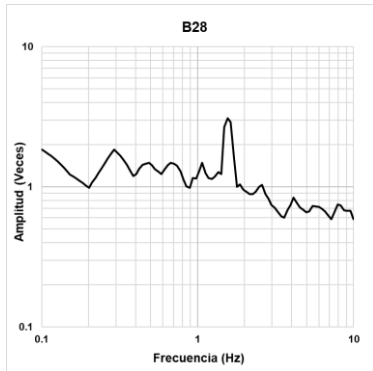


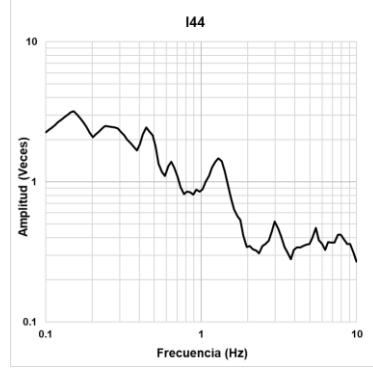
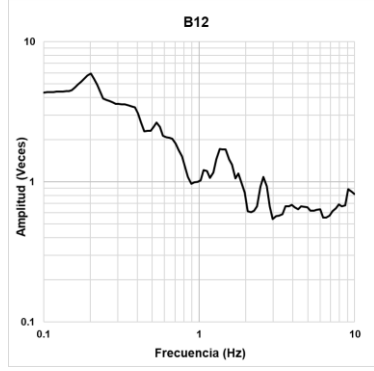
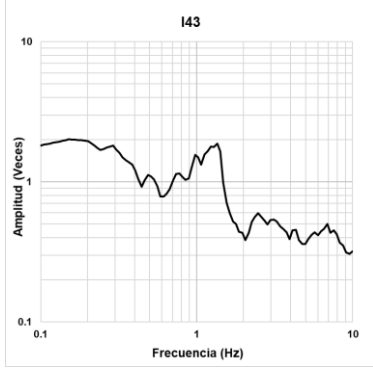
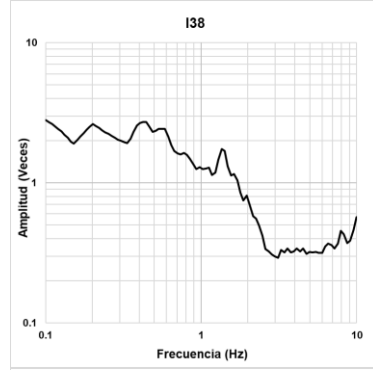
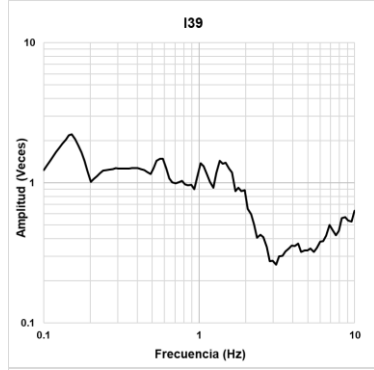
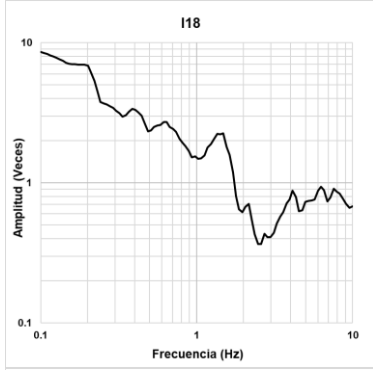
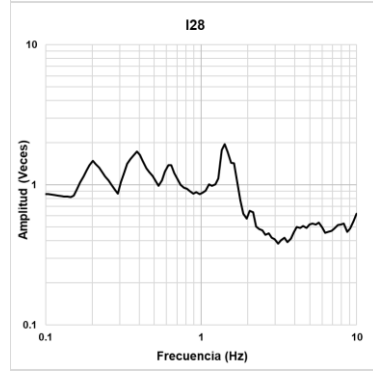
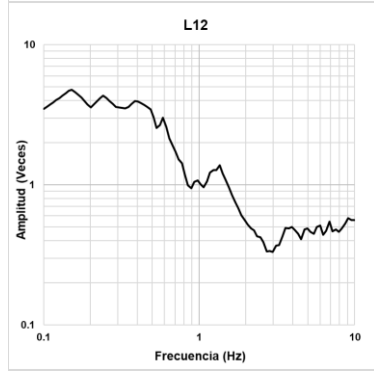
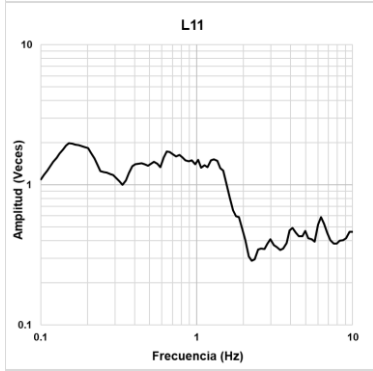
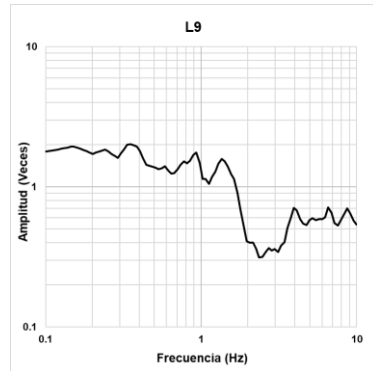
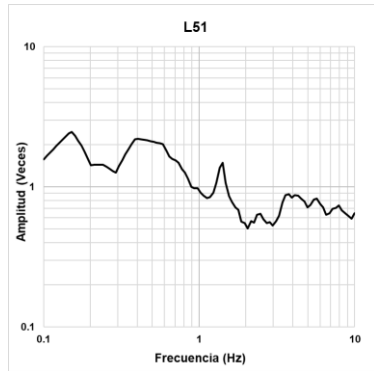
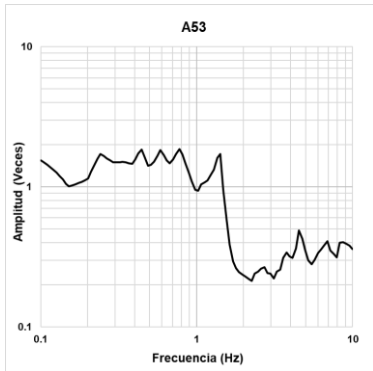


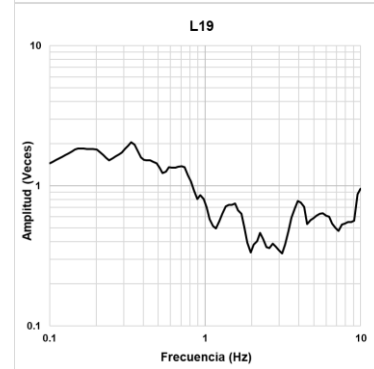
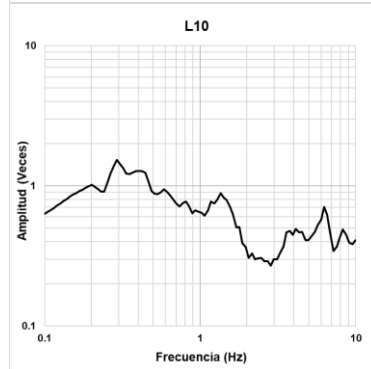
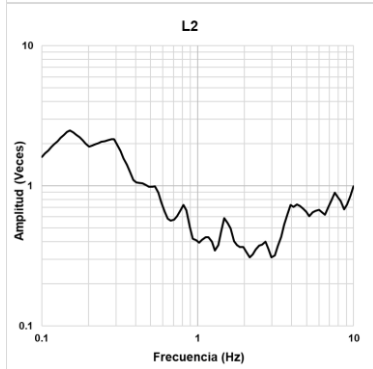
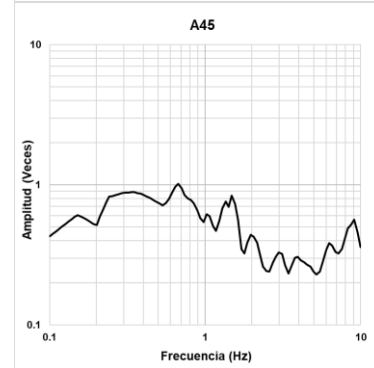
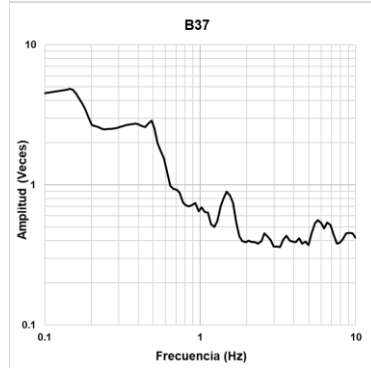
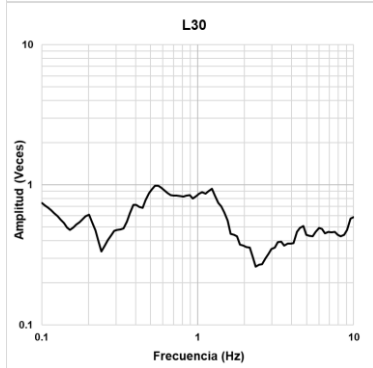
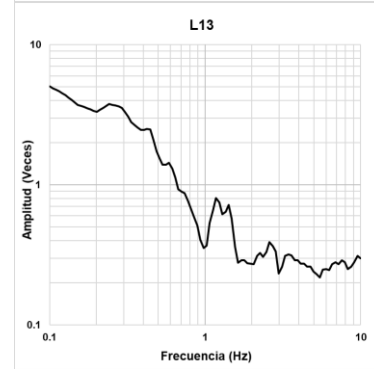
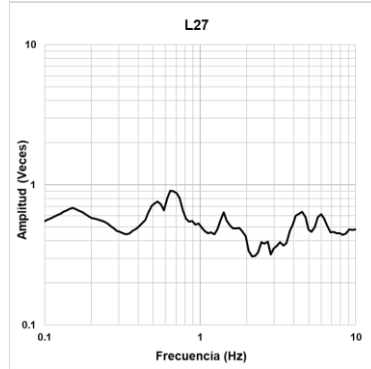
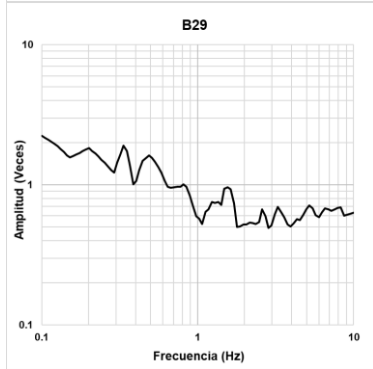
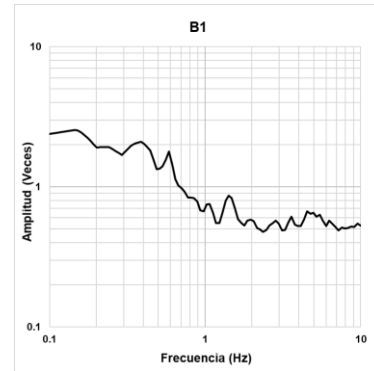
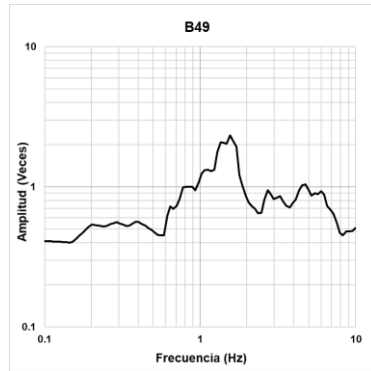
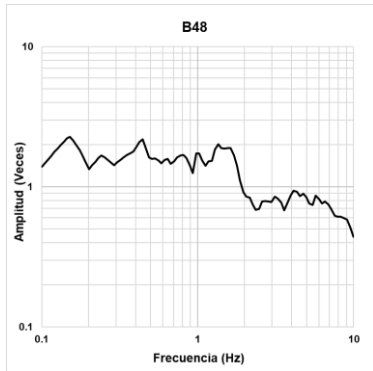


# Lermo et al., 2008

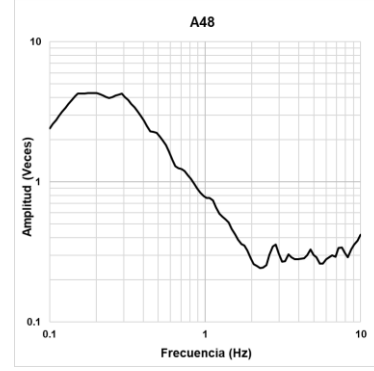
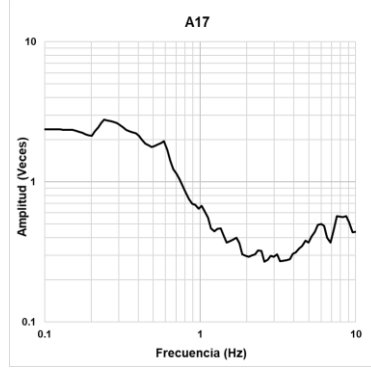
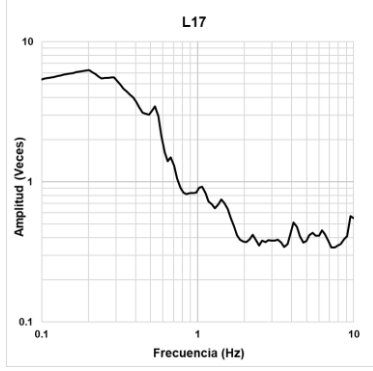
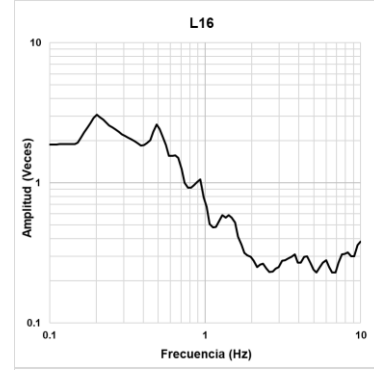
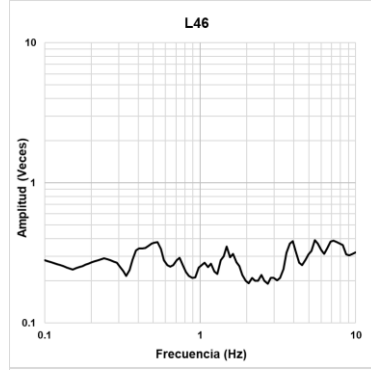
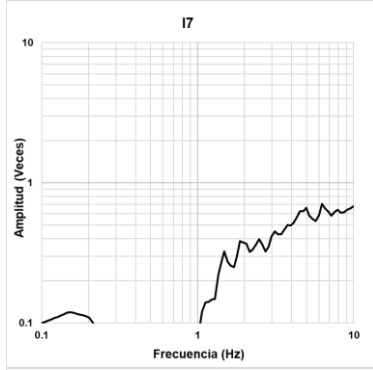
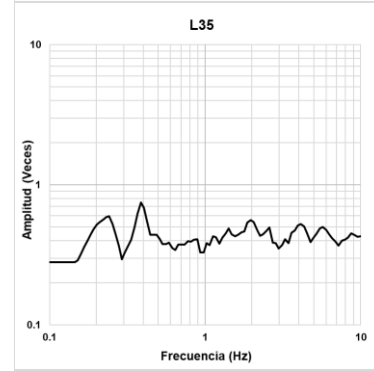
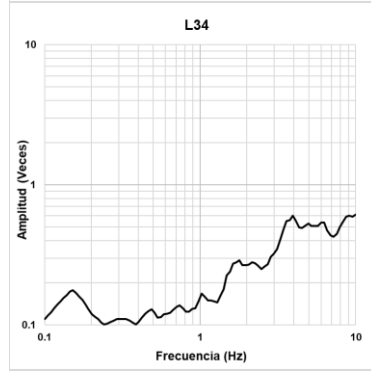
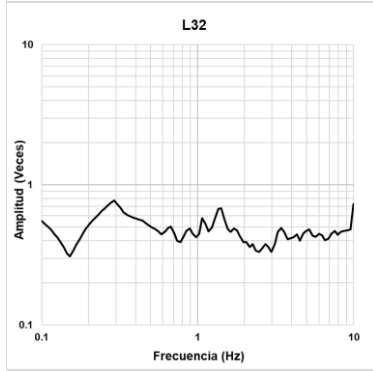
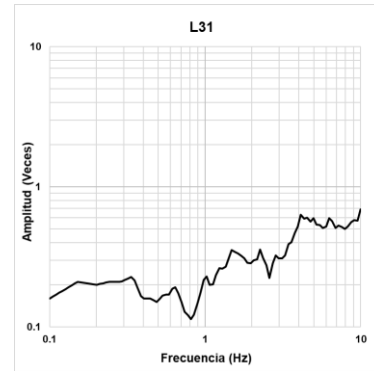
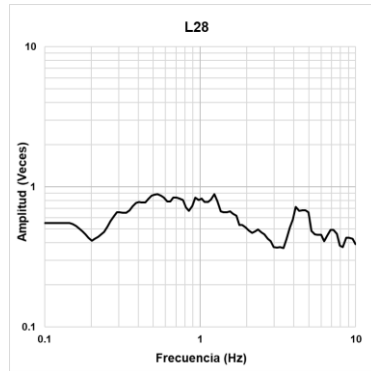
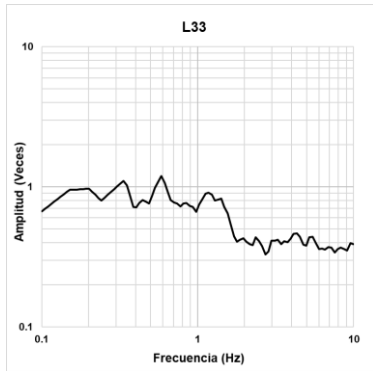


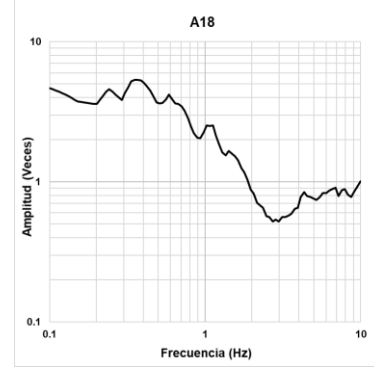
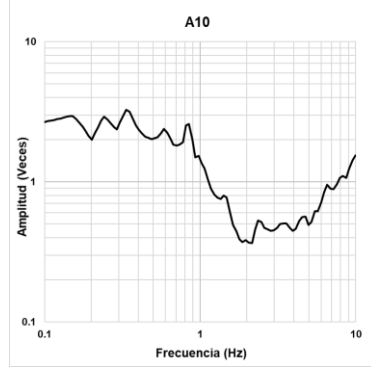
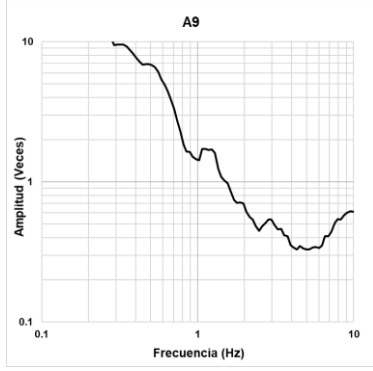
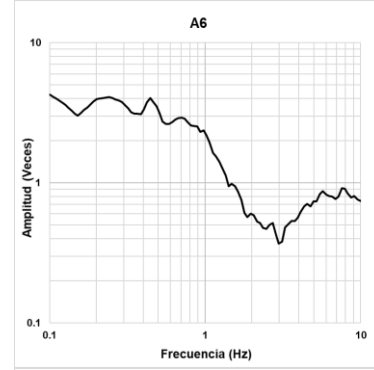
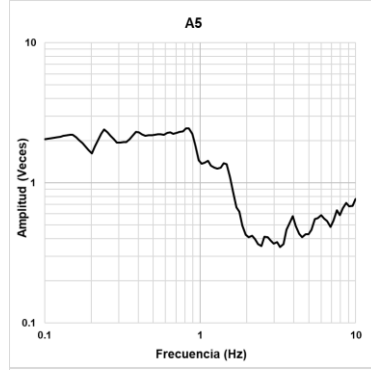
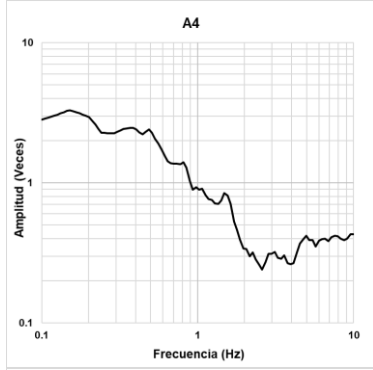
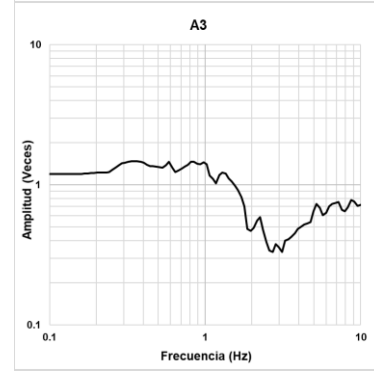
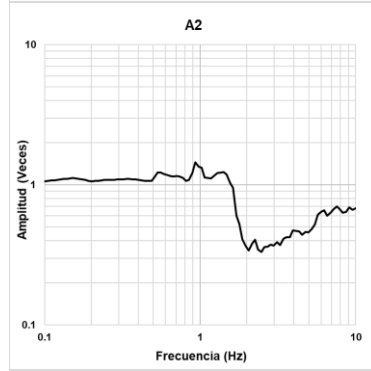
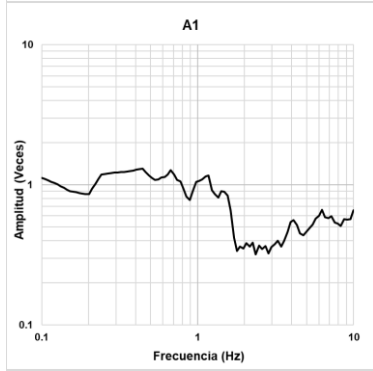
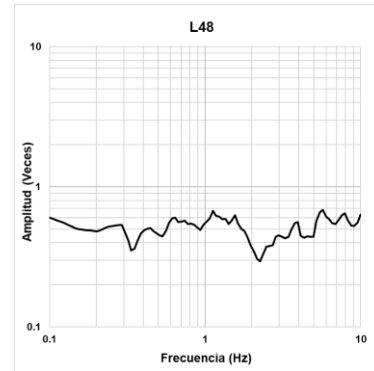
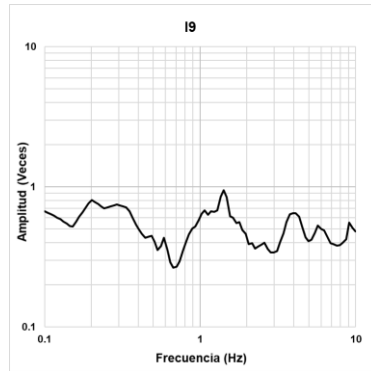
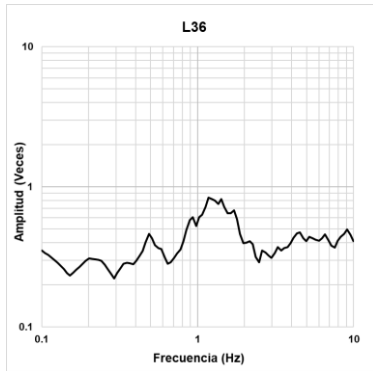


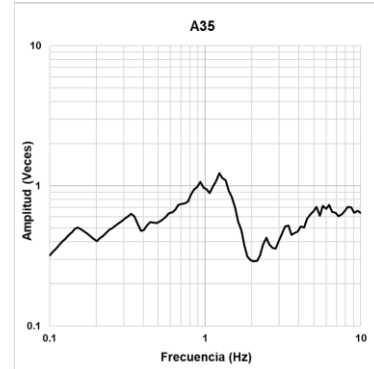
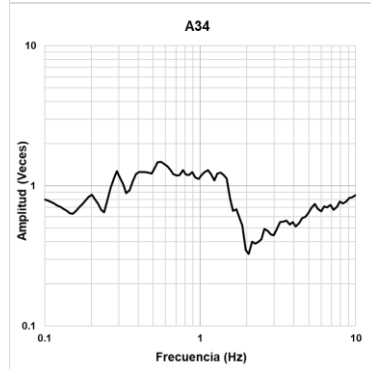
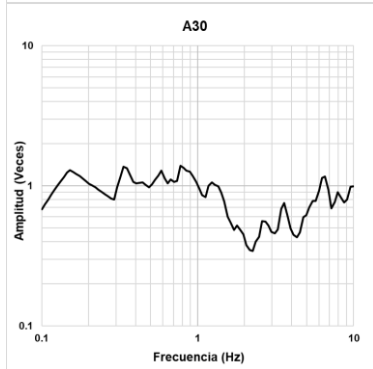
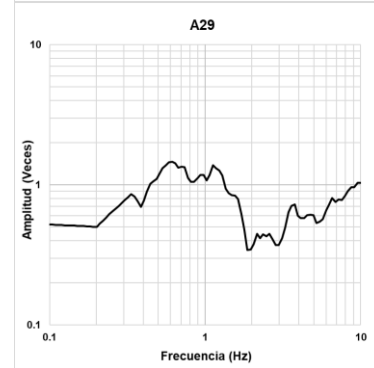
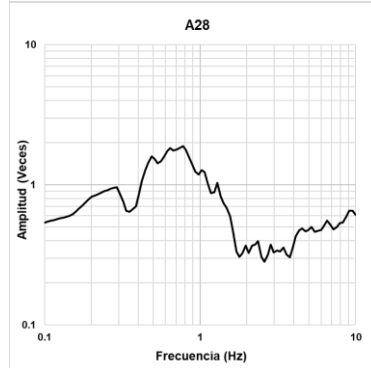
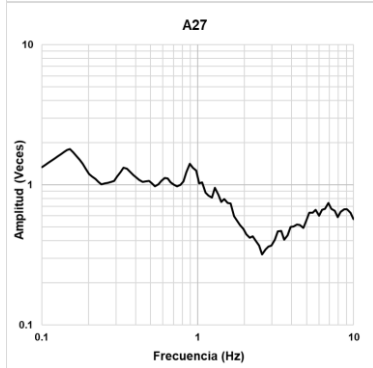
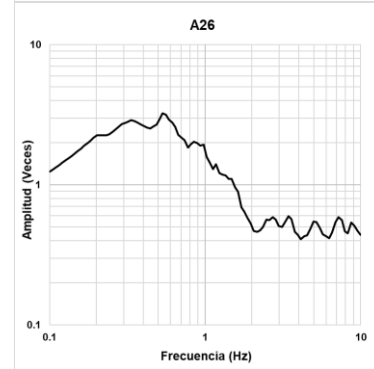
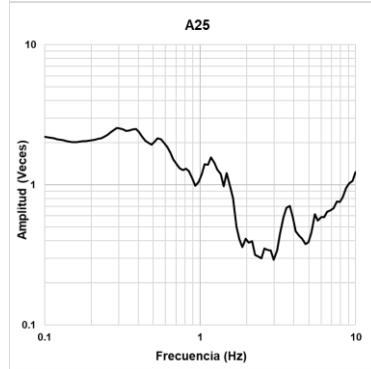
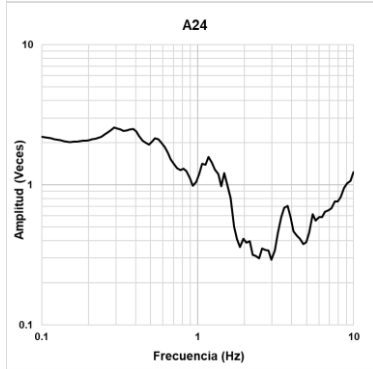
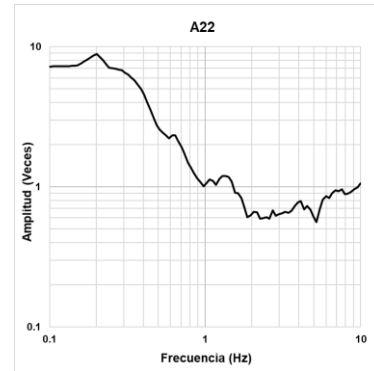
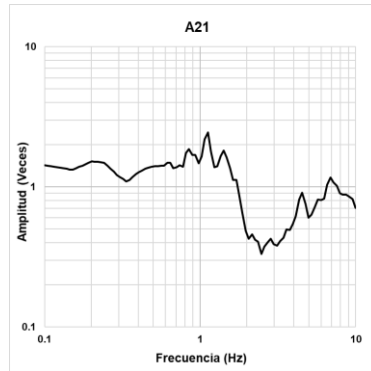
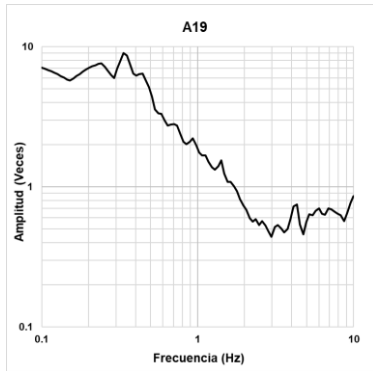


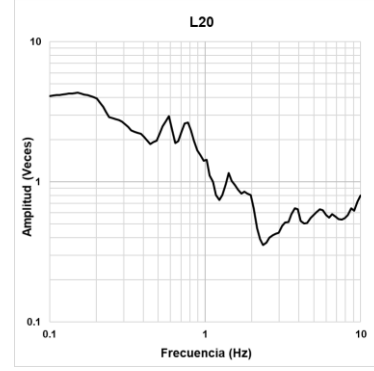
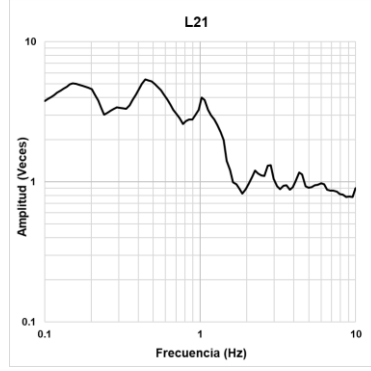
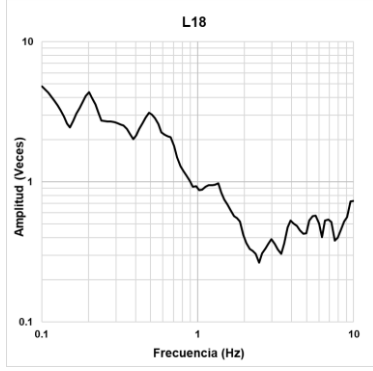
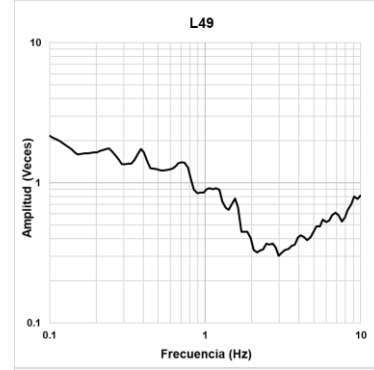
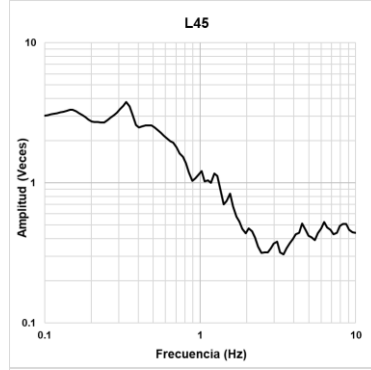
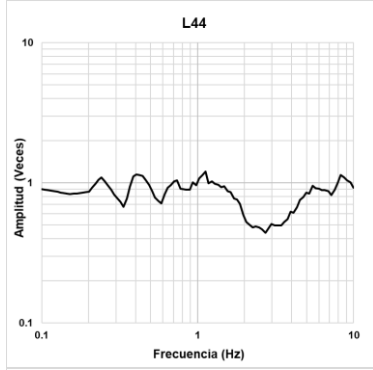
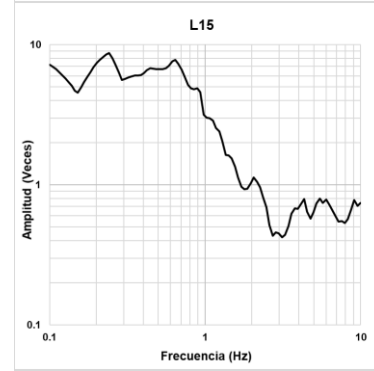
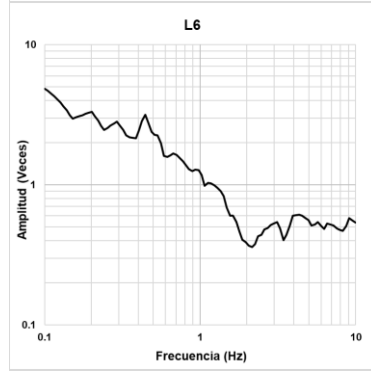
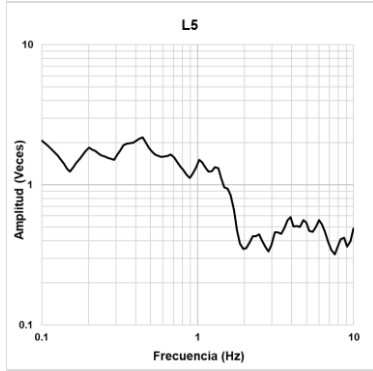
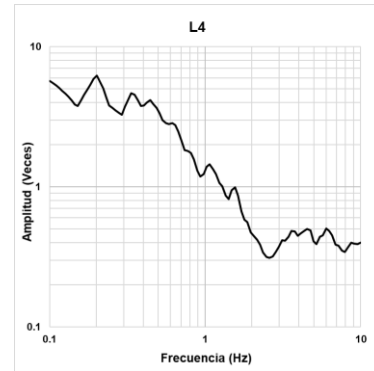
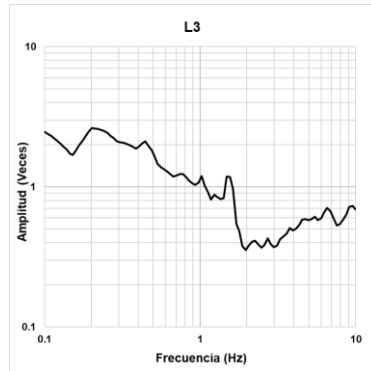
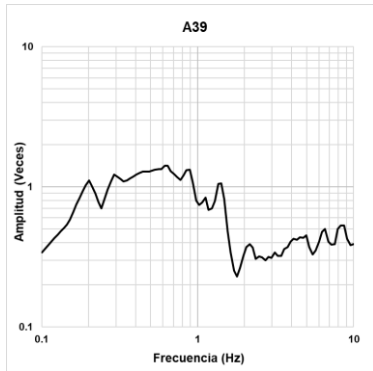


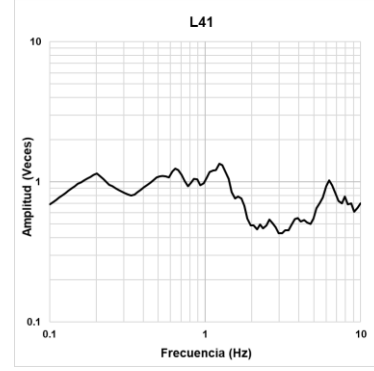
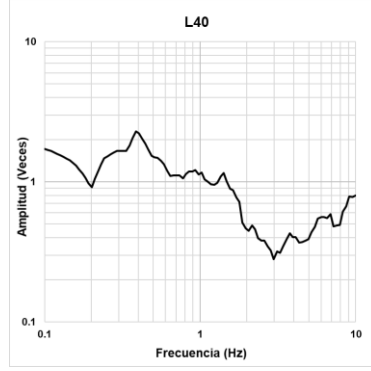
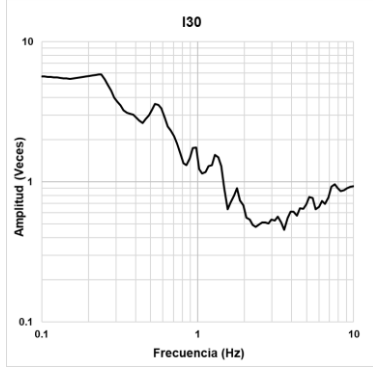
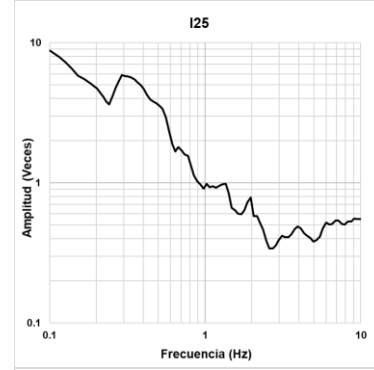
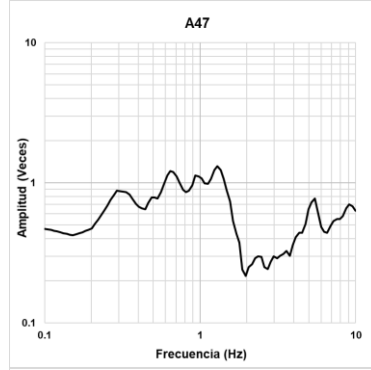
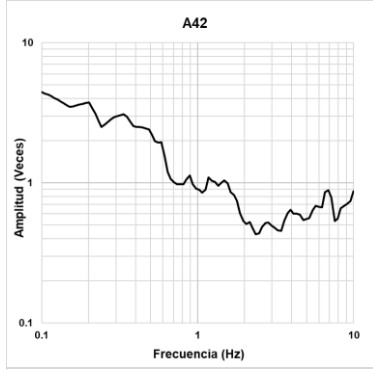
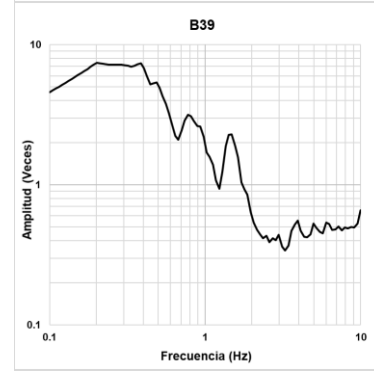
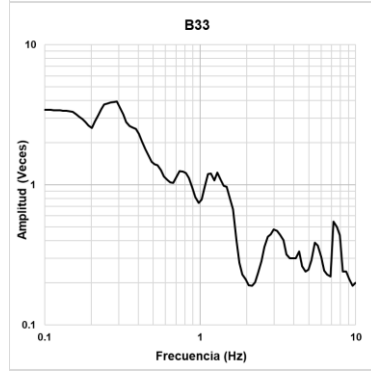
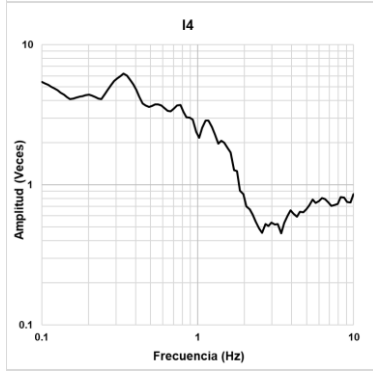
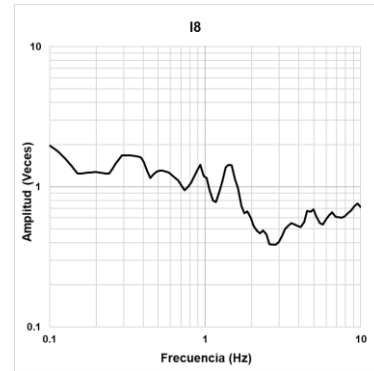
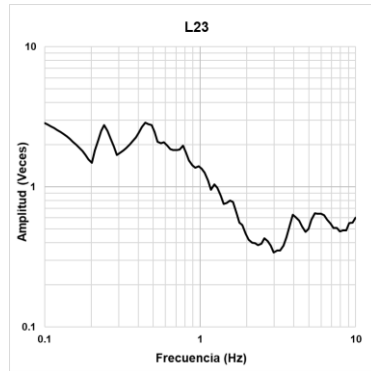
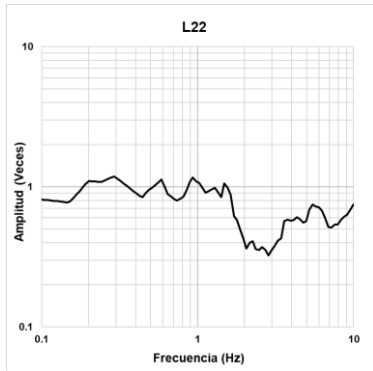


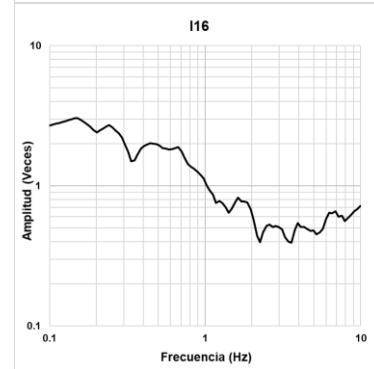
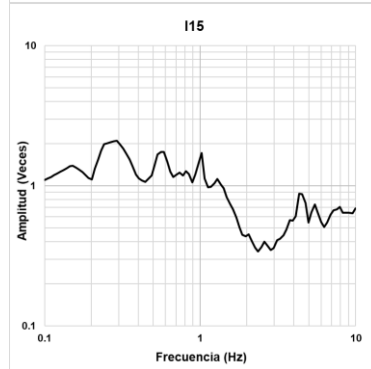
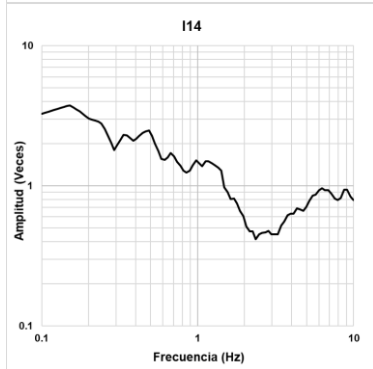
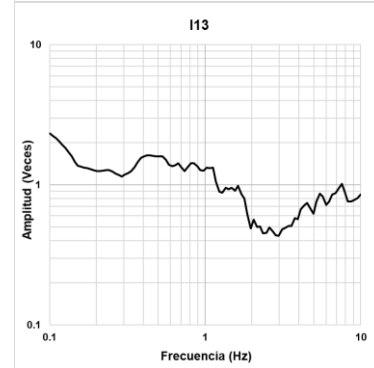
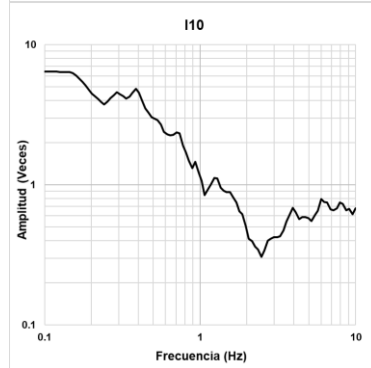
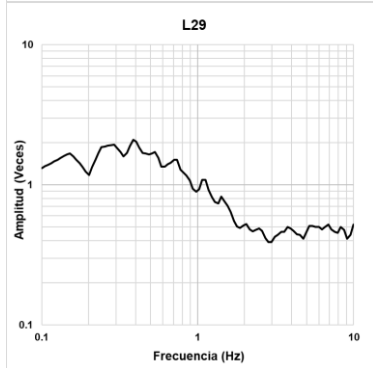
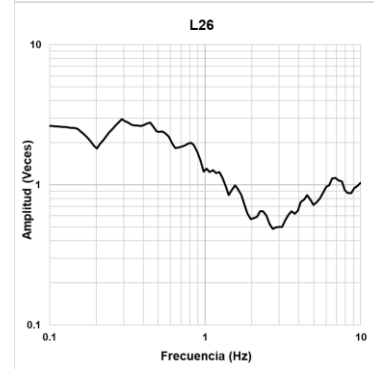
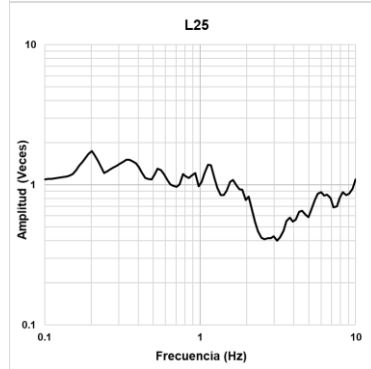
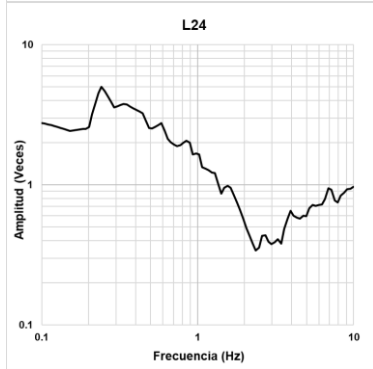
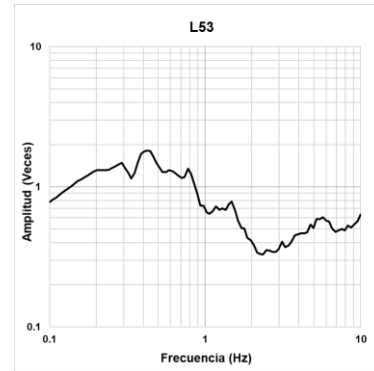
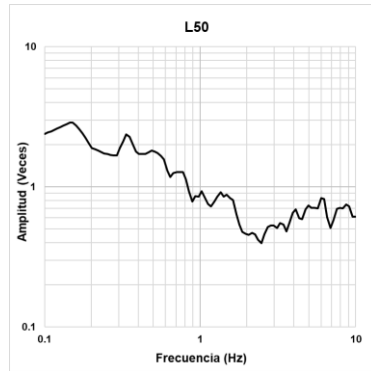
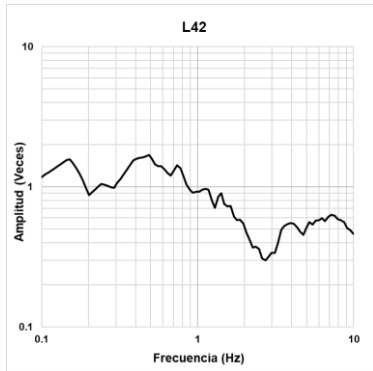




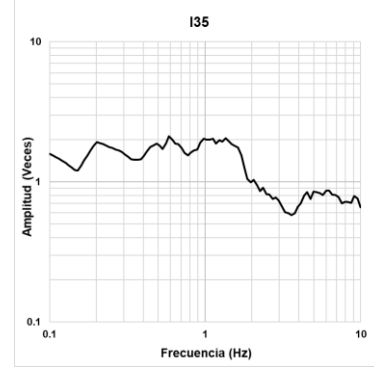
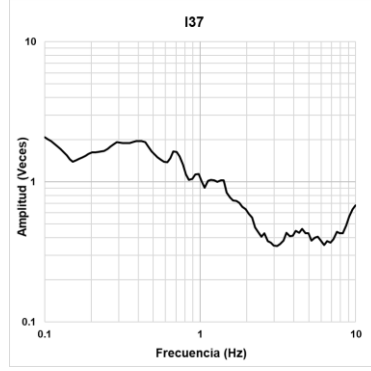
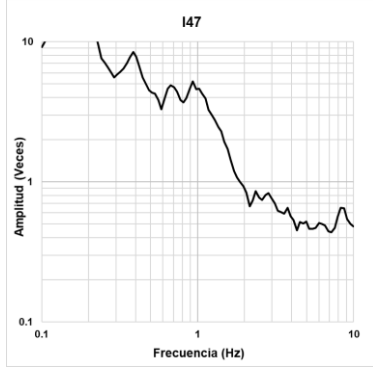
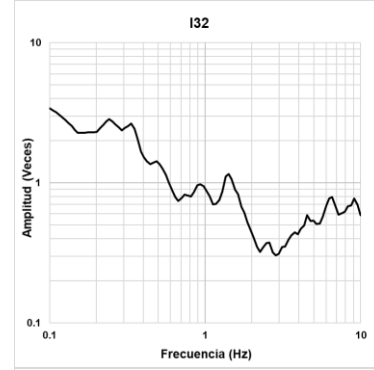
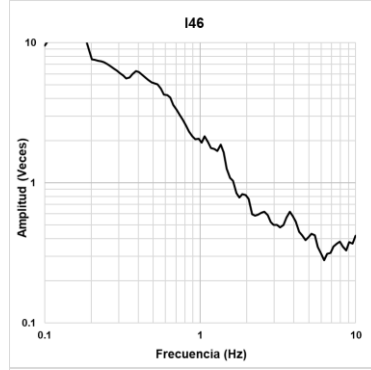
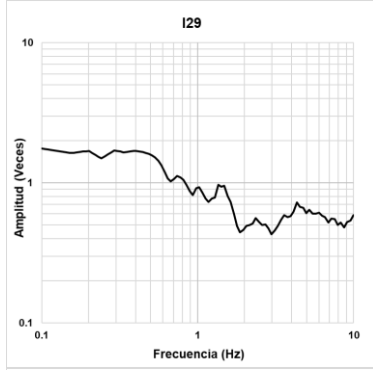
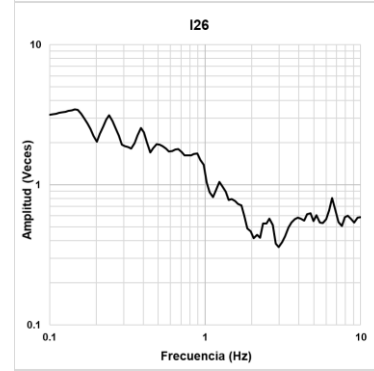
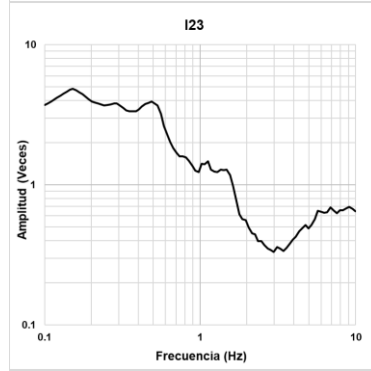
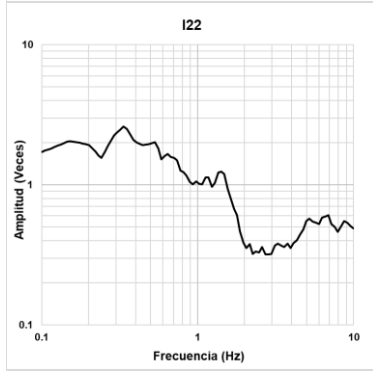
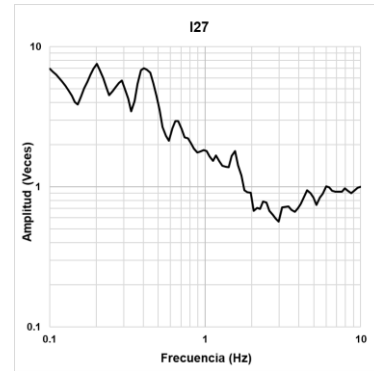
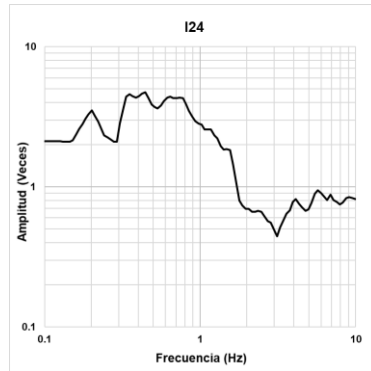
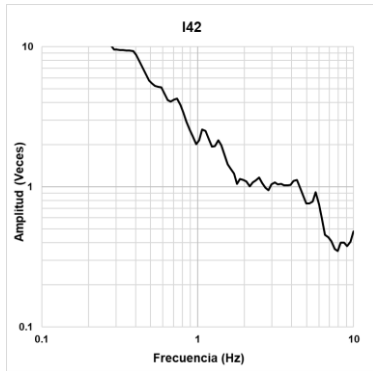


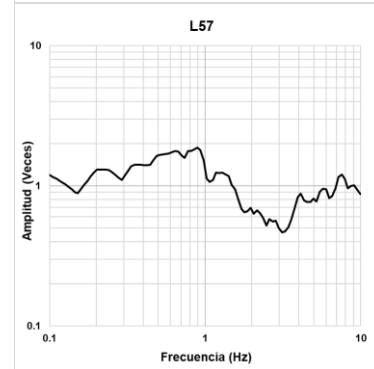
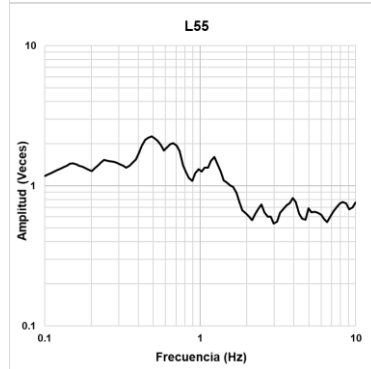
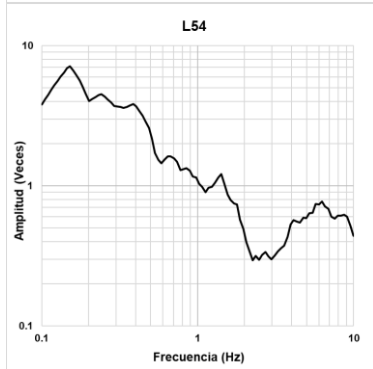
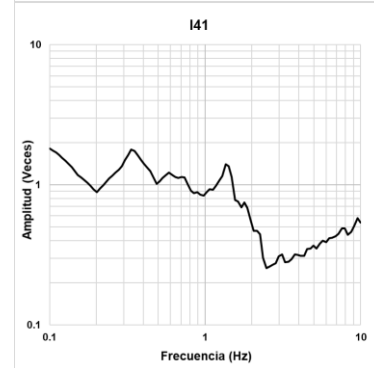
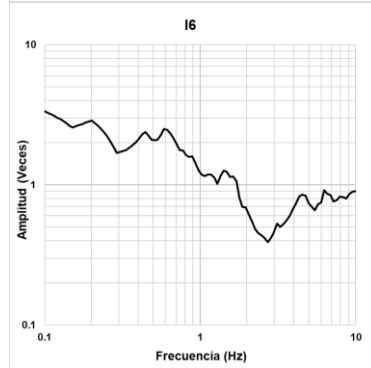
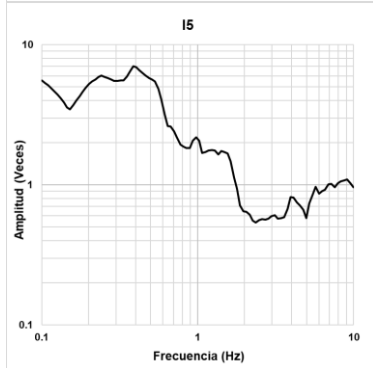
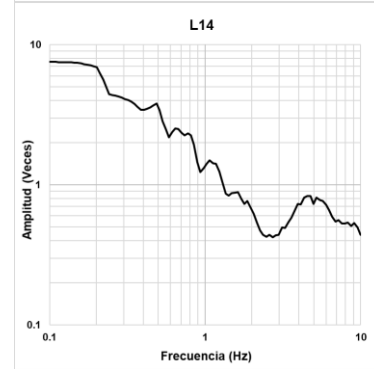
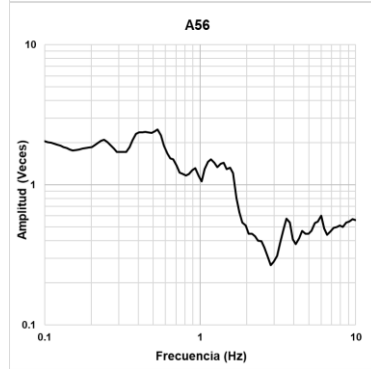
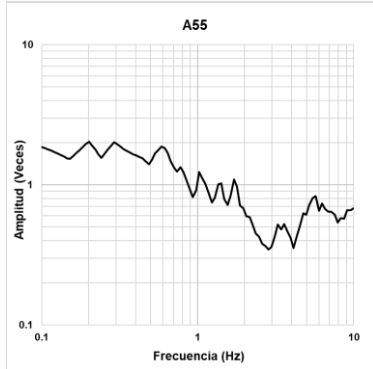
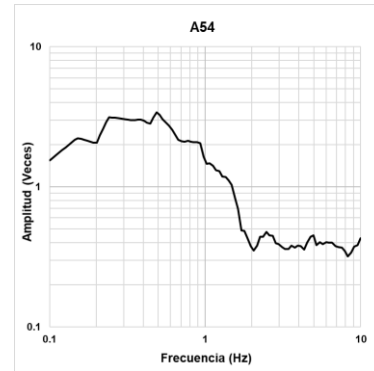
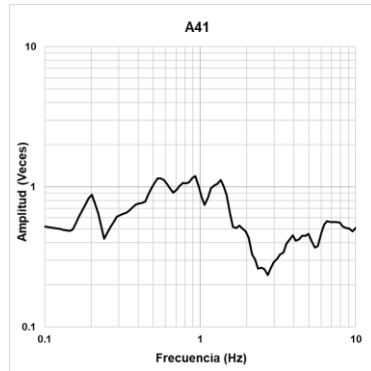
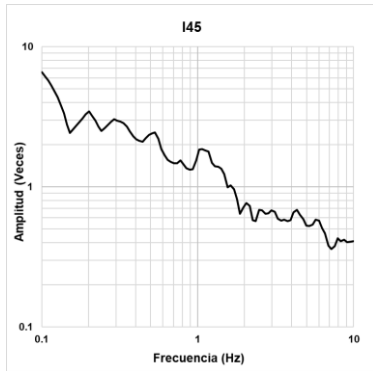


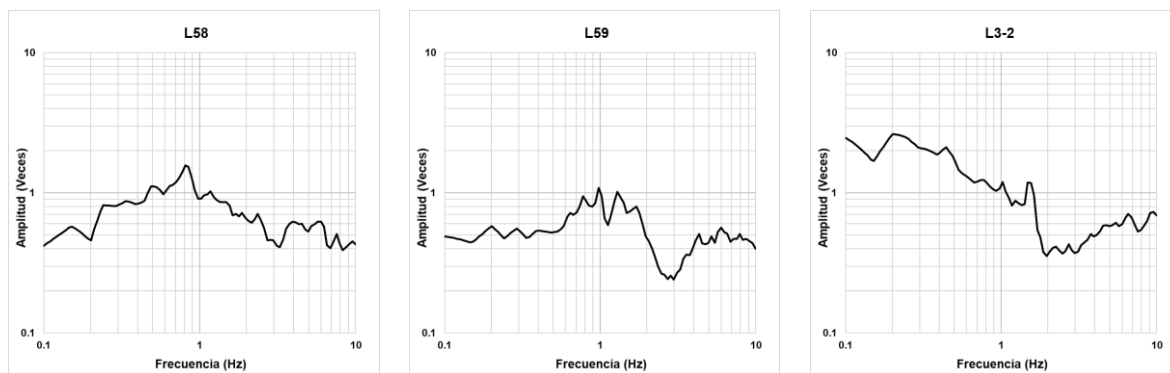












## ANEXO 2 BASE DE DATOS

### ESTACIONES ACELEROGRAFICAS

NÚMERO	Punto	Latitud	Longitud	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Amplitud	Familia
1	RIPB	19.00830929	-98.21126036	0.5857	1.71	8.0462075	5
2	RIPC	19.04829503	-98.21700449	0.4863	2.06	4.817188	5
3	RFPP	19.0436803	-98.19109935	1.4175	0.71	5.31913	4
4	PBPP	19.04746419	-98.20706377	0.6136	1.63	5.283666	5
5	SRPU	18.96545644	-98.26004961	1.0235	0.98	4.851585	4
6	PZPU	19.05509239	-98.22715832	1.5557	0.64	7.388858	4
7	LMPP	19.03014386	-98.17805357	4.3288	0.23	1.783704	1
8	UAPP	19.00006818	-98.20377492	1.6298	0.61	5.152553333	4
9	CAPP	19.09123654	-98.18805099	0.6428	1.56	5.104596667	5
10	BHPP	19.10951831	-98.22707984	0.5337	1.87	6.4851525	5
11	PHPU	19.04415948	-98.16843564	0.9326	1.07	13.545	anómalo
12	SXPU	19.03994	-98.21509	0.5591	1.79	2.547645	1

### CHAVEZ-GARCIA, CUENCA, LERMO, & MIJARES, 1995

NÚMERO	Punto	Latitud	Longitud	Frecuencia [Hz]	Periodo [s]	Amplitud	Familia
1	A1	19.05503185	-98.22718503	1.485	0.67	3.6483	3
2	A2	19.0540569	-98.22345494	2.3645	0.42	2.8113	1
3	A3	19.05293262	-98.22136598	1.4175	0.71	3.2105	3
4	A4	19.05462004	-98.21883536	4.977	0.20	6.856	2
5	A5	19.05475944	-98.21404693	3.5938	0.28	3.8346	3
6	A6	19.05956415	-98.20650547	4.977	0.20	5.0831	3
7	A7	19.06516317	-98.20833097	1.2916	0.77	2.5406	4
8	A8	19.06777372	-98.20958148	1.2329	0.81	2.9119	3
9	A9	19.05480871	-98.20149136	1.3531	0.74	4.0975	4
10	A10	19.05663378	-98.19536358	5.9948	0.17	3.1798	2
11	A11	19.05813826	-98.18764806	8.6975	0.11	2.8544	4

12	B1	19.07470764	-98.16579142	6.5793	0.15	2.8806	5
13	B2	19.07026411	-98.16557161	6.5793	0.15	4.2236	2
14	B3	19.07489951	-98.15527556	5.7224	0.17	3.4817	2
15	B4	19.05815885	-98.15700172	1.2916	0.77	3.3967	4
16	B5	19.05503931	-98.15419547	5.7224	0.17	3.9201	2
17	B6	19.0485314	-98.16778596	1.2916	0.77	3.8745	4
18	B7	19.04627724	-98.18937673	6.2803	0.16	3.0639	2
19	B8	19.03589214	-98.19362391	1.2916	0.77	17.3589	4
20	B9	19.02555061	-98.19617621	1.2916	0.77	4.9902	4
21	B10	19.00815189	-98.20193065	1.3531	0.74	3.1252	4
22	B11	18.99300267	-98.20153233	5.7224	0.17	3.9201	2
23	B12	18.9964542	-98.18840436	7.5646	0.13	2.8216	2
24	B13	18.98775512	-98.17824509	1.4175	0.71	1.4175	4
25	B14	19.01935934	-98.17550125	1.2916	0.77	10.9495	4
26	C1	19.05165815	-98.19918168	9.5455	0.10	2.1609	Anómalo
27	C2	19.04047244	-98.21420075	2.4771	0.40	3.2951	3
28	C3	19.07378471	-98.2211526	3.4305	0.29	0.7432	1
29	C4	19.07721812	-98.22583162	0.7743	1.29	6.68335	5
30	C5	19.06661457	-98.23378391	2.4771	0.40	3.7397	3
31	C6	19.05282485	-98.2303493	1.485	0.67	3.8252	4
32	C7	19.08380192	-98.16215345	0.4431	2.26	2.2603	5
33	C8	19.09430317	-98.16276618	0.7391	1.35	1.9731	1
34	C9	19.08569503	-98.18289307	1.1768	0.85	2.2159	4
35	C10	19.09052057	-98.20322698	1.2916	0.77	1.8385	4
36	C11	19.04535862	-98.14732939	1.3531	0.74	1.86535	4
37	C12	19.0663492	-98.17121538	0.8498	1.18	2.3084	5
38	C13	19.08931549	-98.18970379	1.1768	0.85	1.57775	1
39	C14	19.04661447	-98.20840862	0.5591	1.79	1.5446	5
40	MUSEO	19.05754603	-98.18216668	3.7649	0.27	5.7434	2
41	TV3	19.05665386	-98.22886525	2.1544	0.46	4.5121	Anómalo
42	CAROLINO	19.04208936	-98.19392916	1.8738	0.53	3.64145	Anómalo
43	CONALEP	19.0674218	-98.15587473	0.5094	1.96	4.4359	5
44	CFE	19.05636244	-98.20220893	4.3288	0.23	4.08805	Anómalo
45	CIVIL	18.99963607	-98.20246497	1.8738	0.53	4.4612	4
46	MISSOURI	18.97907968	-98.21034513	1.3531	0.74	6.41595	4
47	ARTURO	19.00000941	-98.25391301	1.0723	0.93	3.68605	Anómalo
48	HUGO	19.05529163	-98.10660986	4.132	0.24	3.6481	Anómalo
49	HOTEL	19.0492505	-98.19407284	0.5591	1.79	5.37815	4

**HERNÁNDEZ ESTRADA, ET AL., 2013**

<b>NÚMERO</b>	<b>Punto</b>	<b>Latitud</b>	<b>Longitud</b>	<b>Frecuencia [Hz]</b>	<b>Periodo [s]</b>	<b>Amplitud</b>	<b>Familia</b>
1	P1	18.98122	-98.2737	0.8902	1.12	2.93704	3
2	P2	18.96545	-98.2604	4.7508	0.21	2.88956	2
3	P3	18.9802	-98.2537	0.3199	3.13	5.00469	5
4	P4	18.9698	-98.2396	4.977	0.20	1.60214	2
5	P5	18.99443	-98.2427	0.5337	1.87	3.41515	5
6	P6	18.96523	-98.2159	2.7186	0.37	3.32634	3
7	P7	18.98555	-98.2255	1.3531	0.74	6.54497	4
8	P8	18.96861	-98.1858	1.8738	0.53	3.88819	4
9	P9	18.99177	-98.214	5.9948	0.17	5.92328	2
10	P10	18.98276	-98.1959	0.3054	3.27	16.7252	5
11	P11	19.0066	-98.237	4.977	0.20	2.42399	2
12	P12	19.01422	-98.2686	3.2746	0.31	2.14	1
13	P13	19.01576	-98.2306	0.3199	3.13	5.0693	5
14	P14	19.01794	-98.2468	0.4037	2.48	9.392	5
15	P15	19.03916	-98.2471	1.1233	0.89	1.61412	4
16	P16	19.03874	-98.262	4.132	0.24	2.33887	2
17	P17	19.04954	-98.2389	5.4623	0.18	2.55182	2
18	P18	19.04906	-98.2796	0.8111	1.23	3.73007	3
19	P19	19.06787	-98.2406	0.4037	2.48	5.57289	5
20	P20	19.07651	-98.2779	10	0.10	1	1
21	P21	19.00981	-98.1873	1.5557	0.64	1.48605	1
22	P23	19.0131	-98.1951	0.3678	2.72	12.4783	5
23	P24	19.01766	-98.2187	1.4175	0.71	2.31438	2
24	P25	19.01962	-98.2058	1.4175	0.71	4.92341	3
25	P26	19.02805	-98.2207	1.4175	0.71	2.56348	4
26	P27	19.02908	-98.2036	2.7186	0.37	4.51404	3
27	P28	19.03469	-98.2265	4.7508	0.21	2.78614	2
28	P29	19.03638	-98.2031	0.5094	1.96	3.30149	5
29	P30	19.04624	-98.2267	0.4229	2.36	4.50236	3
30	P31	19.13497	-98.2227	1.2329	0.81	7.26202	3
31	P32	19.11495	-98.2573	0.4229	2.36	4.3474	5
32	P33	19.10647	-98.2455	0.8498	1.18	3.21078	5
33	P34	19.0981	-98.2544	0.5094	1.96	5.28915	5
34	P35	19.11039	-98.2049	1.2329	0.81	15.3181	4
35	P36	19.09317	-98.2358	1.2329	0.81	4.79986	5
36	P37	19.09887	-98.1892	1.2329	0.81	4.41169	4
37	P38	19.07751	-98.2129	0.977	1.02	2.50585	5
38	P39	19.09653	-98.2051	1.2329	0.81	4.74748	4
39	P40	19.08645	-98.2119	0.8902	1.12	4.3189	5

40	P41	19.0438	-98.1198	1.4175	0.71	4.34596	4
41	P42	19.02927	-98.1403	2.9837	0.34	4.06068	3
42	P43	19.06201	-98.1325	1.2916	0.77	4.66596	4
43	P45	19.07911	-98.1371	0.5094	1.96	4.17433	5
44	P46	19.07328	-98.1743	0.6136	1.63	3.84436	5
45	P47	19.0863	-98.162	0.3678	2.72	4.93615	5
46	P48	19.0687	-98.1962	1.5557	0.64	4.64256	4
47	P50	19.07902	-98.1936	1.5557	0.64	6.45884	4
48	P52	19.04521	-98.1825	0.6136	1.63	8.77855	5
51	P57	19.04123	-98.2137	1.0235	0.98	2.40818	5
52	P58	19.0653	-98.221	0.4229	2.36	4.19221	5
53	P60	19.05533	-98.227	1.6298	0.61	6.91346	4

### LERMO, OVANDO, & LIMAYMANTA, 2008

NÚMERO	Punto	Latitud	Longitud	Frecuencia [hz]	Periodo [s]	Amplitud	Familia
1	A59	19.05442395	-98.20436873	1.1768	0.85	1.57775	1
2	A14	19.05364364	-98.20483739	0.5591	1.79	1.5446	5
3	A13	19.052827	-98.205286	0.78	1.28	2.29	1
4	A12	19.052099	-98.205679	0.44	2.27	5.02	5
5	A11	19.0513683	-98.2060413	5.47	0.18	2.18	1
6	A10	19.05059596	-98.20642888	0.83	1.20	2.88	5
7	A9	19.04973432	-98.20685916	0.54	1.85	6.53	5
8	A8	19.04883072	-98.2073631	0.59	1.69	3.42	5
9	A7	19.04813923	-98.2077815	0.6	1.67	3.8	5
10	A6	19.04733951	-98.20821648	0.44	2.27	4.07	5
11	A5	19.04669585	-98.20855227	0.88	1.14	2.33	5
12	A3	19.04575258	-98.20904393	0.88	1.14	1.42	1
13	A2	19.04512001	-98.20937865	0.98	1.02	1.34	1
14	A1	19.04435791	-98.20999129	0.73	1.37	1.09	1
15	L47	19.04363099	-98.21041072	6.05	0.17	1.1	1
16	L46	19.04285563	-98.21088049	5.66	0.18	0.37	1
17	A58	19.05443417	-98.20264391	0.8902	1.12	2.93704	3
18	A60	19.05366379	-98.20305555	4.7508	0.21	2.88956	2
19	A15	19.05291232	-98.2035464	0.3199	3.13	5.00469	5
20	A16	19.05215277	-98.2039729	4.977	0.20	1.60214	2
21	A17	19.05139181	-98.20441548	0.5337	1.87	3.41515	5
22	A18	19.05064756	-98.20483822	2.7186	0.37	3.32634	3
23	A19	19.04988357	-98.20529601	1.3531	0.74	6.54497	4
24	A20	19.04915661	-98.20570408	1.8738	0.53	3.88819	4
25	A21	19.04827834	-98.20624511	5.9948	0.17	5.92328	2

26	A22	19.04751226	-98.2066833	0.3054	3.27	16.7252	5
27	A23	19.04714989	-98.20687935	4.977	0.20	2.42399	2
28	A24	19.04674578	-98.20712187	3.2746	0.31	2.14	1
29	A25	19.04606802	-98.20751633	0.3199	3.13	5.0693	5
30	A4	19.04594188	-98.20827598	0.4037	2.48	9.392	5
31	A26	19.04526151	-98.20799473	1.1233	0.89	1.61412	4
32	A27	19.04453762	-98.20845142	4.132	0.24	2.33887	2
33	A28	19.04377072	-98.2088714	5.4623	0.18	2.55182	2
34	L48	19.04299446	-98.20928088	0.8111	1.23	3.73007	3
35	L45	19.04223525	-98.20969908	0.4037	2.48	5.57289	5
36	A57	19.05365201	-98.20111721	10	0.10	1	1
37	A61	19.05290024	-98.20155176	1.5557	0.64	1.48605	1
38	A41	19.05212877	-98.20199964	0.3678	2.72	12.4783	5
39	A40	19.05134994	-98.2024561	1.4175	0.71	2.31438	2
40	A39	19.05061823	-98.20286761	1.4175	0.71	4.92341	3
41	A38	19.04988274	-98.20330788	1.4175	0.71	2.56348	4
42	A37	19.04910107	-98.20377646	2.7186	0.37	4.51404	3
43	A36	19.04835113	-98.20423752	4.7508	0.21	2.78614	2
44	A35	19.04753965	-98.20471795	0.5094	1.96	3.30149	5
45	A34	19.04676289	-98.20515129	0.4229	2.36	4.50236	3
46	A33	19.04601203	-98.20559724	1.2329	0.81	7.26202	3
47	A32	19.04530712	-98.20602415	0.4229	2.36	4.3474	5
48	A31	19.04454227	-98.20644853	0.8498	1.18	3.21078	5
49	A30	19.04377105	-98.20690443	0.5094	1.96	5.28915	5
50	A29	19.0430004	-98.20733492	1.2329	0.81	15.3181	4
51	L49	19.04225736	-98.20779174	1.2329	0.81	4.79986	5
52	L44	19.04149207	-98.20822437	1.2329	0.81	4.41169	4
53	A56	19.05285758	-98.19958197	0.977	1.02	2.50585	5
54	A55	19.05211184	-98.20004293	6.5793	0.15	2.8806	5
55	A54	19.05135337	-98.20047832	6.5793	0.15	4.2236	2
56	A53	19.05057434	-98.2009564	5.7224	0.17	3.4817	2
57	A52	19.04985526	-98.20138257	1.2916	0.77	3.3967	4
58	A51	19.0490775	-98.20183797	5.7224	0.17	3.9201	2
59	A50	19.0483319	-98.20228999	1.2916	0.77	3.8745	4
60	A49	19.04761012	-98.20270201	6.2803	0.16	3.0639	2
61	A48	19.04674745	-98.20319924	1.2916	0.77	17.3589	4
62	A47	19.04598827	-98.20363896	1.2916	0.77	4.9902	4
63	A46	19.04521149	-98.20408342	1.3531	0.74	3.1252	4
64	A45	19.04448556	-98.20448502	5.7224	0.17	3.9201	2
65	A44	19.04372544	-98.20497413	7.5646	0.13	2.8216	2
66	A43	19.04297719	-98.20541	1.4175	0.71	1.4175	4



<b>67</b>	A42	19.04219426	-98.20584981	1.2916	0.77	10.9495	4
<b>68</b>	L50	19.04145428	-98.20629752	9.5455	0.10	2.1609	Anómalo
<b>69</b>	L43	19.04067486	-98.20677765	2.4771	0.40	3.2951	3
<b>70</b>	L58	19.05205638	-98.19801857	3.4305	0.29	0.7432	1
<b>71</b>	L59	19.05131621	-98.19846612	0.7743	1.29	6.68335	5
<b>72</b>	L13	19.0505734	-98.19891529	2.4771	0.40	3.7397	3
<b>73</b>	L12	19.04978661	-98.19938007	1.485	0.67	3.8252	4
<b>74</b>	L11	19.04903097	-98.19983008	0.4431	2.26	2.2603	5
<b>75</b>	L10	19.04833231	-98.20026407	0.7391	1.35	1.9731	1
<b>76</b>	L9	19.04753206	-98.20072655	1.1768	0.85	2.2159	4
<b>77</b>	L8	19.04679122	-98.20116036	1.2916	0.77	1.8385	4
<b>78</b>	L7	19.04598018	-98.20164306	1.3531	0.74	1.86535	4
<b>79</b>	L6	19.04522757	-98.20206351	0.8498	1.18	2.3084	5
<b>80</b>	L5	19.04445536	-98.20254016	1.1768	0.85	1.57775	1
<b>81</b>	L4	19.04374961	-98.20297051	0.5591	1.79	1.5446	5
<b>82</b>	L3	19.04295409	-98.20343607	3.7649	0.27	5.7434	2
<b>83</b>	L2	19.0422604	-98.2038566	2.1544	0.46	4.5121	Anómalo
<b>84</b>	L1	19.04145583	-98.20431059	1.8738	0.53	3.64145	Anómalo
<b>85</b>	L51	19.04069401	-98.20479883	0.5094	1.96	4.4359	5
<b>86</b>	L42	19.03991506	-98.20524563	4.3288	0.23	4.08805	Anómalo
<b>87</b>	L57	19.05132159	-98.19651844	1.8738	0.53	4.4612	4
<b>88</b>	L60	19.05054387	-98.19700709	1.3531	0.74	6.41595	4
<b>89</b>	L14	19.04981164	-98.1974346	1.0723	0.93	3.68605	Anómalo
<b>90</b>	L15	19.04911701	-98.19790803	4.132	0.24	3.6481	Anómalo
<b>91</b>	L16	19.04828579	-98.1983461	0.5591	1.79	5.37815	4
<b>92</b>	L17	19.04752962	-98.19879848	1.4175	0.71	4.34596	4
<b>93</b>	L18	19.04674714	-98.1992318	2.9837	0.34	4.06068	3
<b>94</b>	L19	19.04606282	-98.19964201	1.2916	0.77	4.66596	4
<b>95</b>	L20	19.04527404	-98.20016666	0.5094	1.96	4.17433	5
<b>96</b>	L21	19.04452306	-98.20059675	0.6136	1.63	3.84436	5
<b>97</b>	L22	19.04379411	-98.20102684	0.3678	2.72	4.93615	5
<b>98</b>	L23	19.04300735	-98.20149748	1.5557	0.64	4.64256	4
<b>99</b>	L24	19.04221853	-98.20196376	1.5557	0.64	6.45884	4
<b>100</b>	L25	19.04145465	-98.20241929	0.6136	1.63	8.77855	5
<b>101</b>	L26	19.0407262	-98.20283482	1.0235	0.98	2.40818	5
<b>102</b>	L52	19.0399475	-98.20333636	0.4229	2.36	4.19221	5
<b>103</b>	L41	19.03916524	-98.2037978	1.6298	0.61	6.91346	4
<b>104</b>	L56	19.05065192	-98.19507903	1.485	0.67	3.6483	3
<b>105</b>	L61	19.04974222	-98.19555053	2.3645	0.42	2.8113	1
<b>106</b>	L39	19.04902767	-98.19590195	1.4175	0.71	3.2105	3
<b>107</b>	L38	19.04828215	-98.19638048	4.977	0.20	6.856	2

<b>108</b>	L37	19.04749456	-98.19686967	3.5938	0.28	3.8346	3
<b>109</b>	L36	19.04672136	-98.19729054	4.977	0.20	5.0831	3
<b>110</b>	L35	19.0459777	-98.19772758	1.2916	0.77	2.5406	4
<b>111</b>	L34	19.04522009	-98.19817052	1.2329	0.81	2.9119	3
<b>112</b>	L33	19.0444589	-98.19863057	1.3531	0.74	4.0975	4
<b>113</b>	L32	19.04367534	-98.19909721	5.9948	0.17	3.1798	2
<b>114</b>	L31	19.04292951	-98.19954205	8.6975	0.11	2.8544	4
<b>115</b>	L30	19.04218472	-98.19996545	7.5646	0.13	2.8216	2
<b>116</b>	L29	19.04137332	-98.20041081	1.4175	0.71	1.4175	4
<b>117</b>	L28	19.04064721	-98.20084666	1.2916	0.77	10.9495	4
<b>118</b>	L27	19.03989028	-98.20130066	9.5455	0.10	2.1609	Anómalo
<b>119</b>	L53	19.03912485	-98.20173571	2.4771	0.40	3.2951	3
<b>120</b>	L40	19.03832174	-98.2021995	3.4305	0.29	0.7432	1
<b>121</b>	L55	19.04980396	-98.19358484	0.7743	1.29	6.68335	5
<b>122</b>	I1	19.04904512	-98.19405587	2.4771	0.40	3.7397	3
<b>123</b>	I2	19.04831186	-98.19448462	1.485	0.67	3.8252	4
<b>124</b>	I3	19.04752104	-98.19493619	0.4431	2.26	2.2603	5
<b>125</b>	I4	19.04677076	-98.19533065	0.7391	1.35	1.9731	1
<b>126</b>	I5	19.04600248	-98.19579042	1.1768	0.85	2.2159	4
<b>127</b>	I6	19.04521073	-98.19626103	1.2916	0.77	1.8385	4
<b>128</b>	I7	19.04447617	-98.196692	1.3531	0.74	1.86535	4
<b>129</b>	I8	19.0437283	-98.19714058	0.8498	1.18	2.3084	5
<b>130</b>	I9	19.04295944	-98.19757372	1.1768	0.85	1.57775	1
<b>131</b>	I10	19.04217756	-98.19798776	0.5591	1.79	1.5446	5
<b>132</b>	I11	19.04139282	-98.19843733	3.7649	0.27	5.7434	2
<b>133</b>	I12	19.04059524	-98.19888783	2.1544	0.46	4.5121	Anómalo
<b>134</b>	I13	19.03985847	-98.19930616	1.8738	0.53	3.64145	Anómalo
<b>135</b>	I14	19.03908761	-98.19972419	1.4175	0.71	4.34596	4
<b>136</b>	I15	19.03835043	-98.20018144	2.9837	0.34	4.06068	3
<b>137</b>	I16	19.03756344	-98.20064123	1.2916	0.77	4.66596	4
<b>138</b>	L54	19.04902895	-98.19208172	0.5094	1.96	4.17433	5
<b>139</b>	I32	19.04824927	-98.19254699	0.6136	1.63	3.84436	5
<b>140</b>	I31	19.04745936	-98.19301936	0.3678	2.72	4.93615	5
<b>141</b>	I30	19.04673919	-98.19342636	1.5557	0.64	4.64256	4
<b>142</b>	I29	19.04598506	-98.19385156	1.5557	0.64	6.45884	4
<b>143</b>	I28	19.0452413	-98.19427684	0.6136	1.63	8.77855	5
<b>144</b>	I27	19.04441849	-98.19475772	1.0235	0.98	2.40818	5
<b>145</b>	I26	19.04366523	-98.19519015	0.4229	2.36	4.19221	5
<b>146</b>	I25	19.04293106	-98.19564574	1.6298	0.61	6.91346	4
<b>147</b>	I24	19.0421882	-98.19608911	1.4175	0.71	4.34596	4
<b>148</b>	I23	19.04136516	-98.19654346	2.9837	0.34	4.06068	3

<b>149</b>	I22	19.04064301	-98.19696066	1.2916	0.77	4.66596	4
<b>150</b>	I21	19.03988611	-98.19742638	0.5094	1.96	4.17433	5
<b>151</b>	I20	19.03910479	-98.19790579	0.6136	1.63	3.84436	5
<b>152</b>	I19	19.03837924	-98.19832411	0.3678	2.72	4.93615	5
<b>153</b>	I18	19.03764049	-98.19876877	1.5557	0.64	4.64256	4
<b>154</b>	I17	19.03682268	-98.19921684	1.5557	0.64	6.45884	4
<b>155</b>	p155	19.03605888	-98.19970421	0.6136	1.63	8.77855	5
<b>156</b>	p156	19.0352925	-98.20015242	1.0235	0.98	2.40818	5
<b>157</b>	p157	19.03460254	-98.20054923	0.4229	2.36	4.19221	5
<b>158</b>	p158	19.03374001	-98.20106953	1.6298	0.61	6.91346	4
<b>159</b>	I33	19.04666378	-98.19149792	1.485	0.67	3.6483	3
<b>160</b>	I34	19.04587199	-98.19159883	2.3645	0.42	2.8113	1
<b>161</b>	I35	19.04514987	-98.19222137	1.4175	0.71	3.2105	3
<b>162</b>	I36	19.04442008	-98.1927307	4.977	0.20	6.856	2
<b>163</b>	I37	19.04363453	-98.19320722	3.5938	0.28	3.8346	3
<b>164</b>	I38	19.04286493	-98.1936777	4.977	0.20	5.0831	3
<b>165</b>	I39	19.0421268	-98.19414185	1.2916	0.77	2.5406	4
<b>166</b>	I40	19.04165317	-98.19505582	1.2329	0.81	2.9119	3
<b>167</b>	I41	19.0410783	-98.19603279	1.3531	0.74	4.0975	4
<b>168</b>	I50	19.04317641	-98.19225513	5.9948	0.17	3.1798	2
<b>169</b>	I49	19.04228015	-98.19254457	8.6975	0.11	2.8544	4
<b>170</b>	I48	19.04155988	-98.19301296	5.9948	0.17	5.92328	2
<b>171</b>	I47	19.0407144	-98.19395364	0.3054	3.27	16.7252	5
<b>172</b>	I46	19.04028532	-98.19486386	4.977	0.20	2.42399	2
<b>173</b>	I45	19.03982754	-98.19540331	3.2746	0.31	2.14	1
<b>174</b>	I44	19.03918987	-98.19596716	0.3199	3.13	5.0693	5
<b>175</b>	I43	19.03837302	-98.19645425	0.4037	2.48	9.392	5
<b>176</b>	I42	19.03760412	-98.19692759	1.1233	0.89	1.61412	4
<b>177</b>	p177	19.03689873	-98.19733565	4.132	0.24	2.33887	2
<b>178</b>	p178	19.03611546	-98.19780076	5.4623	0.18	2.55182	2
<b>179</b>	p179	19.03540252	-98.1983428	0.8111	1.23	3.73007	3
<b>180</b>	p180	19.03457618	-98.19879688	0.4037	2.48	5.57289	5
<b>181</b>	p181	19.03389169	-98.19924218	10	0.10	1	1
<b>182</b>	p182	19.03313358	-98.19988791	1.5557	0.64	1.48605	1
<b>183</b>	p183	19.03315344	-98.19942719	0.5094	1.96	4.17433	5
<b>184</b>	p184	19.03283261	-98.19928715	0.6136	1.63	3.84436	5
<b>185</b>	p185	19.03309335	-98.19791209	0.3678	2.72	4.93615	5
<b>186</b>	p186	19.03245616	-98.19664015	1.5557	0.64	4.64256	4
<b>187</b>	p187	19.03328331	-98.19621271	1.5557	0.64	6.45884	4
<b>188</b>	p188	19.03402706	-98.19574055	0.6136	1.63	8.77855	5
<b>189</b>	p189	19.03478208	-98.19531218	1.0235	0.98	2.40818	5

<b>190</b>	I72	19.03553933	-98.1948542	0.4229	2.36	4.19221	5
<b>191</b>	I71	19.03628488	-98.19443981	1.6298	0.61	6.91346	4
<b>192</b>	I70	19.03742931	-98.19457328	0.8902	1.12	2.93704	3
<b>193</b>	I69	19.03685278	-98.19342173	4.7508	0.21	2.88956	2
<b>194</b>	I68	19.03767715	-98.1931002	0.3199	3.13	5.00469	5
<b>195</b>	I67	19.03852083	-98.1927701	4.977	0.20	1.60214	2
<b>196</b>	I66	19.03891733	-98.19346242	0.5337	1.87	3.41515	5
<b>197</b>	I65	19.03956547	-98.19307952	2.7186	0.37	3.32634	3
<b>198</b>	I64	19.04019191	-98.19276435	1.3531	0.74	6.54497	4