

Ing. Juan Manuel  
Martínez Rivera

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE SITIO DE SISMOS  
CORTICALES EN EL EJE NEOVOLCÁNICO

2022



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

## ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE SITIO DE SISMOS CORTICALES EN EL EJE NEOVOLCÁNICO

Tesis

Que como parte de los requisitos para  
obtener el Grado de

Maestría en Ciencias (L.T. Estructuras)

Presenta:

Ing. Juan Manuel Martínez Rivera

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Querétaro, Qro. Abril de 2022



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias (Estructuras)

ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE SITIO DE SISMOS CORTICALES EN EL EJE  
NEOVOLCÁNICO

**Tesis**

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de  
Maestría en Ciencias (L.T. Estructuras)

**Presenta:**

Ing. Juan Manuel Martínez Rivera

**Dirigido por:**

M. en C. Luis Francisco Pérez Moreno

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Presidente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Secretario

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Vocal

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Suplente

Dr. Quetzalcóatl Rodríguez Pérez

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Abril de 2022

México

## RESUMEN

Alrededor del mundo se han realizado diversas investigaciones sobre los efectos de sitio. Dichos estudios han permitido explicar las amplificaciones del movimiento del terreno observadas en algunos sitios durante un evento sísmico. El Eje Neovolcánico es una zona localizada en el centro de México, que tiene una frecuencia relativamente baja de ocurrencia de sismos. No obstante, en la literatura se tienen antecedentes de eventos de gran magnitud, que, si bien tienen un periodo de retorno largo, representan un riesgo latente para las poblaciones de la zona. Con excepción de la Ciudad de México, la normativa existente sobre diseño sísmico de estructuras y el impacto de los efectos de sitio en el Eje Neovolcánico es casi nula o no contempla las condiciones particulares del terreno. Por consiguiente, con el fin de evaluar la respuesta del sitio y encontrar posibles amplificaciones, se obtuvieron registros sísmicos y de ruido ambiental de las redes sismométricas del Servicio Sismológico Nacional, del Centro de Geociencias y del Instituto de Ingeniería de la UNAM, del CENAPRED, y también de redes temporales como MASE, MARS, CODEX y GECO. A cada registro se le realizó un análisis mediante la técnica HVSR, y en los casos donde fue viable se aplicó la técnica SSR. Para comparar los resultados se obtuvieron mapas de contorno en términos de la frecuencia fundamental  $f_0$ , el factor de amplificación  $A_0$  y la velocidad promedio de la onda de corte  $V_{S30}$ . Los resultados obtenidos muestran una amplia variación de la respuesta de sitio en el Eje Neovolcánico, en algunas zonas las curvas HVSR presentan picos claros definidos, donde fue posible identificar  $f_0$ , por otra parte, hubo sitios en los cuales las curvas eran prácticamente planas, sin contrastes de impedancia significativos. Comparando los resultados del análisis de registros sísmicos contra los del ruido ambiental, se encontraron diferencias muy marcadas en una cuarta parte de ellos. El  $A_0$  obtenido por medio de la técnica HVSR se desvía de la amplificación real, por lo tanto, los valores adquiridos solo se utilizaron para estimar  $f_0$ . Los mapas de contorno muestran la variación de los efectos de sitio a gran escala.

**(Palabras Clave:** efectos de sitio, Eje Neovolcánico, sismos corticales, ruido ambiental, análisis HVSR, análisis SSR)

## SUMMARY

Different investigations about site effects have been conducted around the world. These studies have made it possible to explain the amplification of the ground motion observed in some places during a seismic event. The Trans-Mexican Volcanic Belt is an area located in central Mexico, which has a relatively low frequency of earthquakes. However, in the literature, there are historical records of major earthquakes, which, although they have a long return period, represent a latent risk for the populations of the area. Except for Mexico City, the existing regulations on seismic design of structures and the impact of site effects on the Trans-Mexican Volcanic Belt are almost nil or do not contemplate the particular conditions of the ground. Consequently, in order to evaluate the site response and find possible amplifications, seismic and ambient noise records were obtained from the seismometric networks of the Servicio Sismológico Nacional, Centro de Geociencias and Instituto de Ingeniería de la UNAM, CENAPRED, and also temporary networks such as MASE, MARS, CODEX and GECO. An analysis was performed on each record using the HVSR technique, and in the cases where it was feasible, the SSR technique was applied. To compare the results, contour maps were obtained in terms of the fundamental frequency  $f_0$ , the amplification factor  $A_0$  and the velocity of the shear wave  $V_{S30}$ . The results showed a wide variation of the site response in the Trans-Mexican Volcanic Belt, in some areas the HVSR curves present clear defined peaks, where it was possible to identify  $f_0$ , on the other hand, there were sites in which the curves were practically flat, without significant impedance contrasts. Comparing the results of the analysis of seismic records against those of ambient noise, very marked differences were found in a quarter of them. The  $A_0$  obtained through the HVSR technique deviates from the real amplification, therefore, the acquired values were only used to estimate  $f_0$ . Contour maps show the variation of site effects on a large scale.

**(Key words:** site effects, Trans-Mexican Volcanic Belt, crustal earthquakes, ambient noise, HVSR analysis, SSR analysis)

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por haberme brindado su confianza y enseñanza en mi formación como Ingeniero Civil.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por haberme concedido el financiamiento para concluir mis estudios de maestría.

Al Servicio Sismológico Nacional, por haberme brindado toda la información de registros sísmicos necesarios para poder realizar este trabajo de investigación.

Al Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Juriquilla, por proporcionarme los sismogramas registrados por la estación de Juriquilla y Tequisquiapan.

Al Centro de Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y al Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM), por facilitarme el acceso a los acelerogramas registrados por sus estaciones sismológicas.

Al Dr. Luis Francisco Pérez Moreno, por haberme guiado en este andar desde el principio, por resolver mis dudas e inquietudes a lo largo del camino, por ayudarme a tener una mejor comprensión global sobre el tema y sobre todo por su gran amistad.

A los Dres. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández, Jaime Moisés Horta Rangel, Quetzalcóatl Rodríguez Pérez y a la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por sus valiosas recomendaciones para concluir con este trabajo de tesis en tiempo y forma.

A mis padres, por darme su apoyo incondicional durante toda mi vida, por su amor, por sus sabios consejos, y por alentarme a ser mejor como persona y como profesional.

A mis hermanos, por motivarme en los malos momentos e incitarme a tener una mejor preparación académica.

A mis compañeros, Zirahuén, René, Damián, Eddie, Alán y Alonso, por compartir sus conocimientos y habilidades durante este ciclo.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. JUSTIFICACIÓN.....	7
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	8
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>9</b>
2.1. ESTADO DEL ARTE.....	9
2.2. CONTRASTES DE IMPEDANCIA.....	12
2.3. RUIDO AMBIENTAL.....	13
2.4. DISTRIBUCIÓN DE SUELOS EN ALGUNAS CIUDADES DEL EJE NEOVOLCÁNICO.....	14
2.5. MÉTODO DE RELACIÓN ESPECTRAL ESTÁNDAR (SSR).....	16
2.6. MÉTODO DE RELACIÓN ESPECTRAL VERTICAL A HORIZONTAL (HVSR).....	17
2.7. OTRAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS.....	19
2.8. INTERPOLACIÓN DE KRIGGING.....	21
2.9. FUNCIÓN DE KONNO-OMACHI.....	22
2.10. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE A 30 M DE PROFUNDIDAD $V_{S30}$ .....	23
<b>3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....</b>	<b>25</b>
3.1. OBJETIVO GENERAL:.....	25
3.2. OBJETIVOS PARTICULARES:.....	25
<b>4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>26</b>
4.1. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE REGISTROS INSTRUMENTALES DE SISMOS CORTICALES OCURRIDOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	26
4.1.1. Obtención de base de datos de sismos corticales ocurridos en el Eje Neovolcánico.....	27
4.1.2. Obtención de base de datos de registros instrumentales de sismos corticales ocurridos en el Eje Neovolcánico.....	27
4.1.3. Revisión y exclusión de registros obtenidos.....	32
4.2. DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO EN LA ZONA DE ESTUDIO MEDIANTE LA TÉCNICA HVSR (HORIZONTAL-TO-VERTICAL SPECTRAL RATIO).....	33
4.2.1. Procesamiento de registros de sismos.....	33
4.2.2. Procesamiento de registros de ruido ambiental.....	34

4.2.3.	Identificación de la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) y el factor de amplificación ( $A_0$ ).	35
4.3.	DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO EN LA ZONA DE ESTUDIO MEDIANTE LA TÉCNICA SSR (STANDARD SPECTRAL RATIO).	41
4.3.1.	Identificación de registros a analizar.	42
4.3.2.	Procesamiento de registros.	42
4.3.3.	Identificación de la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) y el factor de amplificación ( $A_0$ ).	44
4.3.4.	Comparación de resultados.	44
4.4.	ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LOS EFECTOS DE SITIO EN LA ZONA DE ESTUDIO A TRAVÉS DE MAPAS DE CONTORNO.	44
4.4.1.	Obtención de mapas de contorno.	45
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.</b>	<b>47</b>
5.1.	ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE REGISTROS INSTRUMENTALES DE SISMOS CORTICALES OCURRIDOS EN LA ZONA DE ESTUDIO.	47
5.2.	DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO EN LA ZONA DE ESTUDIO MEDIANTE LA TÉCNICA HVSR (HORIZONTAL-TO-VERTICAL SPECTRAL RATIO).	50
5.3.	DETERMINACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO EN LA ZONA DE ESTUDIO MEDIANTE LA TÉCNICA SSR (STANDARD SPECTRAL RATIO).	65
5.4.	OBTENCIÓN DE MAPAS DE CONTORNO PARA EL ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LOS EFECTOS DE SITIO EN LA ZONA DE ESTUDIO.	66
5.5.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON ESTUDIOS ANÁLOGOS EN OTRAS PARTES DEL MUNDO.	74
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	<b>76</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO A. REGISTROS SÍSMICOS ANALIZADOS EN ESTE TRABAJO, UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS.</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXO B. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO OBTENIDAS PARA CADA SITIO.</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXO C. RELACIÓN DE RESULTADOS CON LA GEOLOGIA DEL EJE NEOVOLCÁNICO.</b>	<b>101</b>
	<b>ANEXO D. ANÁLISIS DE DATOS POR PARTES.</b>	<b>102</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Clasificación del sitio en base a la $V_{S30}$ , (Ahn et al., 2021). .....	24
Tabla 4-1 Definiciones de parámetros. ....	36
Tabla 5-1 Base de datos de sismos corticales registrados en la República Mexicana. ....	47
Tabla A-1 Registros analizados para la red del Servicio Sismológico Nacional. ...	90
Tabla A-2 Registros analizados para la red MASE. ....	94
Tabla A-3 Registros analizados para la red MARS. ....	95
Tabla A-4 Registros analizados para la red CODEX. ....	95
Tabla A-5 Registros analizados para la red GECO. ....	95
Tabla A-6 Registros analizados para la red del Centro de Geociencias. ....	96
Tabla A-7 Registros analizados para la red CENAPRED. ....	97
Tabla A-8 Registros analizados para la red RAII-UNAM. ....	97
Tabla B-1 Frecuencia fundamental del suelo $f_0$ , factor de amplificación $A_0$ y velocidad de onda de corte $V_{S30}$ obtenidas. ....	99



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Mapa del Eje Neovolcánico. ....	3
Figura 1-2 Ubicación de epicentros de sismos destructivos ocurridos en el Eje Neovolcánico. ....	5
Figura 2-1 Propagación de onda de un estrato 1 a un estrato 2 (Stein & Wysession, 2005). ....	13
Figura 2-2 Relación espectral para la zona TYF, Tesalónica, Grecia (Francisco J. Chávez-García & Raptakis, 2017).....	17
Figura 2-3 Modelo HVSR para Irán, Yaghmaei-Sabegh y Hassani (2020). ....	19
Figura 4-1 Diagrama de flujo de la Metodología. ....	26
Figura 4-2 Sismograma registrado el 24 de diciembre del 2013 por la estación CDGU en el estado de Jalisco. ....	32
Figura 4-3 Ejemplo de curva H/V con un pico evidente, y además cumple con los 6 criterios ya citados (Bard et al., 2004). ....	36
Figura 4-4 Ejemplo de curva H/V con picos agudos de origen industrial (Bard et al., 2004). ....	37
Figura 4-5 Ejemplo de curva H/V con picos de baja frecuencia poco claros (Bard et al., 2004). ....	38
Figura 4-6 Ejemplo de curva H/V con múltiples picos (Bard et al., 2004). ....	39
Figura 4-7 Ejemplo de curva H/V con dos picos (Bard et al., 2004).....	39
Figura 4-8 Geología en el Eje Neovolcánico, Ferrari et al. (2005). ....	42
Figura 4-9 Generación de grid en programa Surfer 16. ....	46
Figura 4-10 Mapa de contorno obtenido en programa Surfer 16. ....	46
Figura 5-1 Localización de estaciones sismológicas utilizadas en este trabajo. ...	48
Figura 5-2 Localización de epicentros de eventos sísmicos analizados en este estudio. ....	49
Figura 5-3 Estaciones localizadas en la zona oeste del Eje Neovolcaánico. ....	51

Figura 5-4 Curvas promedio HVSR de la región oeste del Eje Neovolcánico. Línea azul H/V para registros sísmicos. Línea naranja H/V para registros de ruido ambiental. ....	53
Figura 5-5 Estaciones localizadas en la zona centro del Eje Neovolcánico.....	55
Figura 5-6 Curvas promedio HVSR de la región central del Eje Neovolcánico. Línea azul H/V para registros sísmicos. Línea naranja H/V para registros de ruido ambiental. ....	57
Figura 5-7 Estaciones localizadas en la zona del este central del Eje Neovolcánico. ....	58
Figura 5-8 Curvas promedio HVSR de la región este central del Eje Neovolcánico. Línea azul H/V para registros sísmicos. Línea naranja H/V para registros de ruido ambiental.....	61
Figura 5-9 Estaciones localizadas en la zona del este central del Eje Neovolcánico. ....	62
Figura 5-10 Curvas promedio HVSR de la región este central del Eje Neovolcánico. Línea azul H/V para registros sísmicos. Línea naranja H/V para registros de ruido ambiental.....	63
Figura 5-11 Curvas promedio HVSR y SSR para las estaciones OZST y SXVI. Línea verde H/V para registros sísmicos. Línea roja SSR para registros sísmicos.....	65
Figura 5-12 Mapa de contorno en función de $f_0$ , resultado del análisis de registros sísmicos. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones. ....	67
Figura 5-13 Mapa de contorno en función de $f_0$ , resultado del análisis de registros de ruido ambiental. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones. ....	68
Figura 5-14 Mapa de contorno en función de $A_0$ , resultado del análisis de registros sísmicos. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones. ....	69
Figura 5-15 Mapa de contorno en función de $A_0$ , resultado del análisis de registros de ruido ambiental. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones. ....	70
Figura 5-16 Mapa de contorno en función de $V_{S30}$ , resultado del análisis de registros sísmicos. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones. ....	71
Figura 5-17 Mapa de contorno en función de $V_{S30}$ , resultado del análisis de registros de ruido ambiental. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones. ....	71

Figura 5-18 Mapa de contorno en función de VS30, de acuerdo al modelo de (Spica et al., 2016).....	72
Figura 5-19 Mapa del Eje Neovolcánico, variación de VS30 de acuerdo a (U.S. Geological Survey, 2021).....	73
Figura 5-20 Mapa de contorno en función de $T_0$ , resultado del análisis de registros sísmicos. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones. ....	74
Figura C-1 Mapa geológico de la zona de estudio. Círculos: estaciones sismológicas. ....	101
Figura D-1 Graficas HVSR resultado del análisis por partes. Línea verde análisis del 50% al 60% de los datos. Línea roja análisis del 100% de los datos. ....	104

## 1. INTRODUCCIÓN

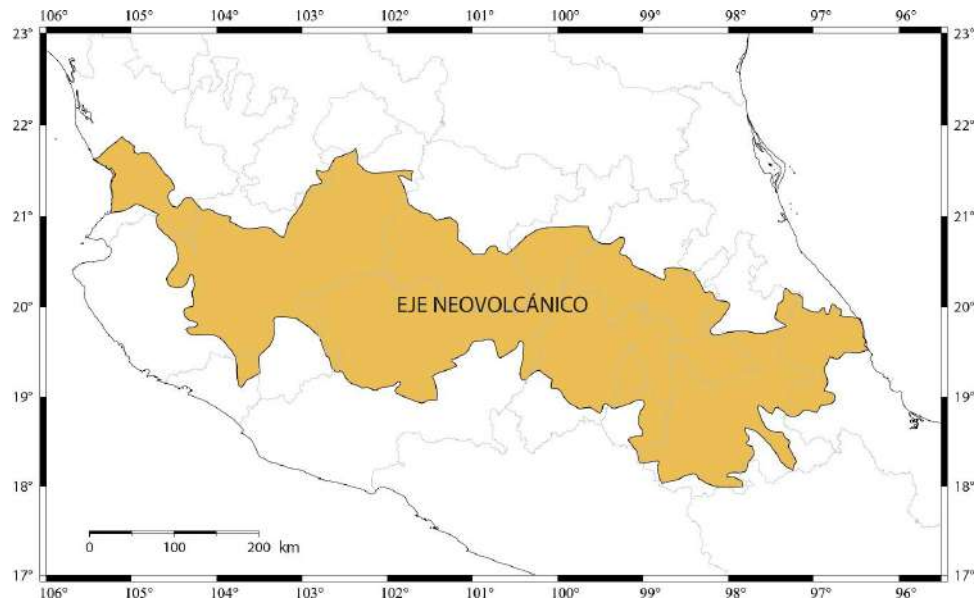
Los efectos de sitio se entienden como modificaciones en la amplitud, frecuencia y duración del movimiento del suelo durante un sismo producidas por las características de la estructura geológica (Francisco J. Chávez García & Montalva, 2014). De manera muy simplificada, los códigos de construcción normalmente incluyen medidas para tener en cuenta tal amplificación (Francisco J. Chávez García & Raptakis, 2017). Los efectos de sitio toman gran importancia en la evaluación del riesgo sísmico, debido a que son capaces de incrementar el peligro en gran cantidad de ciudades localizadas en cuencas sedimentarias como Cd. de México, México; Tokio, Japón; Los Ángeles, Estados Unidos, etc. (Perron et al., 2018). En terremotos como el de 1985 en la Ciudad de México o el de 1989 en Loma Prieta los efectos de sitio han tenido gran impacto dadas las condiciones geológicas del terreno, al tratarse de sedimentos y no de rocas firmes (Sun et al., 2014). Mittal et al. (2013) reportaron amplificaciones en el movimiento del terreno durante el terremoto de 1985 en la Cd. de México, donde se presentaron efectos más severos respecto a sitios más cercanos al epicentro (Glinsky et al., 2019).

Los efectos de sitio asociados a las características geológicas y geotécnicas son los más destructivos, causados por contrastes de impedancia en el subsuelo, expresada como el producto de la densidad por la velocidad de propagación, donde las velocidades de propagación de onda de corte pueden ser con facilidad 5 veces mayor entre un depósito de suelo blando y un suelo rocoso. Por otra parte, los efectos de sitio producidos por la topografía causan una amplificación del movimiento debido a la geometría irregular en la superficie del terreno, esta es mucho menor que la causada por diferencias mecánicas entre los materiales que componen el suelo, en este caso los factores de amplificación son difícilmente mayores a 2 (Francisco J. Chávez García & Montalva, 2014). Muchos códigos de diseño han medido los efectos de sitio con la velocidad media de la onda de corte en los primeros 30 m de suelo  $V_{S30}$  (Sun et al., 2014). Cuando se

trata con muchos sitios esta perspectiva es apropiada, pero cuando se evalúa un solo sitio se puede caer en el error, por lo tanto, es necesario utilizar diferentes tipos de mediciones y así obtener comparaciones con mayor grado de detalle entre los efectos de sitio observados y pronosticados. Frecuentemente datos de sismos o registros de ruido ambiental son utilizados para estimar la respuesta del sitio (Francisco J. Chávez García & Raptakis, 2017).

Para analizar los efectos de sitio las metodologías más utilizadas son la de relación espectral estándar (SSR, Standard Spectral Ratio) (Borcherdt, 1970) y de relación espectral horizontal a vertical (HVSr, Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio) (Yukata Nakamura, 1989). En 1970 Borcherdt propuso el método de la relación espectral estándar SSR (Zhang et al., 2018). En este método se evalúa exactamente la definición de efectos de sitio: relación de la amplificación del movimiento sísmico obtenida en un terreno sobre sedimentos respecto a la amplificación para el mismo evento en un sitio de referencia sobre roca (Francisco J. Chávez García & Montalva, 2014). El método de Nakamura (HVSr) se ha utilizado con diferentes fines, como estudios de fallas, cavidades, cuencas sedimentarias y para estimar la frecuencia fundamental de edificios (Mucciarelli & Gallipoli, 2001), sin embargo, esta técnica es utilizada especialmente para estudios de microzonificación en zonas con población densa donde otros métodos no son viables (Stanko et al., 2017).

El Eje Neovolcánico (Figura 1-1) es una zona sismogénica localizada en el centro de México (entre 18° 30' y 21° 30' N), cubre 160,000 m<sup>2</sup> en área y 1,000 km en longitud y su ancho oscila entre los 90 y 230 km (Ferrari et al. 2012). En esta región se localiza un grupo de volcanes alineados en una franja de oeste a este, desde Cabo Corrientes, Nayarit hasta Chiconquiaco, Veracruz (Escalante & Linaje, 2012).



**Figura 1-1 Mapa del Eje Neovolcánico.**

Dentro del eje Neovolcánico se encuentran ciudades como Querétaro, Guadalajara o Puebla que en los últimos años han tenido un gran crecimiento demográfico e industrial, de acuerdo a datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).

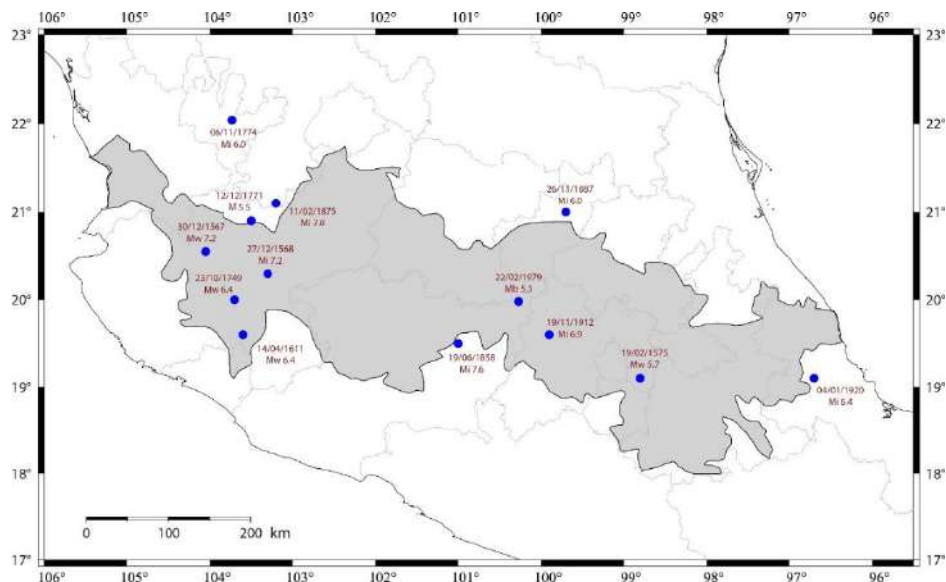
En esta zona se presentan sismos de tipo cortical, consecuencia de la activación de fallas geológicas. Estos eventos tienen profundidades que por lo común son menores a 15 km y mecanismos que indican fallas normales con algún movimiento lateral izquierdo, conforme a una dirección de esfuerzo compresivo mínimo NS (Zúñiga et al., 2017).

Varios sistemas de fallas activas interceptan el Eje, mayormente normales a este (Zúñiga et al., 2019). Por ejemplo, el sistema de fallas Taxco-Querétaro activo en la parte norte del Eje Neovolcánico y el sistema Morelia-Acambay, formado por fallas muy pronunciadas de hasta 500 m de altura (Szykaruk et al., 2004). La falla Colima-Tula (CTFZ) tiene una longitud de más de 450 km y cercana a los 50 km de ancho, su actividad influyó en la ocurrencia del sismo cortical de Acambay de 1912 (Langridge et al., 2013). El graben de Acambay se compone por

tres principales fallas, la falla Acambay-Tixmadejé, la falla Pastores y fallas al interior del graben. La primera es la falla principal del graben y tiene una longitud aproximada de 42 km, la longitud de la falla Pastores oscila entre 16 y 18 km formándose en la parte sur del Graben y con una longitud aproximada de 10 km las fallas intra-graben van de este a oeste cortando un volcán y la llanura del río Lerma (Langridge et al., 2000). Los sistemas de fallas mencionados, así como el graben de Acambay son elementos importantes que han contribuido a la ocurrencia de sismos en el Eje Neovolcánico, por ello es importante conocer algunas de sus características, además, se tienen registros de sismos destructivos asociados a estos sistemas de fallas.

A pesar de que el Eje Neovolcánico es una zona considerada de sismicidad baja, sismos de gran magnitud han sucedido a lo largo de la historia, entre los cuales se pueden mencionar los ocurridos el 27 de diciembre de 1568 ( $M_w$  7.2) en la región oriental, que causó severos daños y destrucción de algunas iglesias, deslizamientos de tierra, licuefacción, agrietamiento del suelo y una interrupción del nivel freático (Suárez et al., 2019). En febrero de 1575 a 45 km al este de Puebla ocurrió un sismo ( $M_w$  7), que afectó varios municipios, donde varias iglesias fueron dañadas (Suárez et al., 2019). El 14 y 15 de abril de 1611 al oeste del Eje Neovolcánico un evento telúrico ( $M_l$  6.4) causó estragos en templos de algunas localidades (Suárez et al., 2019). Nuevamente al oeste del Eje Neovolcánico, cerca del Graben de Colima, en octubre de 1749 otro sismo ( $M_l$  6.4) causó severos daños a la biblioteca pública de Jalisco y en varios conventos de los pueblos de Amacueca y Sayula (Suárez et al., 2019). El 12 de diciembre de 1771 un sismo ( $M_w$  5.5) sacudió la Cd. de Guadalajara, pero no se presentaron grandes afectaciones estructurales en la zona (Suárez et al., 2019). En 1774 en el graben de Bolaños un evento sísmico ( $M_l$   $6.6 \pm 0.5$ ) causó daños de leves a graves en varias regiones del sitio (Suter, 2020). El 19 de junio de 1858 el sismo ( $M_l$  7.6) de Santa Julia afectó varias partes del Edo. de Michoacán y además se sintió fuertemente en la Cd. de México (Suárez et al., 2019). En 1875 al noroeste

de Guadalajara un evento ( $M_w$  7.1) causó severos daños en algunas comunidades de la región, e incluso la muerte de decenas de personas en la comunidad de San Cristóbal (Zuñiga, 2010). El 26 de noviembre de 1887 Pinal de Amoles fue afectada por un sismo ( $M_l$  6.0), donde varias casas y templos resultaron dañadas (Suárez et al., 2019). En 1912 un sismo ( $M$  7) se sintió fuertemente en la ciudad de Querétaro y causó daños y muertes en el municipio de Acambay y sus alrededores (Zuñiga, 2010). En 1920 un evento ( $M_w$  6.4) estremeció la Cd. de Jalapa, causando daños estructurales en varias ciudades y corrientes de lodo en la parte alta, lo cual provocó la muerte de casi 700 personas (Suárez & Novelo-Casanova, 2018). En 1979 ocurrió el sismo ( $M_b$  5.3) de Maravatio al oeste de la falla Venta de Bravo (Suárez et al., 2019). En 1567 Ameca, Jalisco fue golpeada por un evento telúrico ( $M_w$  7.2), registrado como el más fuerte en el Eje Neovolcánico, sin embargo, debido a la falta de información se estima que el área dañada fue mucho mayor que la ocasionada por el sismo de Acambay (Suter, 2015). La ubicación de los epicentros de los sismos mencionados se muestra en la Figura 1-2.



**Figura 1-2 Ubicación de epicentros de sismos destructivos ocurridos en el Eje Neovolcánico.**



Sismos de magnitudes considerables han ocurrido a lo largo del tiempo en varias ciudades dentro del Eje Neovolcánico, donde los efectos de sitio son un elemento importante. Es de gran interés el análisis de la respuesta de sitio para la estimación del riesgo sísmico, a pesar de ello y considerando los efectos asociados a sismos regionales, son muy pocos los estudios que se tienen sobre este tema en la zona, por lo que la normatividad técnica sobre su impacto en la amplificación del movimiento del suelo es casi nula.

Considerando lo anterior este trabajo se centró en el estudio de los efectos de sitio en el Eje Neovolcánico. En la siguiente sección, se presentan la justificación y descripción del problema.

Posteriormente, en el capítulo 2 se presenta un análisis del estado del arte y aspectos fundamentales sobre la evaluación de la respuesta de sitio.

En el capítulo 3 se incluyen la hipótesis, el objetivo general y los objetivos particulares considerados.

En el capítulo 4 se muestra la metodología aplicada, donde se recabaron bases de datos de registros de sismos corticales y de estaciones localizadas dentro del Eje Neovolcánico, se realizó el procesamiento de los datos obtenidos mediante las técnicas HVSR y SSR, y se obtuvieron mapas de contorno en función de la frecuencia fundamental de vibración y la amplificación del movimiento del suelo.

En el capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos, donde también se hacen comparaciones con estudios análogos realizados en otras partes del mundo.

Finalmente, en el capítulo 6 se muestran las conclusiones que se derivan del presente trabajo y algunas recomendaciones para futuras investigaciones relacionadas con el tema.

## **1.1. Justificación.**

Las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México de 2017 solo mencionan los efectos de sitio como un requisito en los conocimientos y experiencia de los especialistas auxiliares que intervienen en la revisión de la seguridad estructural. Por otra parte, el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) del 2015 indica que en los espectros de diseño se deberán de considerar los efectos de sitio de manera detallada con criterios que permitan incluir las amplificaciones dinámicas del terreno. Las normas y reglamentos mencionados consideran de una manera somera los efectos de sitio en sus contenidos, sin embargo, dentro del eje Neovolcánico se encuentran grandes ciudades como Querétaro, Guadalajara o Puebla que en los últimos años han tenido un gran crecimiento demográfico e industrial, de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Por lo anterior, es necesario un arduo estudio de los efectos de sitio en la zona, con el fin de acotar su grado de impacto y evaluar el riesgo sísmico.

Se han realizado investigaciones sobre el impacto de los efectos de sitio en algunas ciudades de la República Mexicana, (Ávila-Barrientos & Castro, 2016; F. J. Chávez García et al., 2007) y en algunos eventos sísmicos de gran magnitud (Chavez et al., 2014). En el trabajo de Clemente-Chavez et al. (2014) que se hizo en el área de estudio propuesta, el Eje Neovolcánico, encontraron variaciones de los efectos de sitio debidas a la ubicación de la fuente, sin embargo, el número de estaciones analizadas fue limitado, trece, con un numero de datos reducido y en un periodo de tiempo corto. Por lo anterior es de gran interés ampliar el estudio de los efectos de sitio en la zona, con una base de datos mayor y con un periodo de tiempo más amplio, con el fin de obtener resultados más precisos.

Es difícil encontrar una región en donde la respuesta de sitio no sea un factor importante a considerar en el diseño sísmico, por ello es fundamental mencionar que el Eje Neovolcánico está construido sobre provincias magmáticas

del Cretácico y Cenozoico y un basamento heterogéneo hecho de terrenos tectono-estratigráficos de diferente edad y litología. El eje muestra una gran variación en la composición y estilo volcánico, y tectónica extensional (Ferrari et al., 2012), es debido a estas variaciones que el estudio propuesto es de gran importancia.

## **1.2 Descripción del Problema.**

Las condiciones geológicas locales afectan en gran medida la amplitud, frecuencia, composición y duración del movimiento del suelo. En zonas como el valle de Querétaro y el área metropolitana de Guadalajara, estructuras de gran tamaño están cimentadas sobre suelos blandos, donde los efectos de sitio generan amplificaciones de onda superiores, y por ende mayores estragos en las edificaciones (Dora et al., 2005; Ramírez Gaytan et al., 2020).

Las amplificaciones del movimiento del suelo repercuten directamente en las solicitaciones y el comportamiento de las estructuras ante un sismo. Por consiguiente, es de suma importancia estimar la respuesta de sitio con el fin de edificar obras civiles con un adecuado diseño.

Con el objetivo de analizar la respuesta de sitio en el área del eje Neovolcánico, se implementó la técnica de relación espectral horizontal a vertical (HVSR) y la técnica de relación espectral estándar (SSR), y así comparar de resultados obtenidos con ambas técnicas para registros de sismo y de ruido ambiental.

## **2. ANTECEDENTES.**

Los efectos de sitio tienen la capacidad de modificar el movimiento del suelo con factores de amplificación incluso mayores a 10, como los reportados en el trabajo de (Borcherdt, 1970), causados por el sismo de 1906 en San Francisco o los factores obtenidos por (Zhang et al., 2018) en un estudio que realizaron en base a los acelerogramas del sismo de 2008 en Wenchuan, China. Tales amplificaciones repercuten directamente en las solicitaciones y el comportamiento de las estructuras ante un sismo. Por lo que es importante realizar un estudio minucioso de la respuesta del sitio en el Eje Neovolcánico. En esta zona se localizan ciudades donde se concentran grandes densidades poblacionales, tal es el caso de Guadalajara, Morelos, Querétaro, Pachuca, entre otras.

Para poder llevar a cabo este trabajo se implementaron dos técnicas de análisis de señales, la técnica de relación espectral horizontal a vertical (HVSr) y la técnica de relación espectral estándar (SSR), de acuerdo a (Lozano et al., 2009; Mucciarelli & Gallipoli, 2001; Perron et al., 2018) con ambas técnicas se obtiene un valor similar de la frecuencia  $f_0$ , pero la técnica HVSr obtiene una mera aproximación del factor de amplificación  $A_0$ , ya que subestima los efectos de sitio en la amplificación del movimiento del suelo. Con el fin de tener más información y una mayor comprensión, en este capítulo se desarrollan temas relacionados, conceptos, ecuaciones y una semblanza histórica sobre estudios desarrollados para determinar los efectos de sitio en varias partes del mundo.

### **2.1. Estado del arte.**

Las técnicas de relación espectral estándar SSR (Borcherdt, 1970) y de relación espectral horizontal a vertical HVSr (Nakamura, 1989) han sido frecuentemente utilizadas para analizar los efectos de sitio en México y alrededor del mundo, con diversos objetivos y obteniendo diferentes resultados.

Entre los trabajos realizados en México, Chávez García et al. (2007) realizaron un estudio de microzonificación para registros del sismo de 2003 (M 7.4) en la ciudad de Colima, mediante la implementación de la técnica HVSR, sin embargo, concluyeron que dicha técnica no proporcionó resultados confiables debido a la complejidad de la geología en la región. Lozano et al. (2009) estudiaron los efectos de sitio en la Bahía de Acapulco y el Valle de México donde encontraron que para ambas regiones utilizando la técnica HVSR solo se obtiene una aproximación estimada de la amplificación de sitio y que ambos métodos (HVSR y SSR) estiman valores similares de la frecuencia fundamental, y que además los efectos de sitio dependen en los más mínimo de las características y ubicación de la fuente. Clemente et al. (2014) estudiaron el comportamiento de los efectos de sitio en el Eje Neovolcánico con base en registros de terremotos poco profundos, encontraron variaciones de los efectos de sitio que atribuyeron a la ubicación de la fuente. Ávila-Barrientos y Castro (2016) analizaron registros de 92 sismos ocurridos en el Golfo de California, México, y mediante la técnica HVSR encontraron que hay un incremento proporcional en la amplificación del movimiento del suelo respecto de la magnitud registrada. Pérez-Moreno et al. (2021) aplicaron la técnica HVSR a registros de ruido ambiental y de sismos de 90 estaciones ubicadas en el Eje Neovolcánico, con el fin de analizar la respuesta de sitio, y encontraron que hay bastante variabilidad en términos de la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$ , además en algunos casos compararon los resultados para ruido ambiental y registros de eventos sísmicos, y no descubrieron diferencias de gran importancia.

También en varias ciudades alrededor del mundo el estudio de los efectos de sitio ha tomado gran importancia. Mittal et al. (2013) estimaron los efectos de sitio para varios lugares de la ciudad de Delhi, India, utilizando la técnica de relación espectral estándar (SSR). Sus resultados arrojan un cambio significativo en el factor de amplificación de un lugar a otro, debido a la variación en el tipo suelo o en el espesor del mismo. Borah et al. (2016) utilizando la técnica SSR,

estudiaron la respuesta del sitio en Guwahati, Assam India, con el fin de explicar la importancia de un programa de análisis detallado para comprender la sismicidad del lugar. Akram et al. (2017) analizaron los efectos de sitio del sismo de Tottori, Japón, y para este caso en específico encontró que la técnica de relación espectral estándar (SSR) muestra resultados mucho mayores que la técnica de Nakamura (HSVR). Stanko et al. (2017) en la ciudad de Varazdin, utilizaron la técnica HVSR para determinar la frecuencia fundamental del suelo ( $f_0$ ), la amplificación del sitio ( $A_0$ ) de los sedimentos aluviales blandos y la frecuencia fundamental de los edificios de diferentes alturas, y determinó que los resultados obtenidos de la frecuencia y amplificación del sitio solo se pueden usar como una indicación. Chávez-García y Raptakis (2017) estudiaron los efectos de sitio cerca de la costa de Thermaikos en Tesalónica, Grecia, con registros de terremotos y mediciones de ruido sísmico utilizó las técnicas HSVR y SSR, para este sitio en particular encontró que el uso de  $V_{s30}$  como estimación de los efectos de sitio no es la mejor opción debido al importante papel que desempeñan las capas más profundas. Gosar, (2017) aplicó la técnica HVSR a 70 mediciones de ruido ambiental, esto en la ciudad de Idrija, al oeste de Eslovenia, detectando la frecuencia fundamental de resonancia en 48 de los puntos, mientras que en el resto las curvas HVSR no presentaron picos claros. Singh et al., (2017) aplicaron la técnica HVSR a mediciones de microtemores, registradas en la zona sísmica Kachchh, al oeste de la India, y encontraron que hay relación entre la distribución de la geología, la frecuencia  $f_0$ , la amplificación del suelo  $A_0$  y la velocidad de la onda de corte  $V_{s30}$ . Perron et al. (2018) en el área de Provence, France, compararon la metodología HVSR y SSRn (es decir, SSR modificado, aplicado a datos de ruido ambiental), donde concluyó que la técnica HVSR solo permite reconocer la frecuencia fundamental del suelo ( $f_0$ ), mientras que la SSRn muestra funciones de transferencia de sitio similares en comparación con la SSR para frecuencias más bajas que la frecuencia de resonancia fundamental mínima de la cuenca, y de acuerdo a las gráficas reportadas el valor de  $A_0$  varía de 1 a 5 de las

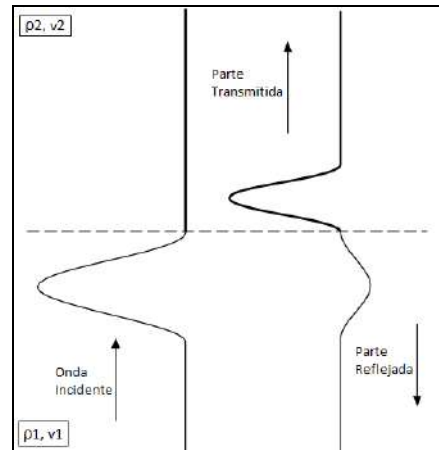
curvas HVSR a las SSRn. Zhang et al. (2018) analizaron registros de tiempo de aceleración del terremoto de Wenchuan, China con  $M_s=8.0$  utilizando el método de relación espectral estándar SSR para caracterizar el efecto de la cresta en las amplificaciones del movimiento del suelo, donde indica que los valores de amplificación cambian con la ubicación de la estación de monitoreo. Vignola et al. (2019) después del sismo de 2016 en Italia, realizaron una evaluación de la vulnerabilidad y los daños, estudiando los efectos de sitio por medio de las técnicas HVSR y SSR, y encontrar las causas en las diferencias de daños en Pescara de Tronto y la localidad de Vezzano. Yaghmaei-Sabegh y Hassani (2020) desarrollaron un modelo simple de amplificación de sitios de Irán basado en la frecuencia fundamental del sitio ( $f_0$ ) utilizando la técnica de Nakamura (HVSR).

## **2.2. Contrastes de impedancia.**

Los efectos de sitio influyen en gran medida en la forma en que los daños se distribuyen cuando un sismo ocurre en alguna región. La amplificación del movimiento así como un posible aumento en su duración son debidas a contrastes de impedancia (Chávez García et al., 2007), la cual se define como el producto de la densidad por la velocidad de propagación  $\rho v$  (Stein & Wysession, 2005). La conservación del flujo de energía requiere que una onda sísmica que pasa de un medio con velocidad de propagación rápida a uno con velocidad más baja aumente su amplitud (Chávez García & Montalva, 2014). Cuando una onda sísmica se propaga en el suelo, va de un estrato 1 con una densidad  $\rho_1$  y velocidad de propagación  $v_1$  a un estrato 2 con una densidad  $\rho_2$  y velocidad  $v_2$ , una parte de la onda puede ser reflejada y otra parte transmitida, Figura 2-1.

La manera en cómo se reparte la energía transportada por la onda depende de los coeficientes de reflexión  $R$  y transmisión  $T$ , y estos a la vez dependen de la impedancia en cada estrato, las mayores reflexiones ocurren en los límites donde las propiedades cambian bruscamente (Stein & Wysession, 2005). Debido a las grandes diferencias en las propiedades de un suelo rocoso a

un suelo blando, es claro que cuando una onda pase a través de estos medios, esta sufrirá alteraciones ya sea en su amplitud o velocidad de propagación.



**Figura 2-1 Propagación de onda de un estrato 1 a un estrato 2 (Stein & Wysession, 2005).**

De acuerdo con la ley de Snell, cuando las ondas se propagan a través de los estratos del suelo, cambian continuamente de dirección, y cambian de amplitud solo cuando los contrastes de impedancia son significativos.

### **2.3. Ruido ambiental.**

En las últimas décadas se ha utilizado el ruido ambiental como una fuente de información importante para obtener, a través de procesamiento, imágenes de la estructura de la tierra en una amplia variedad de escalas (Sánchez Sesma et al., 2015). Como ya se mencionó, cuando no hay suficientes registros de eventos sísmicos, las mediciones de ruido ambiental se pueden utilizar para el análisis de los efectos de sitio, aplicando la técnica de relación espectral HVSR.

En sismología se consideran dos tipos de señales que forman campos de ondas aleatorias: señales de sismos y aquellos generados por el ruido sísmico ambiental, las cuales no dependen de la ocurrencia de un evento sísmico, y por lo tanto pueden ser obtenidas a cualquier hora y ubicación (Yang & Ritzwoller, 2008). El ruido ambiental puede provenir de diferentes fuentes como vibraciones



producidas por actividades humanas, generalmente de alta frecuencia, vibraciones causadas por fuentes superficiales locales como las industrias y el tráfico, ruido natural de baja frecuencia generado por mareas, vientos, y telesismos (Ritta et al., 2012).

En su estudio realizado en la costa oeste de la isla de Puerto Rico (Ritta et al., 2012) señalan que el uso de ruido ambiental en el análisis de la respuesta de sitio brinda resultados satisfactorios, además de tratarse de una técnica simple y poco costosa, también se puede realizar en cualquier momento sin la necesidad de esperar a que ocurra un sismo. Stanko et al. (2017) para un estudio de los efectos de sitio en el norte de Croacia encontraron que los registros de ruido ambiental de una sola estación demuestran ser una herramienta útil para evaluar el peligro potencial de resonancia de la estructura del suelo en zonas con baja sismicidad. (Pérez-Moreno et al., 2021) analizaron registros de ruido ambiental y eventos sísmicos para comparar la respuesta de sitio en el Eje Neovolcánico, y en la mayoría de los casos no hubo diferencias significativas en la forma de las curvas HVSR.

#### **2.4. Distribución de suelos en algunas ciudades del Eje Neovolcánico.**

El grado de impacto de los efectos de sitio está ligado directamente con el tipo de suelo donde están cimentadas las edificaciones. Dentro del Eje Neovolcánico existen zonas urbanas con poblaciones de miles de habitantes, donde estructuras de gran tamaño son soportadas por suelos blandos o en el mejor de los casos por suelos de tipo rocoso.

El Valle de Querétaro comprende una cuenca sedimentaria delimitada por fallas regionales, la columna estratigráfica de la zona urbana, donde se encuentran la mayoría de edificaciones de gran tamaño está compuesta como sigue: el primer metro de secuencia está constituido principalmente por relleno antropogénico, por debajo de este con espesores de entre 1 y 6 m se tiene un

depósito de arcillas de origen lacustre, entre los 8 y 40 m de profundidad se localiza una secuencia arenosa, con estratos de gravas y hacia los márgenes del valle se encuentran aluvión cuaternario y depósitos de coluvión (Carreón-Freyre et al., 2005).

Guadalajara, la tercera ciudad más grande de México, es susceptible a un alto riesgo sísmico debido a la interacción entre las placas Rivera, Cocos y Norteamérica y el bloque Jalisco. El subsuelo del área metropolitana tiene un espesor aproximado de 100 m, los primeros 15 compuestos por una densa mezcla de piedra pómez de arena salada y grava arenosa, seguido de 80 m de arena rígida, limosa y pómez con algo de grava pómez (Ramírez Gaytan et al., 2020).

La Ciudad de Morelia ha tenido un crecimiento exponencial en los últimos años, propiciando el desarrollo urbano hacia zonas vulnerables. Se encuentra localizada en un área donde se presentan rocas volcánicas y sedimentarias y además se caracteriza por la presencia de actividad sísmica volcánica (Arreygue Rocha et al., 2002).

La ciudad de Puebla está rodeada de paisaje volcánico, en ella predominan formaciones de suelos tobáceos, tobas, rocas andesíticas y basálticas, y sobre ellas yacen depósitos de materiales de orígenes fluvial, aluvial y lacustre (Flores & Figueras, 2018). La superficie urbana y zonas conurbadas de Xalapa están desplantadas sobre un Campo Volcánico, por lo que la Ciudad de Xalapa esta cimentada sobre materiales volcánicos, sin embargo, el desarrollo urbano acelerado ha cubierto áreas inestables compuestas por lomeríos y rellenos mal compactados (Lenz, 2016).

Ciudades como Morelia, Puebla o Xalapa en general están desplantadas sobre depósitos de roca volcánica, donde posiblemente los efectos de sitio modificarán el movimiento del suelo en menor medida, pero si se podrán tomar como puntos de comparación. En cambio, en la zona urbana de Querétaro o

Guadalajara donde estructuras de importancia están cimentadas en suelos blandos, los efectos de sitio representarán un mayor impacto. Como ya se mencionó, las técnicas propuestas a utilizar para el análisis de los efectos de sitio serán la de relación espectral estándar SSR y de relación espectral horizontal a vertical HVSR.

## 2.5. Método de relación espectral estándar (SSR).

Esta metodología fue puesta en práctica por Roger Borchardt, quien realizó mediciones del movimiento generado por explosiones nucleares en Nevada, las comparó con las intensidades de los sismos de San Francisco de 1906 y 1957, y encontró variaciones en la amplitud relacionadas directamente con la geología de la zona (Borchardt, 1970).

La relación espectral estándar, se define como la relación espectral de un sitio sedimentario con respecto a un sitio de referencia del lecho rocoso (Mittal et al., 2013). Borchardt (1970) menciona que el lecho de roca cambia en menor proporción las características de frecuencia de la señal que una capa de sedimentos de gran espesor. Para la aplicación del método SSR se consideran dos hipótesis: la primera establece que los efectos de la fuente y ruta son análogos en ambos sitios y la segunda dispone que la respuesta de sitio es mínima en el lugar de referencia (Borah et al., 2016). Teniendo en cuenta lo anterior se establece:

$$(SSR) = \frac{U_{ij}(x,y)}{U_{ik}(x,y)} \quad (1)$$

Donde:

$U_{ij}$  = Amplitud de Fourier del movimiento del suelo observado en el sitio del suelo  $j$  para el evento  $i$ .

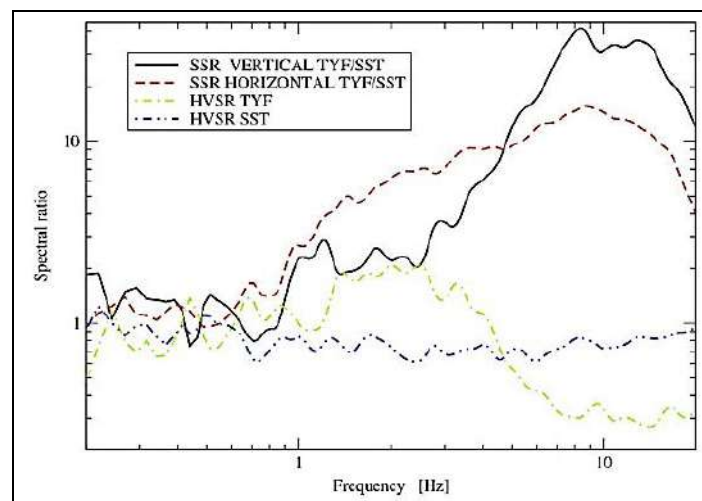
$x$  = Frecuencia.

$y$  = Distancia del epicentro

$k$  = Estación de referencia

Es importante mencionar que si se cumplen las dos hipótesis mencionadas se obtendrá de manera directa la respuesta de sitio de la relación espectral, pero si ocurre lo contrario, este método podría no ser el más adecuado a utilizar (Borah et al., 2016). Este método se basa en los registros simultáneos del mismo terremoto para al menos dos estaciones que están lo suficientemente cerca con respecto a la distancia del terremoto (Perron et al., 2018).

Para poder aplicar esta técnica, es necesario tener registros de muchos sismos en ambas estaciones, con buena relación señal-ruido en una banda de frecuencia amplia. Cuando no se cuentan con estas condiciones es recomendable el uso de técnicas que utilicen registros de ruido ambiental para la evaluación de los efectos de sitio, tal es el caso de la técnica de Nakamura (Perron et al., 2018). En la Figura 2-2 se ilustra un ejemplo de grafica obtenida con este método.



**Figura 2-2 Relación espectral para la zona TYF, Tesalónica, Grecia (Francisco J. Chávez-García & Raptakis, 2017).**

## **2.6. Método de relación espectral vertical a horizontal (HVSr).**

Esta metodología fue desarrollada por Yukata Nakamura en 1989, como una alternativa a los métodos de exploración directa, los cuales son muy precisos, pero requieren de una inversión muy costosa. Su desarrollo fue con el propósito

de obtener las características dinámicas del suelo mediante el análisis de microtemores, basándose en la teoría de que la relación de los espectros horizontal y vertical del temblor de superficie es una función de transferencia aproximada (Yukata Nakamura, 1989). La relación HVSR se usa para estimar la frecuencia de resonancia y la amplificación de los movimientos del suelo. Se calcula dividiendo el espectro de la componente horizontal por el espectro de la componente vertical (Nakamura, 2019). De acuerdo a Nakamura (2019) las ondas P predominan en la componente vertical, mientras que las ondas S lo hacen para la componente horizontal. Por lo anterior se espera que la relación H/V sea grande con la llegada de la onda P y pequeño con la onda S.

El método consiste en calcular las relaciones espectrales entre el componente medio horizontal y los componentes verticales de microtemores registrados al mismo tiempo en una misma estación (Perron et al., 2018). Lo cual puede ser escrito como:

$$HVSR_x(f) = \left\langle \frac{|u_{xH}(f)|}{|u_{xV}(f)|} \right\rangle_{\log} \quad (\text{Perron et al., 2018}). \quad (2)$$

Donde:

$|u_{xH}(f)|$  y  $|u_{xV}(f)|$  son las FAS evaluadas del ruido ambiental registrado en el sitio  $s_x$  para los componentes medio horizontal y vertical respectivamente.

En la Figura 2-3 se muestra un ejemplo de grafica obtenida con esta técnica. Por su bajo costo y fácil ejecución en campo, este método se ha vuelto popular (Mittal et al., 2013), cuando no se tienen registros sísmicos suficientes, mediciones de ruido ambiental se pueden usar con esta técnica, obteniendo buenas estimaciones de la frecuencia fundamental del suelo (Stanko et al., 2017). Otra característica importante del método es su estabilidad, se obtienen los mismos resultados si se repiten las mismas mediciones durante una semana, después de un mes o después de un año (Mucciarelli & Gallipoli, 2001).

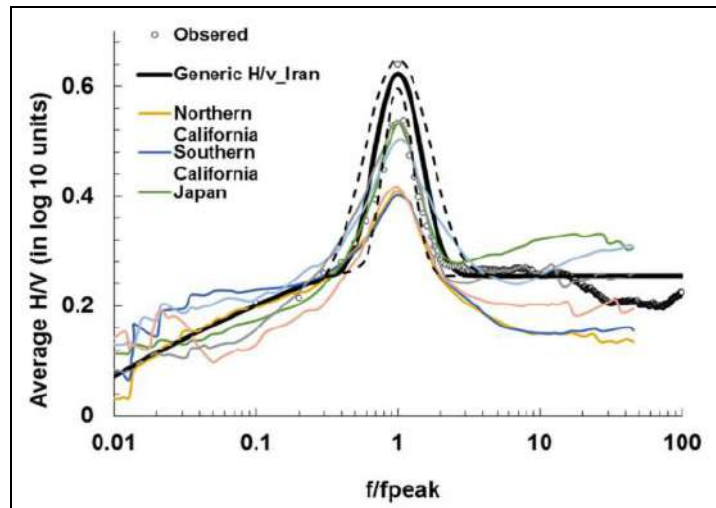


Figura 2-3 Modelo HVSR para Irán, Yaghmaei-Sabegh y Hassani (2020).

Nakamura (2019) menciona que utilizando su técnica es posible obtener la frecuencia de resonancia y el factor de amplificación tanto para edificios como para una capa superficial del suelo, sin embargo, algunos investigadores difieren en esta afirmación. Perron et al. (2018) mencionan que con la técnica HVSR solo es posible estimar la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$  y no proporciona un valor confiable del factor de amplificación  $A_0$ . Mucciarelli & Gallipoli (2001) concluyeron que esta técnica es apropiada para estimar la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$ , pero en otros ámbitos pueden existir ciertas discrepancias. Lozano et al. (2009) comparando las técnicas HVSR y SSR encontraron que ambas estiman valores casi iguales de la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$ , por el contrario, la amplificación obtenida por HVSR es solo una aproximación, ya que subestima los efectos de sitio obtenidos con SSR.

## 2.7. Otras técnicas de análisis.

Las técnicas de ondas superficiales (SWM) se han utilizado con mayor frecuencia en la última década en el análisis de las propiedades dinámicas del suelo y en aplicaciones de ingeniería sísmica. El método de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) se utilizó en un estudio para obtener la velocidad de

onda de corte Vs en función de los perfiles de profundidad Para la aplicación de esta metodología se propagan ondas superficiales artificialmente, las cuales son registradas por dos sensores, las señales registradas son procesadas para obtener curvas de dispersión (Pelekis & Athanasopoulos, 2013)

El método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) es una técnica de ingeniería sísmica que procesa señales en un rango de frecuencias bajas de 3 a 30 Hz, las cuales son registradas mediante un sistema de registro multicanal. Utiliza la propiedad de dispersión de las ondas superficiales para obtener la velocidad de onda de corte en base al perfil de profundidad, siendo una metodología similar a la (SASW), donde se adquieren registros de campo multicanal, se generan curvas de dispersión y se invierten esta curvas para obtener perfiles Vs en función de la profundidad del perfil (Park et al., 2007).

El método de refracción por microtremor (ReMi) es una técnica eficaz y eficiente para obtener las propiedades del suelo de un área determinada. Se aplica para obtener los perfiles de ondas de corte S en función del perfil del suelo, con profundidades de hasta 100 m. Está técnica es muy parecida a las ya mencionadas SASW y MASW, con la diferencia de que aquí se pueden recopilar datos utilizando equipos sísmicos de exploración estándar modernos pequeños. Los sitios con mucho ruido ambiental que son difíciles de evaluar mediante refracción sísmica pueden perfilarse eficazmente utilizando ReMi (Rucker, 2003).

El método de densidades espectrales direccionales (*DED*) fue propuesto por (Sánchez-Sesma et al., 2011) con el fin de calcular la relación H/V. Obtienen la sumatoria de todos los espectros de Fourier para cada una de las componentes horizontales y vertical, aplicando las ecuaciones siguientes:

$$E_N = \sum_1^i [H_N(i)]^2 \quad (3)$$

$$E_E = \sum_1^i [H_E(i)]^2 \quad (4)$$

$$E_Z = \sum_1^i [H_Z(i)]^2 \quad (5)$$

Y la relación espectral promedio se obtiene a partir de:

$$[H/V] = \sqrt{\frac{E_N + E_E}{E_Z}} \quad (6)$$

En esta técnica solo se obtiene un único promedio espectral y además se tiene que multiplicar por un factor de ponderación para que cada ventana de tiempo contenga la misma cantidad de energía (Martínez González, 2015).

Las metodologías mencionadas son más costosas que las técnicas de análisis HVSR y SSR, y requieren de equipos más sofisticados, de los cuales no se cuenta con redes de medición ya establecidas. Sin embargo, son otra opción disponible, además de los métodos invasivos, los cuales, son más exactos pero requieren de un presupuesto mucho mayor.

## **2.8. Interpolación de Krigging.**

Para poder aplicar técnicas de análisis de señales como la HVSR o SSR es necesario contar con número considerable de registros de eventos sísmicos o ruido ambiental en puntos específicos. Se tiene cierta cantidad de estaciones dispersas en toda el área de estudio, en algunas se ha obtenido un número aceptable de eventos, pero para poder realizar un análisis más completo obtener valores de la frecuencia fundamental en puntos donde no se tienen muestras, será necesario la aplicación de técnicas de interpolación espacial confiables.

La interpolación de Krigging es una técnica utilizada en la estadística, con la cual es posible estimar los valores de una variable en lugares no muestreados utilizando la información proporcionada por los datos conocidos. Éste método está propuesto de tal forma que se obtenga el mejor estimador lineal no sesgado con una varianza mínima (Porrás Velázquez, 2017).



El variograma es la herramienta analítica que se utiliza para evaluar y cuantificar el grado de auto correlación espacial; sus resultados son la base de la interpolación de Kriging (De Rubeis et al., 2005). Puede ser estimado de una muestra de datos de en una, dos o tres dimensiones, la formula común para calcularlo es la siguiente:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2M(h)} \sum_{i=1}^{M(h)} \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2 \quad (7)$$

donde  $M(h)$  es el número de pares de observaciones separadas por el rezago  $h$ . Al cambiar  $h$  se obtiene un conjunto ordenado de valores, que constituye la muestra o variograma experimental. El variograma resume la forma general de la variación, su magnitud y escala espacial (Oliver & Webster, 1990). El grado de precisión dependerá del tamaño de la muestra, así como de la separación entre cada punto muestreado.

En esencia Kriging es un método que estima los promedios ponderados en puntos específicos.

$$z(B) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (8)$$

Donde  $z(B)$  es la estimación sobre un área y  $\lambda_i$  son los pesos, que se suman uno a uno para que no haya sesgos, para el mapeo  $z(B)$  se calcula en las cuadrículas lineales, donde los resultados pueden ser mostrados a través de sombreado en capas (Oliver & Webster, 1990).

## 2.9. Función de Konno-Omachi.

La metodología de relación espectral horizontal a vertical HVSR carecía de una base teórica precisa, por lo que Konno & Ohmachi (1998) propusieron una técnica para una estimación confiable del periodo fundamental de vibración y además una función de suavizado para un mejor cálculo del factor de amplificación. De acuerdo a (Zhu et al., 2020), ésta es una de las funciones de

suavizado más aplicadas, con un ancho de ventana constante y una forma simétrica alrededor de la frecuencia central:

$$W_B(f, f_c) = \left( \frac{\sin(\log_{10} \frac{f}{f_c})^b}{(\log_{10} \frac{f}{f_c})^b} \right)^4 \quad (9)$$

donde  $f_c$  es la frecuencia central a la que se realiza el suavizado, y  $b$  es un coeficiente de suavizado inversamente proporcional al ancho de banda, donde un menor valor de  $b$  resulta en un mayor suavizado. Konno & Ohmachi (1998) mencionan que es preferible un valor más pequeño de  $b$  cuando se requiere obtener una relación lineal entre las relaciones de los picos y los contrastes de velocidad, mientras que es preferible un valor más grande de  $b$  para reducir el alargamiento en el período pico.

#### **2.10. Cálculo de la velocidad de onda de corte a 30 m de profundidad $V_{S30}$ .**

Como su nombre lo indica,  $V_{S30}$  es la velocidad de la onda de corte promediada en el tiempo del suelo superficial, es decir desde la superficie hasta una profundidad de 30 m (Ahn et al., 2021). Este es uno de los parámetros importantes que son utilizados ampliamente para obtener las propiedades dinámicas del suelo (Anbazhagan et al., 2019).

Ghofrani & Atkinson, (2014) analizaron bases de datos de Japón y de la NGA-West para comparar la efectividad en la caracterización de un sitio por medio  $V_{S30}$  en contraste con la caracterización hecha a través de las curvas HVSR, y encontraron que la técnica HVSR ofrece más información del sitio, además de que lo hace a una profundidad mayor a 30 m. Anbazhagan et al., (2019) analizaron 247 registros de sismos en la región del Himalaya, con el fin de clasificar la respuesta de sitio en base a las curvas HVSR y a la velocidad promedio de la onda de corte  $V_{S30}$ . Ahn et al., (2021), analizaron las curvas HVSR de 48 estaciones ubicadas en República de Corea con el fin de encontrar una

relación entre la frecuencia máxima  $f_p$  y la velocidad promedio de la onda de corte a 30 m  $V_{S30}$ , y descubrieron que la relación entre  $f_p$  y  $V_{S30}$  es débil si la frecuencia pico no es clara y la amplitud de la relación espectral H/V es baja.

Con base en las características de varios sitios Ghofrani & Atkinson, (2014) obtuvieron varias ecuaciones empíricas que relacionan las características de la curva HVSR (frecuencia pico  $f_p$  y amplitud pico  $A_p$ ) con la velocidad  $V_{S30}$ . Para este estudio se utilizó la ecuación (10), la cual dedujeron del análisis de las curvas HVSR de la base de datos de la NGA-West 2. Al tratarse de una base de datos con registros de sismos de todo el mundo, la relación puede ser aplicada en cualquier zona independientemente de las características de la región. Y además los valores de  $V_{S30}$  facilitan la estimación de los efectos de sitio de acuerdo a varios estudios empíricos que vinculan la respuesta de sitio con la velocidad de la onda de corte  $V_{S30}$  (Ghofrani & Atkinson, 2014).

$$\log(V_{S30}) = 2.80 (\pm 0.02) + 0.16(\pm 0.02) \log(f_{peak}) - 0.50(\pm 0.03) \log(A_{peak}) \quad (10)$$

De acuerdo a los valores de  $V_{S30}$  se puede realizar una clasificación del sitio de acuerdo al National Earthquake Hazards Reduction Program Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures (NEHRP, 2020). La clasificación va de la letra A a la letra F, como se muestra en la Tabla 2-1.

**Tabla 2-1 Clasificación del sitio en base a la  $V_{S30}$ , (Ahn et al., 2021).**

Clasificación	Descripción del sitio.	$V_{S30}$ (m/s)
A	Roca dura	>1500
B	Roca	760 - 1500
C	Arena muy densa o arcilla dura.	360 - 760
D	Suelo rígido	180 - 360
E	Perfil del suelo con arcilla blanda	≤ 180
F	Se requiere un estudio de suelos del sitio.	

### **3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS**

Por medio de técnicas basadas en relaciones espectrales e interpolación espacial, se determinará la variación de la respuesta de sitio a lo largo del Eje Neovolcánico, asociada a la ocurrencia de sismos corticales regionales, en términos de la frecuencia fundamental de vibración ( $f_0$ ) y la amplificación del movimiento del terreno ( $A_0$ ).

#### **3.1. Objetivo General:**

Analizar la variación de la respuesta de sitio en el Eje Neovolcánico durante sismos corticales por medio de mapas de contorno en función de la frecuencia fundamental de vibración ( $f_0$ ) y la amplificación del movimiento del terreno ( $A_0$ ), a partir de técnicas basadas en relaciones espectrales e interpolación espacial.

#### **3.2. Objetivos Particulares:**

1. Analizar la distribución espacial de registros instrumentales de sismos corticales ocurridos en la zona de estudio.
2. Evaluar la respuesta de sitio en la zona de estudio mediante la técnica HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio).
3. Evaluar la respuesta de sitio en la zona de estudio mediante la técnica SSR (Standard Spectral Ratio).
4. Analizar la variación espacial de la respuesta de sitio en la zona de estudio a través de mapas de contorno.

## 4. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos de esta investigación y poder realizar el análisis de los efectos de sitio para sismos corticales en el Eje Neovolcánico se planteó una metodología a seguir, que consistió en cuatro etapas descritas en el diagrama de flujo, Figura 4-1.

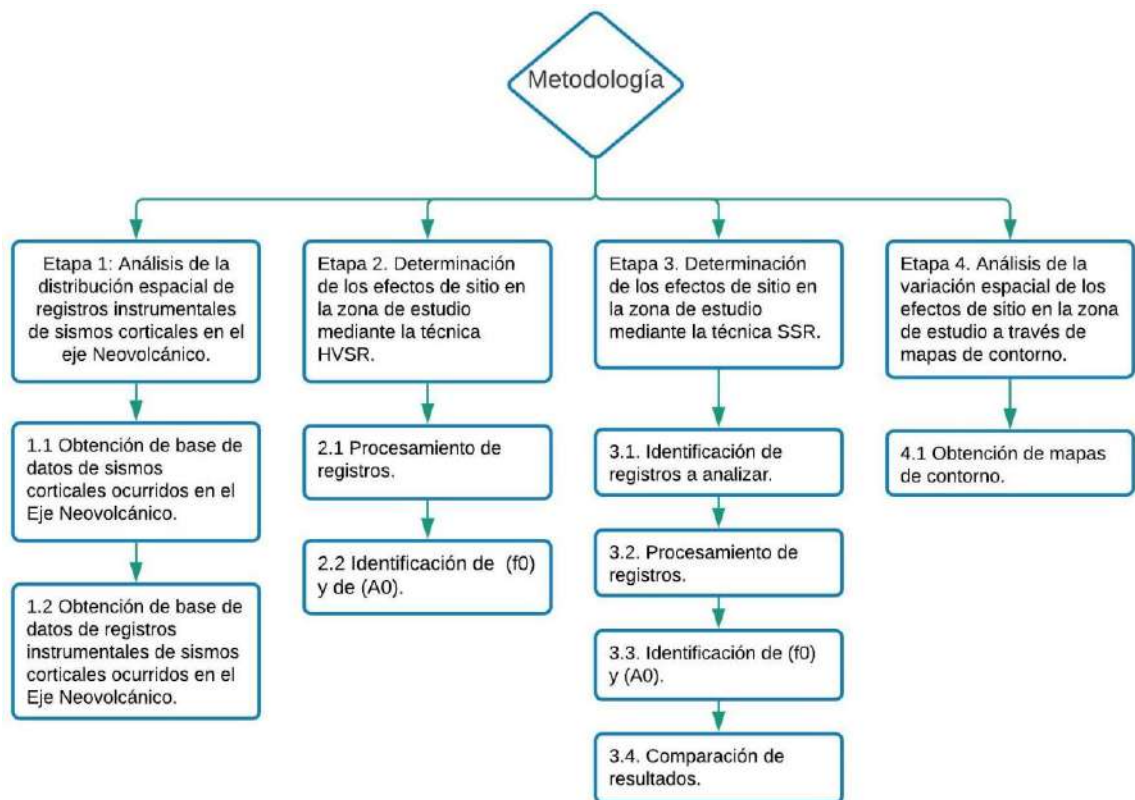


Figura 4-1 Diagrama de flujo de la Metodología.

### 4.1. Análisis de la distribución espacial de registros instrumentales de sismos corticales ocurridos en la zona de estudio.

En esta primera etapa se realizó una búsqueda en las bases de datos de diferentes dependencias nacionales e internacionales con el fin de obtener una lista de registros de sismos corticales ocurridos en la zona de estudio. Después se

obtuvieron bases de datos de las diferentes redes sismológicas nacionales, que operan u operaron en la zona de estudio. Lo siguiente fue analizar los datos de sismos corticales obtenidos, en función de su distancia epicentral respecto de cada una de las estaciones y su magnitud. Se determinó cuáles registros eran factibles para procesarlos y que registros debían ser removidos.

#### **4.1.1. Obtención de base de datos de sismos corticales ocurridos en el Eje Neovolcánico.**

Se efectuó una búsqueda en las bases de datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN), del Centro Sismológico Internacional (ISC, International Seismological Center) y del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, US Geological Service). Lo anterior con el fin de obtener información sobre la ubicación epicentral y la fecha de ocurrencia de sismos corticales en la zona de estudio.

La identificación de los sismos corticales se realizó con base en las curvas de nivel presentadas por Ferrari et al. (2012), separando los sismos ocurridos en la corteza terrestre y en la placa tectónica subducida.

#### **4.1.2. Obtención de base de datos de registros instrumentales de sismos corticales ocurridos en el Eje Neovolcánico.**

Se realizó una búsqueda exhaustiva de registros instrumentales de los sismos corticales ocurridos zona de estudio, identificados en las bases de datos de las siguientes redes sismológicas:

- Servicio Sismológico Nacional (SSN)
- Red MASE (Mesoamerican Seismic Experiment)
- Red MARS (Mapping the Rivera Subduction zone)
- Red CODEX (Colima Volcano Deep Seismic Experiment)
- Red GECO (Geometry of Cocos plate)

- Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (CGEO)
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)
- Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM)

Los registros instrumentales obtenidos cumplen con los siguientes criterios de exclusión: a) llegada clara de ondas P y S, y b) relación señal/ruido mayor a 2.

Las características de las redes sismológicas que se utilizaron para llevar a cabo esta investigación son las siguientes:

1) La Red de Banda Ancha del Servicio Sismológico Nacional se extiende por toda la superficie de la República Mexicana con el fin de realizar un monitoreo permanente de los fenómenos sísmicos. Se compone de 61 estaciones sismológicas estándar que cuentan, cada una, con un sismómetro de tres componentes con respuesta plana de 120 o 240 Hz hasta 50 Hz y un acelerómetro de tres componentes; además de un digitalizador de 24 o 26 bits que permite almacenar de manera local la información generada, así como enviarla a través de los distintos medios de comunicación utilizados. De igual manera, cuenta con 43 sistemas GNSS para el monitoreo del desplazamiento. Los observatorios se localizan primordialmente en las costas del océano Pacífico, Golfo de México y Eje Neovolcánico. (SSN, 2020).

Los sismómetros son sensores triaxiales que permiten registrar ondas sísmicas en una amplia banda de frecuencias, con respuesta plana a la velocidad del suelo entre 0.01 a 30 Hz, y también pueden registrar sismos en una amplia gama de magnitudes, desde sismos locales, regionales, hasta lejanos sin saturar el instrumento (SSN, 2020). Para el desarrollo de esta investigación se han

considerado los eventos registrados en 9 de los 61 sismómetros, los cuales están localizados dentro del Eje Neovolcánico.

2) La red sismológica MASE (*Meso-America Subduction Experiment*), fue una red temporal, estuvo activa entre enero de 2005 hasta junio de 2007, abarcaba una línea de 600 km de distancia, desde Acapulco en el Océano Pacífico hasta Tampico en el Golfo de México, pasando por la Ciudad de México. Contaba con 100 sensores de banda ancha Guralp 3T (120 seg. a 50 Hz). Esta línea muestra la porción de losa plana de la zona de subducción. La selección de los sitios donde se ubicó cada estación en ocasiones tuvo que comprometer la buena calidad de los datos para la seguridad del equipo o la comunicación por radio de línea del sitio. Además su configuración se diseñó para reducir las variaciones de temperatura y presión, así como el ruido ambiental (Valdés et al., 2008). La base de datos de esta red se encuentra disponible en la herramienta ObsPy, en la cual se pueden acceder a los registros y realizar el procesamiento de datos sísmicos (Beyreuther et al., 2010). Para esta investigación se consideraron los eventos registrados en 7 de las estaciones sismológicas.

3) La red MARS (*Mapping the Rivera Subduction Zone*), también fue una red temporal al igual que la red MASE, abarca la mayor parte del bloque Jalisco y el bloque occidental de Michoacán hacia el este, tenía un espacio de 35 a 50 km entre estaciones, lo que proporciona buena cobertura de datos para estudios micro-sísmicos y tomografía sísmica. Cada estación tenía un flujo de datos que registraba datos de 24 bits a 40 muestras por segundo (Kurniawan, 2013). Esta red sísmica estuvo compuesta por 50 sismógrafos, la gran mayoría de ellos de banda ancha, desplegados durante un período de 18 meses entre enero de 2006 y junio de 2007. En este proyecto participaron, la Universidad de Texas, en Austin y la Universidad Estatal de Nuevo México, de los EUA; el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Observatorio Vulcanológico de la Universidad de Colima, entre sus objetivos se encontraban el



comprender las fuerzas que controlan la tectónica del Bloque de Jalisco en el oeste de México, así como el comportamiento de las placas de Rivera y de Cocos (Martínez López, 2011). Para este proyecto se han considerado los eventos registrados por 9 estaciones localizadas dentro del Eje Neovolcánico.

4) La red sismológica CODEX (*The Colima Deep Seismic Experiment*) también fue una red temporal ubicada en el estado de Colima, que se instrumentó con el objetivo de describir la raíz magmática del volcán de Colima y sus alrededores, operó entre enero del 2006 y diciembre del 2008. Estaba integrada por 22 estaciones, las cuales, a su vez, estaban constituidas por sismómetros de tipo Guralp CMG40T con digitalizadores Quaterra 330, en todos los casos. Estaba operada por la Universidad de Alaska, Fairbanks, EUA (West, 2006). Ésta también se encuentra integrada dentro del servidor ObsPy.

5) La red GECO (*Geometry of the Cocos Plate*) es un proyecto sísmico para investigar el Eje Neovolcánico oriental, donde parece que la Placa de Cocos se está desgarrando. Opera desde el año 2013. Para esta investigación se analizaron los registros obtenidos de 8 estaciones pertenecientes a esta red, localizadas dentro del Eje Neovolcánico.

6) La red Sísmica CGEO, operada por el Centro de Geociencias de la UNAM (CEGEO); cuenta con una estación de en Juriquilla con el código JRQG, que operó desde enero del 2003 y debido al incremento de ruido ambiental en Juriquilla desde febrero del 2020 la estación se sitúa en el campus experimental de la FMVZ UNAM en el municipio de Tequisquiapan, ahora con el código TXMV. Cuenta con un sismómetro STS-2 de tercera generación, así como un acelerómetro Episensor a 200 Hz (UNAM, 2021). Esta red también se encuentra dentro del servidor de ObsPy.

7) La Red de Observación Sísmica (ROS) cuenta con un total de 20 estaciones, 10 de ellas distribuidas en los alrededores de la Ciudad de México, 5 en el contorno del volcán Popocatepetl y los 5 sobrantes desplegadas en la

trayectoria antes mencionada. Cuenta con un acervo de 2440 acelerogramas de 1990 al 2015, de los cuales más de 38 son de magnitud mayor a M 5.0. Es importante mencionar que esta red, permite estimar la atenuación de las ondas sísmicas provenientes de las costas de Guerrero a la Ciudad de México. El objetivo consiste en conocer la profundidad, ocurrencia y otras propiedades que producen los sismos, poniendo especial atención en la estructura de la Placa de Cocos y Norteamérica así (Galaviz, 2016). En este caso se consideraron los eventos registrados de dos estaciones sismológicas, puesto que fueron las únicas donde se tuvieron al menos 3 registros.

8) La Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (RAII-UNAM) para el registro de movimientos fuertes, pone a disposición un catálogo de alrededor de 18,606 acelerogramas de tres componentes, producto de 6,893 temblores identificados para el periodo 1964 a 2018. Parte del desarrollo de este sistema se realizó bajo el proyecto marco de colaboración entre la Universidad Nacional Autónoma de México y la Secretaría de Gobernación a través del CENAPRED, éste permite al usuario encontrar la información disponible mediante consultas al catálogo de sismos o por la combinación de parámetros relacionados con la estación de registro, fecha de ocurrencia, aceleración registrada o distancia radial (RAII-UNAM, 2014).

Los registros de aceleración, referentes a las redes del Instituto de Ingeniería de la UNAM y del CENAPRED, previamente procesados por las instituciones, a las que se les requirieron los registros de dichos eventos y después fueron transferidos para su posterior análisis. Una vez obtenidos los registros obtenidos para cada una de las estaciones de cada red, se llevó a cabo el procesamiento de los mismos.

Los registros del Servicio Sismológico Nacional y de la red GECO fueron obtenidos mediante el software *Seismic Analysis Code* (SAC), y se procesaron en

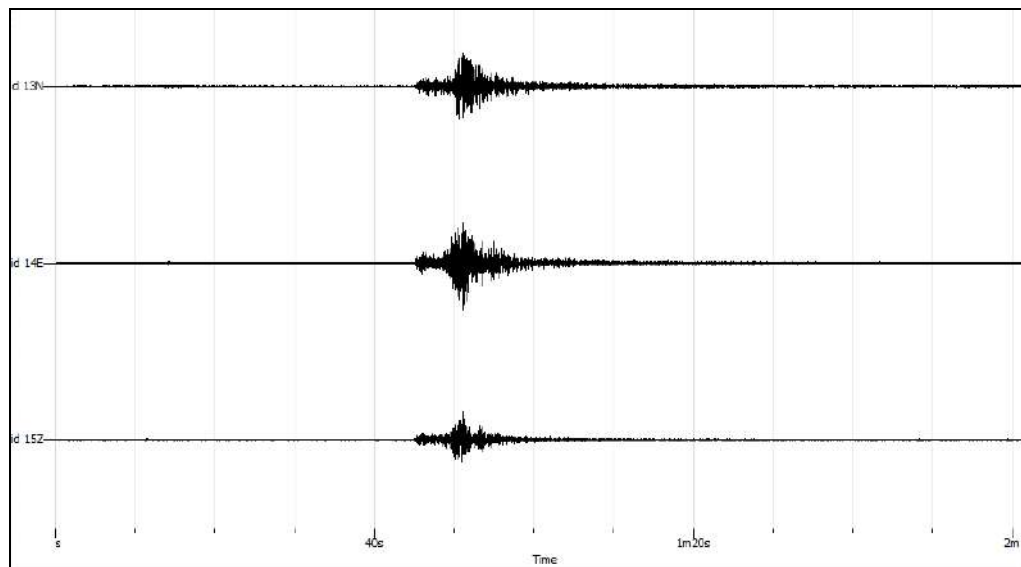
el programa Geopsy, aplicando la transformada de Fourier para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Los registros de las redes CODEX, MARS y MASE se obtuvieron desde el servidor IRIS por medio de Obspy, al igual que los registros del SSN, se obtuvieron en formato .sac y su procesamiento se hizo en el programa Geopsy.

#### 4.1.3. Revisión y exclusión de registros obtenidos.

Para poder realizar el procesamiento de los registros obtenidos, se consideran tres criterios de exclusión, esto con el fin de obtener resultados con un rango de error menor.

El primer criterio fue considerar solo los registros donde se apreciará una llegada clara de ondas P y S, y que además la relación señal ruido fuera mayor a 2, como se muestra en la Figura 4-2, lo anterior para evitar el procesamiento de señales de ruido en lugar de señales de sismos.



**Figura 4-2 Sismograma registrado el 24 de diciembre del 2013 por la estación CDGU en el estado de Jalisco.**

Lo segundo fue acotar la distancia entre el epicentro de los eventos registrados y la ubicación de las estaciones sismológicas, aquí en algunos casos se consideró una distancia máxima de 100 km y en otros fue de 50 km, ya que si se consideraban distancias mayores solo se obtenían lecturas de ruido ambiental. Y finalmente el tercer criterio fue tomar en cuenta solo eventos de sismos corticales ocurridos dentro del Eje Neovolcánico, desde luego registrados por estaciones dentro de la zona.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos del análisis de registros de eventos sísmicos, también se obtuvieron registros de ruido ambiental para cada estación, al menos tres para cada una, estos fueron tomados aleatoriamente, con una duración de 10 minutos cada uno.

#### **4.2. Determinación de los efectos de sitio en la zona de estudio mediante la técnica HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio).**

Después de obtener los registros sísmicos y de ruido ambiental, se aplicó la técnica de relación espectral horizontal a vertical HVSR a cada uno. Esta relación se calcula dividiendo el espectro de la componente horizontal por el espectro de la componente vertical, ecuación 2 (Nakamura, 2019). Lo anterior se hizo con ayuda del programa de análisis de señales Geopsy, donde se procesaron los registros obtenidos de las diferentes herramientas disponibles.

##### **4.2.1. Procesamiento de registros de sismos.**

Se realizó el procesamiento de los registros instrumentales elegidos utilizando el software Geopsy de la siguiente manera:

- A cada registro se le hizo una corrección de línea base y se le quitó la tendencia. Se aplicó un filtro Butterworth de 4 polos, no causal, en el intervalo de 0.1 a 25 Hz.

- Se seleccionaron diferentes longitudes de ventana de al menos 2 s a partir de la onda S, incluyendo las partes más enérgicas de los registros.
- Se aplicó la transformada de Fourier a cada registro para pasarlo al dominio de la frecuencia. Una vez hecho esto, se hizo un proceso de suavizado a cada uno de los espectros mediante el filtro Konno y Omachi, aplicando la ecuación 9.

Donde  $f_c$  es la frecuencia central a la que se realiza el suavizado y  $b$  es un coeficiente de suavizado inversamente proporcional al ancho de banda,  $b = 20$  (Zhu et al., 2020).

- Después, se aplicó la técnica HVSR ecuación 2 utilizando las herramientas disponibles en el software Geopsy.

#### 4.2.2. **Procesamiento de registros de ruido ambiental.**

Análogamente se realizó el procesamiento de los registros de ruido ambiental obtenidos utilizando el software Geopsy de la siguiente manera:

- A cada registro de ruido se le hizo una corrección de línea base y se le quitó la tendencia. Se aplicó un filtro Butterworth de 4 polos, no causal, en el intervalo de 0.1 a 25 Hz.
- En este caso se selecciona una longitud de ventana desde el tiempo inicial  $T_0$  hasta el final.
- También se aplicó la transformada de Fourier a cada registro para pasarlo al dominio de la frecuencia. Una vez hecho esto, se hizo un proceso de suavizado a cada uno de los espectros mediante el filtro Konno y Omachi.
- Finalmente se aplicó la técnica HVSR, ecuación 2, utilizando las herramientas disponibles en el software Geopsy.

Se realizó el análisis para cada registro, al menos 3 por cada estación, y se obtuvo una curva HVSR promedio, una para los registros de eventos sísmicos y otra para los registros de ruido ambiental.

#### **4.2.3. Identificación de la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) y el factor de amplificación ( $A_0$ ).**

Para la identificación de los valores pico en las curvas HVSR, se consideraron los criterios recomendados por Bard et al. (2004), quienes mencionan que puede presentarse una gráfica cuando hay “un pico claro” o varios casos en donde no es claro.

- a) El caso de pico claro se presenta cuando la curva H/V presenta un pico H/V único evidente, que se puede apreciar a simple vista, Figura 4-3, esta propiedad se relaciona con el hecho de que, en ninguna otra banda de frecuencia, la amplitud H / V exhibe otro pico "claro" que satisfaga los mismos criterios. Para verificar si se cumple lo anterior, presentan las siguientes características cuantitativas que se deben de satisfacer:

Condiciones de amplitud:

- Existe una frecuencia  $f$  que se encuentra entre  $f_0/4$  y  $f_0$ , tal que  $A_0/A_{H/V} > 2$ .
- Existe una frecuencia  $f^*$  que se encuentra entre  $f_0$  y  $4*f_0$ , tal que  $A_0/A_{H/V} > 2$ .
- $A_0/A_{H/V} > 2$ .

Condiciones de estabilidad.

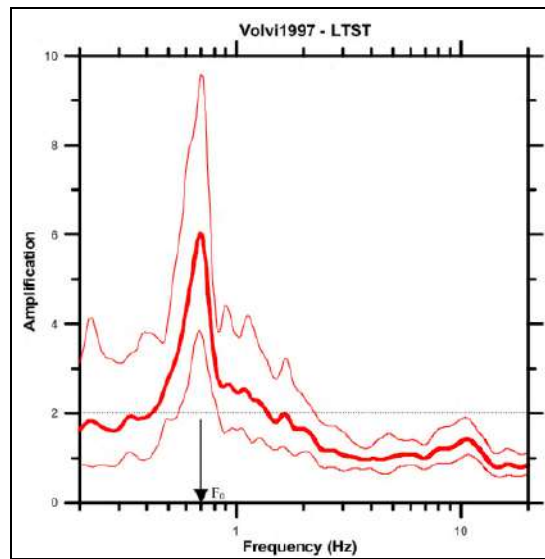
- El pico debe aparecer a la misma frecuencia (dentro de un porcentaje  $\pm 5\%$ ) en las curvas H/V correspondientes a la media + y - una desviación estándar.
- $\sigma_f$  menor que un umbral dependiente de la frecuencia  $\varepsilon(f)$ .
- $\sigma_A(f_0)$  menor que un umbral dependiente de la frecuencia  $\theta(f)$ .

Ver nomenclatura de parámetros en Tabla 4-1.

**Tabla 4-1 Definiciones de parámetros.**

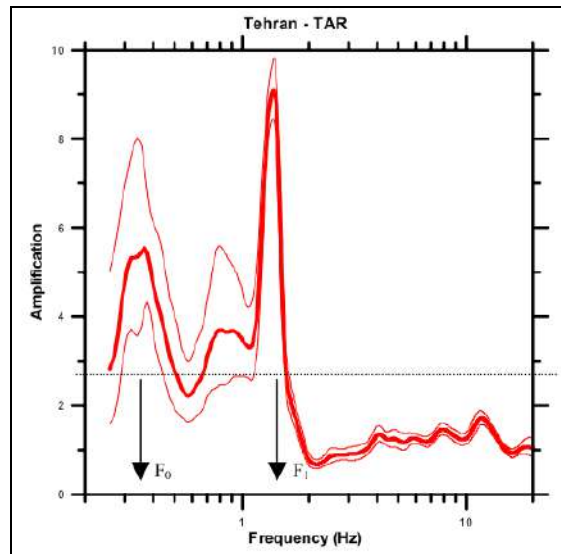
$f_0$	Frecuencia piso H/V
$f$	Frecuencia entre $f_0/4$ y $f_0$ , tal que $A_0/A_{H/V} > 2$ .
$f^+$	Frecuencia entre $f_0$ y $4*f_0$ , tal que $A_0/A_{H/V} > 2$ .
$A_0$	Amplitud pico H/V en la frecuencia $f_0$
$A_{H/V}$	Curva de amplitud H/V en la frecuencia $f$
$\sigma_f$	Desviación estándar de la frecuencia pico H/V ( $f_0 \pm \sigma_f$ )
$\sigma_A$	Desviación estándar de $A_{H/V}$

Si para un sitio las curvas H / V cumplen al menos 5 de los 6 criterios, entonces el valor  $f_0$  puede considerarse como una estimación muy confiable de la frecuencia fundamental. Y si sumado a esto, la amplitud máxima  $A_0$  es mayor que 4, no hay duda que existe una discontinuidad aguda con un gran contraste de impedancia (Bard et al., 2004).



**Figura 4-3 Ejemplo de curva H/V con un pico evidente, y además cumple con los 6 criterios ya citados (Bard et al., 2004).**

b) Cuando los picos no son claros pueden presentarse varios casos, el primero es cuando se presentan picos agudos de origen industrial, Figura 4-4. Esto ocurre principalmente en sitios urbanizados, como grandes ciudades, donde los picos son generados principalmente por maquinaria pesada. Estas perturbaciones se pueden reconocer por dos características, la primera es que pueden ser percibidas a varios kilómetros de distancia y la segunda es que como la fuente no es del todo permanente, los espectros de Fourier originales deben presentar picos agudos (Bard et al., 2004).



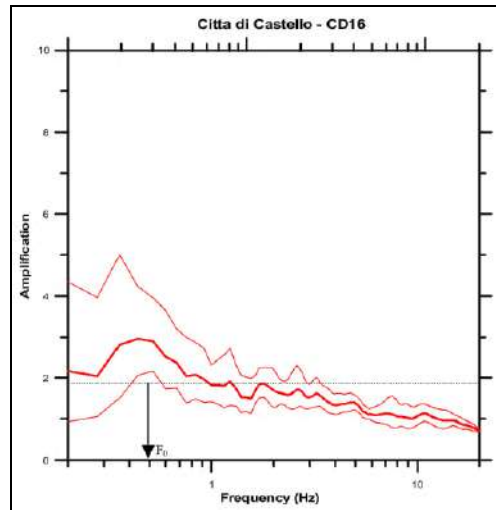
**Figura 4-4 Ejemplo de curva H/V con picos agudos de origen industrial (Bard et al., 2004).**

c) Picos de baja frecuencia poco claros, Figura 4-5. Hay varios factores necesarios para que se presente este caso, donde puede presentarse un pico de baja frecuencia difuso y poco claro o un pico amplio que no satisface los criterios mencionados, sobre todo los de amplitud. Puede ocurrir cuando en el sitio hay contrastes de impedancia moderados, también por registros del viento cuando sopla, cuando se presenta algún fenómeno



meteorológico, por una mala conexión a la red, por vibraciones leves de ruido ambiental o incluso por parámetros de suavizado erróneos.

Para discernir entre todas estas posibilidades se pueden llevar a cabo una serie de pruebas. Considerar la geología del sitio: si está sobre roca, es probable que el pico difuso de baja frecuencia sea un artefacto; si se trata de depósitos sedimentarios, pueden existir efectos de baja frecuencia, ya sea por capas superficiales muy blandas o por depósitos rígidos pero gruesos; consultar los boletines meteorológicos correspondientes al período de registro y las fichas de campo de medición; comprobar el sensor de frecuencia de corte del sensor utilizado; verificar los parámetros de suavizado entre otras (Bard et al., 2004).



**Figura 4-5 Ejemplo de curva H/V con picos de baja frecuencia poco claros (Bard et al., 2004).**

- d) Pico múltiple o amplio, Figura 4-6. En ocasiones se pueden presentar varios picos o un pico amplio, donde posiblemente no cumplirán con algunos de los criterios ya mencionados. Cuando se presenta algo así lo primero a realizar es modificar el coeficiente de suavizado, cuando se tenga un pico amplio, se recomienda disminuir el ancho de banda de suavizado; y cuando

hay múltiples picos, es necesario hacer lo contrario, aumentar el ancho de banda de suavizado (Bard et al., 2004).

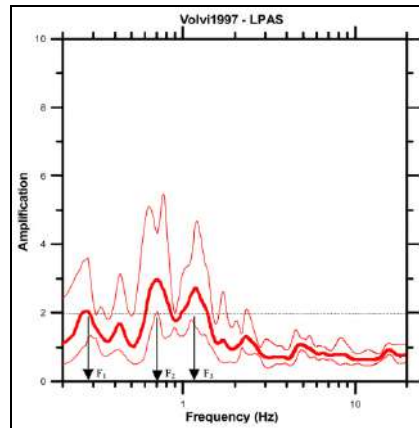


Figura 4-6 Ejemplo de curva H/V con múltiples picos (Bard et al., 2004).

- e) Dos picos, Figura 4-7. Pueden presentarse dos picos que cumplan con los criterios mencionados, aunque es algo muy inusual, esto puede ocurrir porque existen dos contrastes de impedancia en diferentes escalas. Para cerciorarse que realmente sea el caso, se debe de revisar la geología del lugar, también se pueden procesar los datos con diferentes coeficientes de suavizado y se debe verificar que tanto  $f_0$  como  $f_1$  sean lo suficientemente diferentes para cumplir con los criterios establecidos.

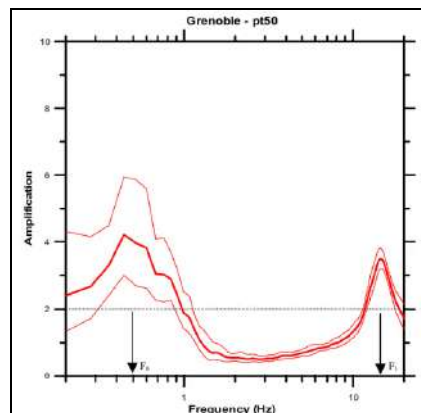


Figura 4-7 Ejemplo de curva H/V con dos picos (Bard et al., 2004).

Respecto a la frecuencia fundamental de vibración, se consideró la frecuencia máxima ( $f_p$ ) en lugar de la frecuencia correspondiente al primer pico de la gráfica ( $f_1$ ) de acuerdo a las recomendaciones presentadas por Zhu et al. (2020).

Para interpretar las curvas H/V, en específico la frecuencia fundamental  $f_0$  en términos de las características del sitio, dependiendo del caso que se presente Bard et al. (2004) hacen las siguientes sugerencias:

- Cuando el pico es evidente y se ha verificado que no sea de origen industrial, es muy seguro que se presenten contrastes de impedancia a una determinada profundidad en la zona de estudio, y además haya amplificaciones del movimiento del terreno. La probabilidad de que la amplificación del sitio real para los espectros de Fourier alrededor de la frecuencia fundamental  $f_0$ , sea mayor que la amplitud  $A_0$  es casi del 80%.
- Si se presentan dos picos claros  $f_0$  y  $f_1$ , que cumplan con los criterios establecidos, puede ser que la velocidad superficial sea baja, que el lecho de roca profunda sea duro o que existan en diferentes escalas dos grandes contrastes de impedancia, por lo que la amplificación puede darse desde  $f_0$  hasta más allá de  $f_1$ .
- Si las frecuencias son de origen industrial asociados a picos agudos se debe de descartar totalmente éste análisis.
- Cuando  $f_0 < 1$ , es decir un pico poco claro, lo mejor es no hacer interpretaciones cuantitativas sobre la curva H/V, aunque puedan existir amplificaciones de baja frecuencia, lo más recomendable es realizar nuevas mediciones de forma continua con estaciones equipadas con sensores de banda ancha, incluyendo una en un sitio de referencia cercano.
- Si la curva presenta un pico amplio, independientemente del procesamiento, no es fácil caracterizar la frecuencia máxima en ese punto. Es posible que la anchura sea debida a la presencia de una interfaz en una

pendiente subterránea entre las capas más blandas y más duras. Será necesario verificar si hay picos más claros en los alrededores y si las frecuencias asociadas están dentro del rango de frecuencia del pico amplio, si se cumplen las condiciones dadas, es muy probable que existan heterogeneidades laterales significativas.

- Si los valores de amplitud de la curva H/V son muy diferentes de 1 en un rango de frecuencia grande, es muy probable que las mediciones sean malas, por lo tanto, deben de repetirse.
- Si no hay picos visibles, es decir si los valores de la curva H/V están entre 0.5 y 2, es posible que el suelo subyacente no presente contrastes de impedancia a cualquier profundidad. Esto no significa que no haya amplificación del sitio, a menos que se trate de un suelo rocoso.

Tomando en cuenta lo anterior se analizaron e interpretaron las curvas obtenidas para cada una de las estaciones sismológicas,

La técnica HVSR no permite realizar estimaciones confiables del factor de amplificación  $A_0$  (Lozano et al., 2009; Mucciarelli & Gallipoli, 2001; Perron et al., 2018), pero se tomaron las curvas obtenidas como referencia para compararlas con los resultados obtenidos en la siguiente etapa de la metodología.

#### **4.3. Determinación de los efectos de sitio en la zona de estudio mediante la técnica SSR (Standard Spectral Ratio).**

Después de obtener los registros sísmicos, se aplicó la técnica de relación espectral estándar SSR. Esta es la relación espectral de un sitio sedimentario con respecto a un sitio de referencia del lecho rocoso (Mittal et al., 2013). En este caso fue complicado encontrar datos que cumplieran con los siguientes criterios establecidos, ser registros grabados por estaciones ubicadas tanto en un sitio de roca como en un sitio de suelo blando, y que además la distancia epicentral respecto de la ubicación de las estaciones fuese pequeña. Debido a lo anterior y a

la poca disponibilidad de datos, únicamente se realizó el análisis a eventos sísmicos registrados en dos estaciones sismológicas pertenecientes a la red de Instituto de Ingeniería de la UNAM. Lo anterior se hizo con ayuda del programa de análisis de señales Degtra A4, donde se procesaron los registros obtenidos con las diferentes herramientas disponibles.

#### 4.3.1. Identificación de registros a analizar.

Con base en el mapa geológico presentado por Ferrari et al. (2005), Figura 4-8, se identificaron aquellas estaciones sismológicas ubicadas en sitios considerados como roca y suelo blando.

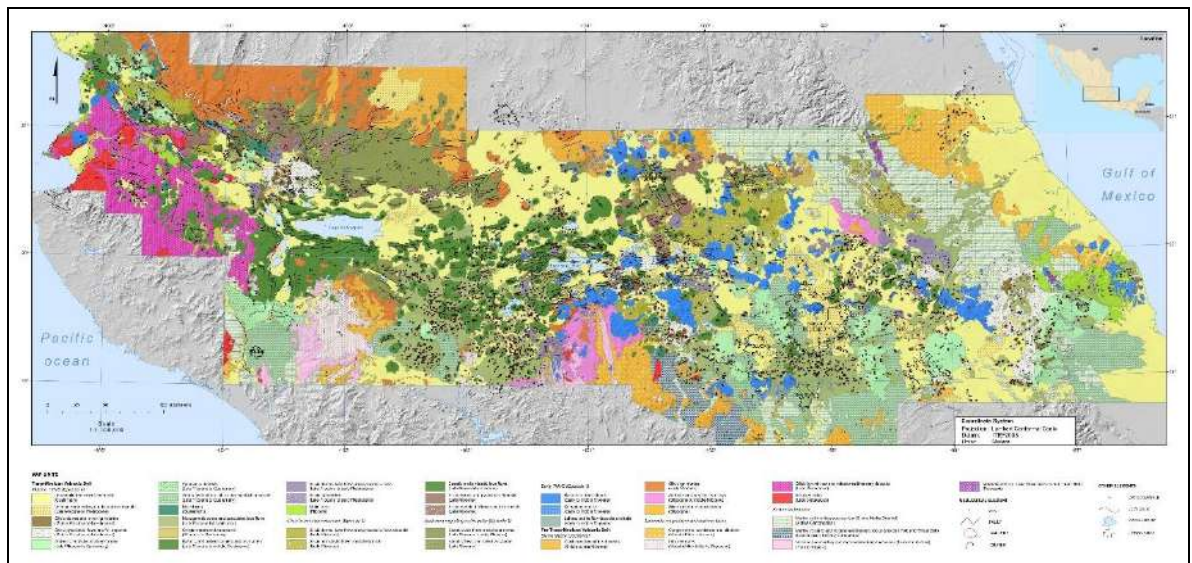


Figura 4-8 Geología en el Eje Neovolcánico, Ferrari et al. (2005).

Posteriormente, se identificaron los sismos corticales registrados simultáneamente en sitios de roca y suelo blando, separados una distancia pequeña en comparación con la distancia epicentral. Se tomó como referencia una relación del 10% entre estas distancias.

#### 4.3.2. Procesamiento de registros.

Para la aplicación de la técnica SSR, fue necesario realizar una corrección instrumental de los registros identificados en el punto anterior. Esto se realizó en el software SAC (Seismic Analysis Code), por medio de los archivos de polos y ceros que permiten definir la función de transferencia para los sensores ubicados en cada una de las estaciones sismológicas analizadas.

Una vez hecha la corrección instrumental, los registros fueron procesados en el software Degtra A4, se seleccionó una ventana a partir de la onda S, se aplicó la transformada de Fourier para pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, considerando un factor de suavizado igual a 6 y 5% de taper.

De acuerdo al manual realizado por Ordaz et al. (2005)  $F_s$  es el factor que se usó para suavizar el espectro de amplitudes. La amplitud suavizada para la frecuencia  $f$ ,  $A_s(f)$ , se calcula como:

$$[A_s(f)]^2 = \frac{1}{N} \sum [A(f)]^2 \quad (11)$$

Donde la suma se efectúa entre las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$  dadas por:

$$f_1 = f * 2^{\left(-\frac{1}{2f_s}\right)} \quad (12)$$

$$f_2 = f * 2^{\left(\frac{1}{2f_s}\right)} \quad (13)$$

Y  $N$  es el número de muestras comprendido entre  $f_1$  y  $f_2$ .

Antes de hacer la transformada rápida, Degtra A4 aplica un "tapering" cosenoidal cuya longitud, al inicio y al final de la señal, es una fracción de su longitud total. Aquí debe especificarse esta fracción en %.

Este análisis se aplicó a los registros que cumplían con las condiciones dadas en el punto 4.3.1, se obtuvo una curva SSR para la relación espectral entre

la componente horizontal Norte-Sur y otra para la relación entre la componente Este-Oeste, para después obtener una curva SSR promedio de las dos anteriores.

#### **4.3.3. Identificación de la frecuencia fundamental ( $f_0$ ) y el factor de amplificación ( $A_0$ ).**

La identificación de la frecuencia fundamental del terreno se hizo siguiendo el mismo procedimiento mencionado en el punto 4.2.3. En este caso, la técnica SSR permite obtener una estimación precisa y confiable del factor de amplificación, que se tomó como la ordenada asociada a la frecuencia fundamental  $f_0$ .

#### **4.3.4. Comparación de resultados.**

Se realizó una comparación de los resultados obtenidos con los métodos HVSR y SSR, en términos de la frecuencia fundamental de vibración. Dado que el método HVSR no permite realizar una estimación confiable del factor de amplificación, no es posible realizar una comparación absoluta de esta variable con los resultados obtenidos con el método SSR. No obstante, se usaron las curvas obtenidas para realizar una comparación relativa con estudios previos. En esta comparativa también se incluyeron los resultados obtenidos del análisis de ruido ambiental que se realizó por medio de la metodología HVSR.

Adicionalmente, se calculó la velocidad promedio de la onda de corte  $V_{S30}$ , aplicando la ecuación 10, la cual está en términos de la frecuencia pico  $f_{peak}$  y la amplitud máxima  $A_{peak}$ . Lo anterior, se hizo con el fin de obtener otro parámetro importante en la caracterización de un sitio.

#### **4.4. Análisis de la variación espacial de los efectos de sitio en la zona de estudio a través de mapas de contorno.**

Normalmente los mapas de contorno se hacen en estudios de microzonificación, en este caso se obtuvieron para visualizar la variación de la

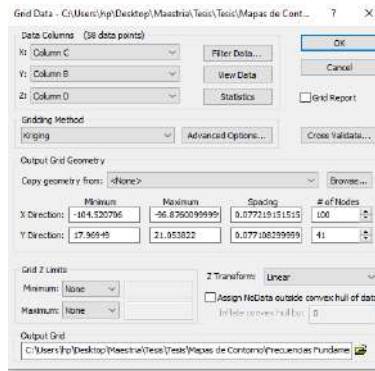
respuesta de sitio a gran escala en la zona de estudio. Se tienen estaciones sismológicas ubicadas en varios puntos dentro del Eje Neovolcánico, sin embargo, no cubren toda el área de manera que, para obtener la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$ , el factor de amplificación  $A_0$  y la velocidad promedio de la onda de corte  $V_{S30}$  en zonas donde no se tienen muestras fue necesario aplicar una técnica de interpolación. Se usó Kriging para cumplir con este propósito, la cual permite estimar valores desconocidos en puntos específicos del espacio utilizando valores de datos de ubicaciones conocidas (De Rubeis et al., 2005). En este caso se tienen datos conocidos (frecuencia fundamental  $f_0$ , factor de amplificación  $A_0$  y velocidad  $V_{S30}$ ) en puntos específicos (ubicación de las estaciones en coordenadas) entonces se aplicó la interpolación de Kriging para obtener los valores de  $f_0$ ,  $A_0$  y  $V_{S30}$  en puntos no muestreados.

#### **4.4.1. Obtención de mapas de contorno.**

Considerando la ubicación de los resultados en términos de la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$ , el factor de amplificación  $A_0$  y la velocidad promedio de la onda de corte  $V_{S30}$  se obtuvieron mapas de contorno mediante una interpolación Kriging en el software Surfer. Para poder procesar los datos en Surfer, fue necesario realizar lo siguiente:

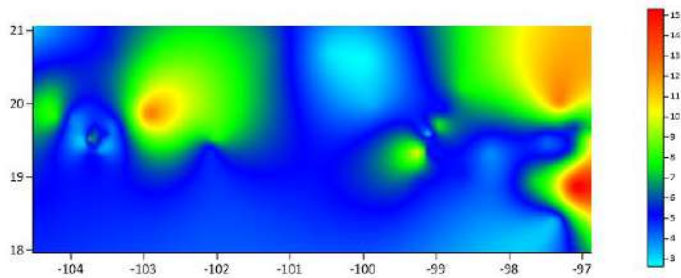
- Hace una tabla base de datos en Excel, considerando la latitud y longitud, la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$ , el factor de amplificación  $A_0$  y la velocidad promedio de onda de corte  $V_{S30}$  respectivos a cada estación, ver ANEXO B Tabla B-1.
- Ya importados los datos en el programa se generó un grid, para hacerlo se aplicó la interpolación Kriging, Figura 4-9.





**Figura 4-9 Generación de grid en programa Surfer 16.**

- De cada grid generado se obtuvieron los mapas de contorno, los cuales están en código de colores y en función de las coordenadas de cada punto, se muestra un ejemplo en la Figura 4-10.



**Figura 4-10 Mapa de contorno obtenido en programa Surfer 16.**

- Finalmente, se superpusieron los mapas de contorno en un mapa de la República Mexicana donde además se delimitó el área del Eje Neovolcánico.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis, así como una interpretación y discusión de los mismos. Se muestran las peculiaridades de los registros de eventos sísmicos analizados, en total 282. También se presentan las características de las estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio de las que se obtuvieron los registros sísmicos; se analizaron e interpretaron las gráficas HVSR y SSR, para ello el Eje Volcánico se dividió en cuatro zonas, dada su gran extensión en territorio; por último se muestran los mapas de contorno en términos de la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$ , el factor de amplificación  $A_0$  y de la velocidad promedio de la onda de corte a 30 m de profundidad  $V_{S30}$ .

### 5.1. Análisis de la distribución espacial de registros instrumentales de sismos corticales ocurridos en la zona de estudio.

Como ya se mencionó en el apartado 4.1, para cumplir con el desarrollo de este proyecto de investigación fue necesario conformar una base de datos de los sismos corticales ocurridos en la zona en estudio, así como de las estaciones sísmicas que pudieran encontrarse al interior del Eje Neovolcánico mexicano.

Se obtuvo una base de datos de sismos corticales, contiene más de 22000 registros de eventos ocurridos entre los años 2003 y 2021, con magnitudes que van de 1 hasta 7.6, y profundidades hipo-centrales de 1 km a 174 km, Tabla 5-1.

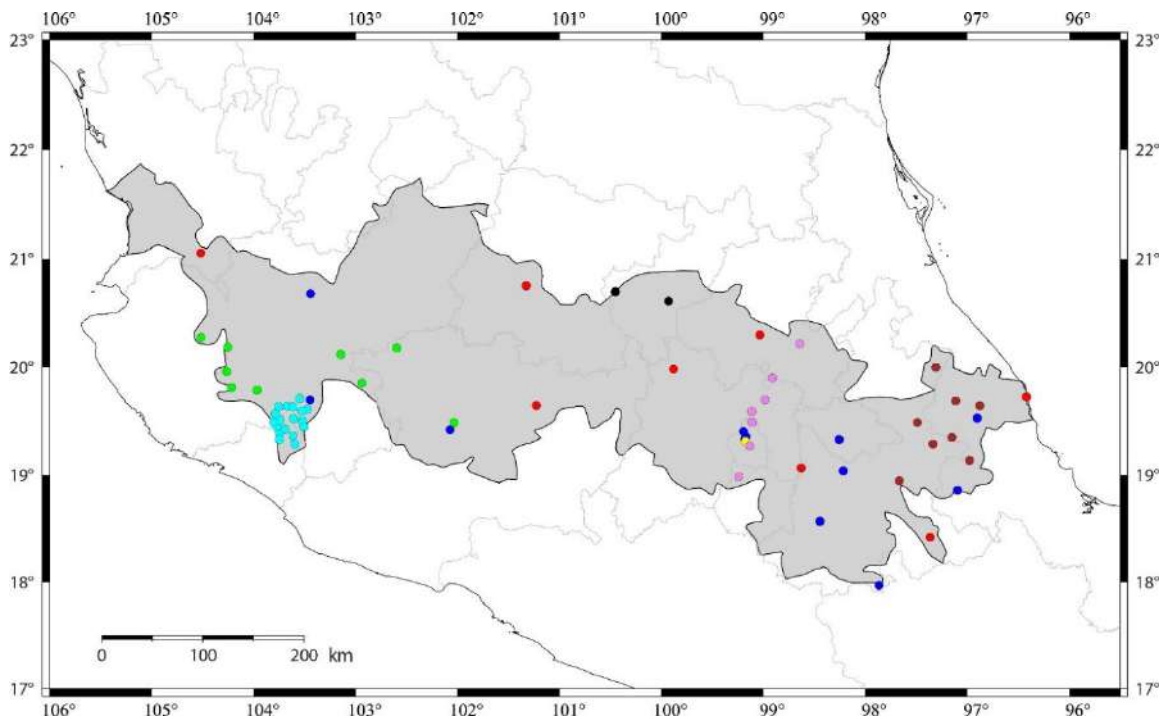
**Tabla 5-1 Base de datos de sismos corticales registrados en la República Mexicana.**

Fecha UTC	Latitud	Longitud	Profundidad (km)	DISTANCIA (km)	Magnitud*
03/01/2003	18.83	-98.56	8	188.97	3.3
04/01/2003	19.16	-103.56	89	396.06	3.9
07/01/2003	18.17	-98.5	50	248.61	3.6
08/01/2003	18.01	-105.78	33	657.73	3.6
08/01/2003	19.18	-98.97	13	130.91	3

16/01/2003	19.19	-98.94	15	132.47	3.1
17/01/2003	18.06	-100.66	57	229.08	3.8
19/01/2003	18.81	-101.73	79	233.69	3.9
21/01/2003	18.1	-98.84	74	236.45	3.5
22/01/2003	18.6	-104.22	9	480.55	7.6
22/01/2003	18.57	-104.3	10	489.61	4.7
22/01/2003	18.61	-104.42	5	500.12	5.2
22/01/2003	18.51	-104.48	5	509.72	4
...	...	...	...	...	...

\*Magnitud reportada por el servicio Sismológico Nacional y por la dependencia que registro el evento.

Para cada red se tiene un número determinado de estaciones localizadas dentro del Eje Neovolcánico. Se analizaron los registros instrumentales de ocho redes sismológicas. Para el Servicio Sismológico Nacional se tiene un total de 9 estaciones dentro del Eje Neovolcánico. La red MASE cuenta con 242 estaciones, de las que están ubicadas dentro del Eje, solo en 7 se obtuvieron registros sísmicos. La red MARS dispone de 8 estaciones dentro de la zona de estudio.

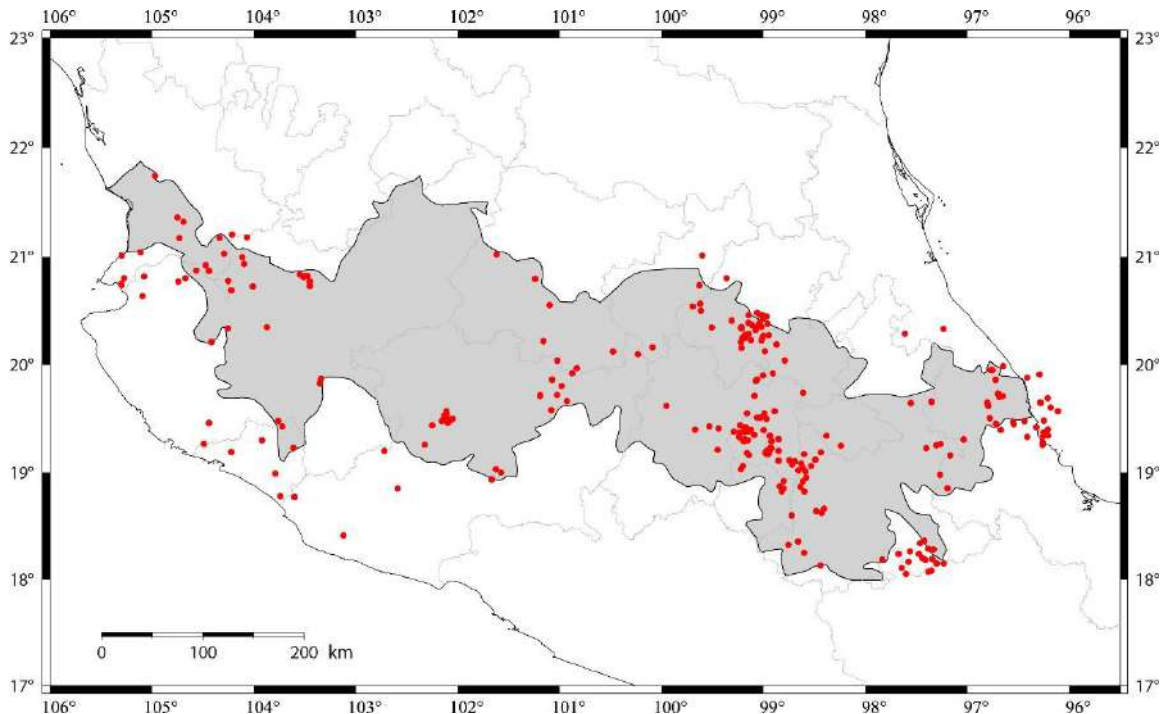


**Figura 5-1 Localización de estaciones sismológicas utilizadas en este trabajo, Círculos rojos: estaciones red del SSN; Círculos violetas: estaciones red MASE; Círculos verdes: estaciones red MARS; Círculos cian: estaciones red CODEX; Círculos naranja: estaciones**

**red GECO; Círculos negros: Red CGEO; Círculos amarillos: estaciones red del CENAPRED; Círculos azules; red estaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM.**

La red CODEX cuenta con 22 estaciones, pero solo en 18 de ellas se encontraron registros instrumentales de sismos corticales. Para la red GECO se analizaron los registros obtenidos de 8 estaciones ubicadas dentro del Eje. La Red Sísmica del Estado de Querétaro (ReSiPEQ), del Centro de Geociencias de la UNAM (CGEO) opera una estación, la JQRG anteriormente ubicada en Juriquilla, Qro; pero desde febrero del 2020 la estación se sitúa en el municipio de Tequisquiapan, ahora con el código TXMV. En el caso de la red del CENAPRED se analizaron los registros obtenidos de dos de sus estaciones. Finalmente se analizaron los registros de 12 estaciones pertenecientes a la red del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

En total se han utilizado los registros sísmicos de 66 estaciones sismológicas desplantadas dentro del Eje Neovolcánico mexicano, cuyas localizaciones se pueden observar en el mapa presentado en la Figura 5-1.



**Figura 5-2 Localización de epicentros de eventos sísmicos analizados en este estudio.**

Posteriormente, se buscaron los eventos sísmicos que hubieran ocurrido al interior del Eje Neovolcánico mexicano, teniendo en cuenta las consideraciones explicadas en secciones previas, además dada la poca disponibilidad de registros para ciertas estaciones, también se consideraron eventos ocurridos a 50 km de la periferia de la zona de estudio. En el ANEXO A, de la Tabla A-1 a la Tabla A-8 se muestran todos los registros de eventos analizados, los cuales fueron un total de 282, y que se tomaron en consideración desde el año 1986 hasta el 2021; las magnitudes de estos iban desde  $M = 2.4$  hasta  $M = 4.8$ , esta magnitud que se presenta es la que reporta el Servicio Sismológico Nacional. En la Figura 5-2 se muestran las ubicaciones de los epicentros de todos los sismos analizados en este trabajo.

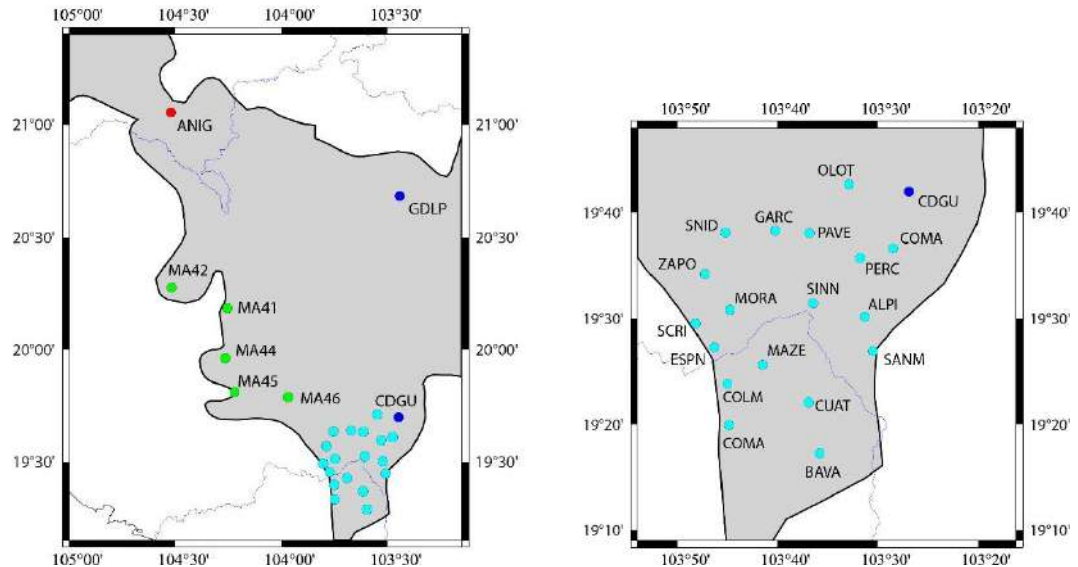
También se analizaron registros de ruido ambiental para las estaciones de todas las redes sismológicas presentadas, excepto de la red del CENAPRED y del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Los registros fueron obtenidos aleatoriamente, con una duración de 10 min cada uno.

## **5.2. Determinación de los efectos de sitio en la zona de estudio mediante la técnica HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio).**

En cada gráfica se presentan las curvas HVSR promedio, comparando la curva de ruido ambiental contra la curva de eventos sísmicos. En el eje de las abscisas se tiene la frecuencia en un rango de 0.1 a 25 Hz y en el eje de las ordenadas la relación espectral HVSR. La zona de estudio comprende un área bastante extensa, por lo que los resultados del análisis se agruparon en cuatro zonas, dependiendo de la ubicación de cada estación, similar a lo realizado por (Pérez-Moreno et al., 2021).

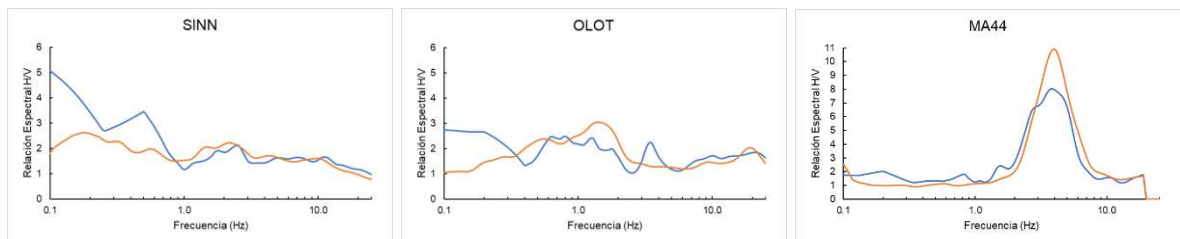
- i. Oeste del Eje Neovolcánico. En esta zona varios sistemas de fallas interceptan al eje, entre los más importantes están los sistemas Tepic-Zacoalco, Colima y Chapala (Ferrari et al., 2012). En el transcurso de los años

se han presentado varios sismos de gran importancia en esta zona del Eje, por ejemplo: Sismo de magnitud 7.2 en Ameca Jalisco en el año de 1567 (Suter, 2015), el 2 de octubre de 1847 sismo de  $M_i=5.7$  en el Graben de Chapala (Suter, 2018) y el 11 de febrero de 1875 en el noroeste de Guadalajara se presentó un sismo con una magnitud  $M=7.1$  (Zuñiga, 2010).

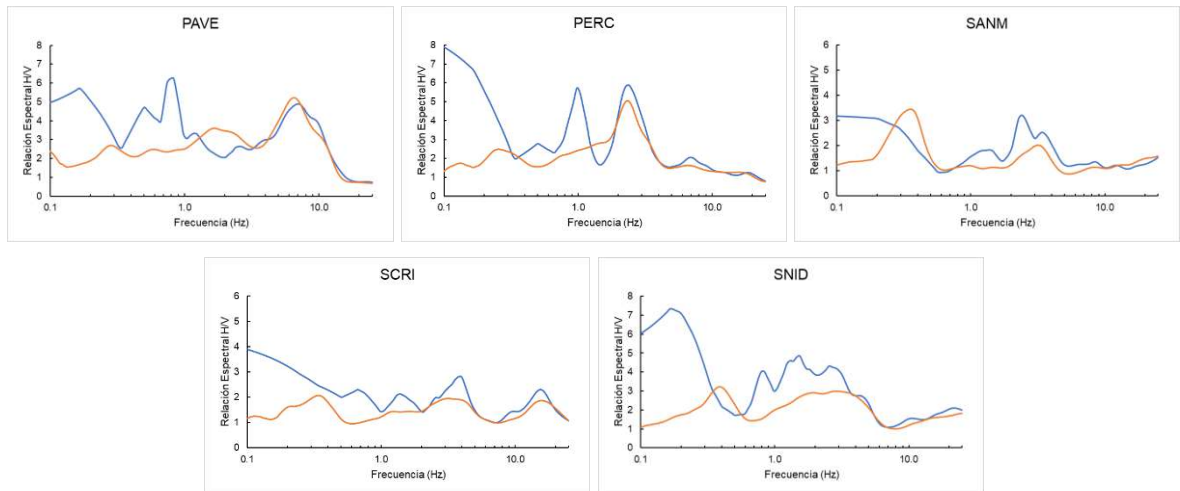


**Figura 5-3 Estaciones localizadas en la zona oeste del Eje Neovolcánico.**

En esta región se tiene una estación del SSN, la red CODEX, una parte de las red MARS y dos estaciones de la red del Instituto de Ingeniería de la UNAM, las cuales se encuentran en los límites entre Colima y Jalisco, Figura 5-3. En la Figura 5-4 se muestran las curvas HVSR promedio obtenidas para esta zona.







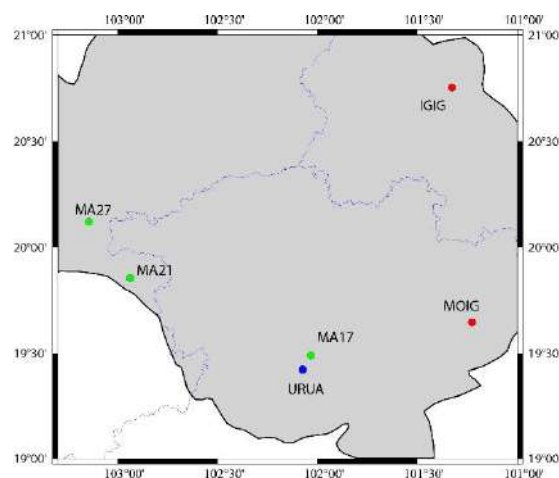
**Figura 5-4** Curvas promedio HVSR de la región oeste del Eje Neovolcánico. Línea azul H/V para registros sísmicos. Línea naranja H/V para registros de ruido ambiental.

- Para las estaciones SINN y OLOT Figura 5-4, las curvas de ruido ambiental y registros de sismos no presentan diferencias significativas, en ellas no hay picos visibles o al menos no están bien definidos, eso refleja un terreno rocoso firme, sin capas subyacentes que generen contrastes de impedancia significativos.
- En las estaciones MA44, MA45, ALPI, y GARC Figura 5-4, la respuesta de sitio para registros de sismos y de ruido ambiental es prácticamente la misma, las curvas presentan un pico, cuya amplitud se asemeja a lo que se conoce como el pico más claro, por lo que en estos puntos hay discontinuidades agudas con grandes contrastes de impedancia.
- En las estaciones GDLP y CDGU Figura 5-4, solo se obtuvieron relaciones HVSR para registros de sismos, en la primera hay un pico bastante claro en el rango de frecuencias de 1 a 1.5 Hz; en la segunda se aprecian dos picos que cumplen con las características mencionadas en el apartado 5.2.3.a), posiblemente debidos a la presencia de dos contrastes de impedancia de importancia, aquí se identificó la frecuencia fundamental de vibración en el pico de mayor valor, en un rango de 6.5 a 7 Hz.



- La estación MA41 en un intervalo de 5 a 6 Hz presenta un pico claro para ambas curvas, la obtenida de registros de ruido y la de registros de sismos, además presenta un pico en un rango de 0.9 a 1 Hz para la curva HVSR producto del análisis de registros sísmicos, el comportamiento anterior se podría atribuir a la existencia de dos contrastes de importancia significativos, sin embargo, en la curva de ruido no es posible apreciarlo, posiblemente a causa de que la energía asociada a un evento sísmico es mucho mayor respecto de la emitida por ruido ambiental.
- En la estación MA42, Figura 5-4, se observan varios picos, el más claro, donde se identificó la frecuencia fundamental fue en el rango de 1.5 a 2 Hz. La curva HVSR de la estación MA46 Figura 5-4, muestra al menos dos picos donde podría identificarse la frecuencia fundamental de vibración, pero de acuerdo a las recomendaciones de (Zhu et al., 2020), esta se tomó en una frecuencia de 3 Hz, donde la amplitud del pico es casi de 4.
- En BAVA y CANO Figura 5-4, se observan varios picos de baja frecuencia, pero entre los rangos de frecuencia de 0.35 a 0.45 y 0.3 a 0.4 se perciben picos con amplitudes de 3.5 y 4 respectivamente, los cuales podrían ser causados por la existencia de estratos con estas frecuencias de resonancia.
- Las estaciones ANIG, COLM y ESPN Figura 5-4, presentan curvas con picos visibles entre las frecuencias de 9 y 18 Hz, lo que se puede interpretar como la existencia de una capa delgada de sedimentos con esas frecuencias naturales de vibración.
- En las estaciones COMA, CUAT, MAZE, MORA y ZAPO Figura 5-4, las curvas para los registros de ruido ambiental no presentan picos o no son del todo claros, en cambio las curvas para las señales de sismos muestran picos en diferentes rangos de frecuencia, sabemos que la energía asociada al ruido ambiental no es comparable a la de un sismo, sin embargo, aquí parece que hay diferencias en las características de las señales asociadas a distintos tipos de eventos.

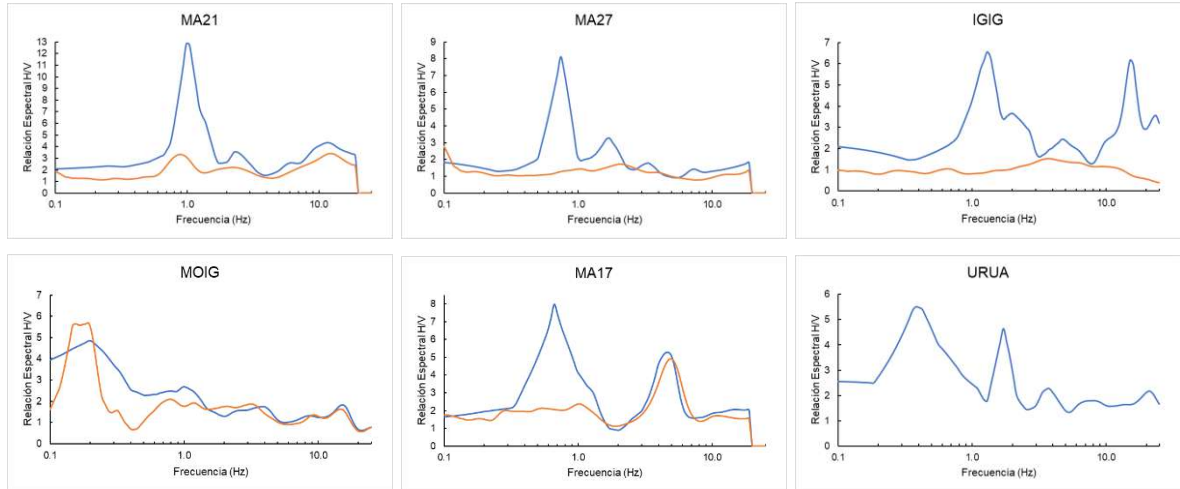
- Para las estaciones PAVE y PERC Figura 5-4, las curvas obtenidas del análisis de registros sísmicos presentan dos picos, y en las curvas HVSR correspondientes al ruido ambiental solo se observa uno, las frecuencias fundamentales de vibración se tomaron donde los picos para ambos casos coinciden, esto fue en las frecuencias 6.93 y 2.4 Hz respectivamente, con amplitudes de 4.9 y 5.9 aproximadamente.
  - La estación SANM Figura 5-4, en la curva basada en registros sísmicos presenta un pico en la frecuencia de 2 Hz, y para la curva obtenida de registros de ruido se observan dos picos, tomando la frecuencia fundamental de vibración en 0.4 Hz aproximadamente.
  - Para concluir en esta zona, en las curvas HVSR de las estaciones SCRI y SNID Figura 5-4, hay varios picos de baja frecuencia, estos podrían interpretarse como de origen industrial, sin embargo, ambas estaciones están ubicadas en zonas rurales, por lo que es posible que en ambos casos se tengan contrastes de impedancia moderados.
- ii. Centro del Eje Neovolcánico. En esta zona se tienen pocas estaciones de medición, dos permanentes del Servicio Sismológico Nacional, la estación URUA del II-UNAM y de la red provisional MARS solo en tres estaciones se obtuvieron registros tanto de sismos como de ruido ambiental, Figura 5-5.



**Figura 5-5 Estaciones localizadas en la zona centro del Eje Neovolcánico.**

- Al observar la Figura 5-6 particularmente las estaciones MA21 y MA27, se aprecian diferencias entre las curvas HVSR de señales de ruido y las curvas HVSR obtenidas del procesamiento de señales sísmicas, en el primer caso no presentan picos visibles, son prácticamente planas, sin embargo, en el segundo caso las curvas muestran picos en diferentes rangos de frecuencia, esto se puede atribuir a que la energía asociada al ruido ambiental no es comparable a la de un sismo, por lo que se pueden apreciar diferencias en las características de las señales asociadas a distintos tipos de eventos.
- Para la estación IGIG Figura 5-6, la curva HVSR producto del análisis de registros de ruido ambiental es prácticamente plana, no hay picos visibles, por el otro lado, la curva HVSR obtenida a partir de registros sísmicos, presenta dos picos claros, el primero se identificó a una frecuencia de 1.3 Hz, esta se tomó como la frecuencia fundamental de vibración, y el segundo a 15.1 Hz, ambos picos podrían ser resultado de la existencia de dos contrastes de impedancia importantes en el suelo subyacente.
- En la estación MOIG Figura 5-6, las curvas de ruido ambiental y registros de sismos no presentan diferencias significativas, en ellas los picos no están bien definidos, lo que podría reflejar un terreno rocoso firme, sin capas subyacentes que generen contrastes de impedancia significativos.
- Para la estación MA17 Figura 5-6, se tiene un pico para ambas curvas alrededor de 5 Hz, además para la curva HVSR correspondiente a los registros de sismos se presenta un pico bastante claro alrededor 0.7 Hz, éste último podría interpretarse como un pico de origen industrial, pero al consultar la geografía de la zona se observa que la estación se localiza en un área rural; por lo anterior en este pico es donde se identificó la frecuencia fundamental de vibración.
- En el caso de la estación URUA Figura 5-6, se tiene un primer pico que es amplio, este se interpretó como de origen industrial, puesto que el

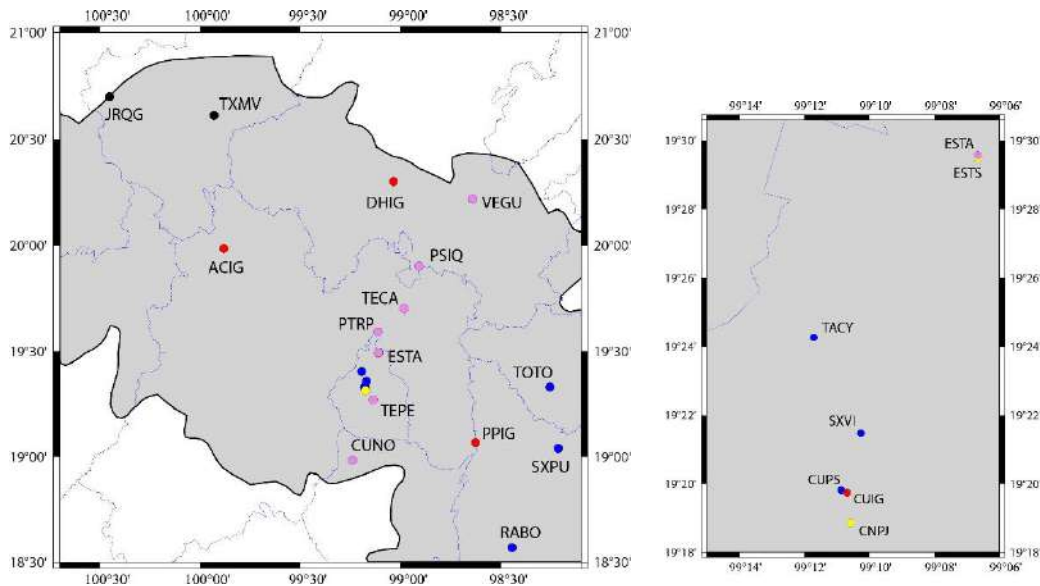
sismómetro se localiza en una zona urbanizada; el segundo pico es bastante claro, de 4.7 en el rango de frecuencias de 1.6 a 1.8 Hz.



**Figura 5-6 Curvas promedio HVSR de la región central del Eje Neovolcánico. Línea azul H/V para registros sísmicos. Línea naranja H/V para registros de ruido ambiental.**

iii. Centro-este del Eje Neovolcánico.

En esta zona se localizan algunos sistemas de fallas, por ejemplo el sistema Taxco-Querétaro activo en la parte norte del Eje, o el sistema Morelia-Acambay (Szykaruk et al., 2004). Además, anteriormente se han presentado eventos sísmicos de gran magnitud como el ocurrido en 1912 en la falla de Acambay que tuvo una magnitud  $M=7$  (Zuñiga, 2010).



**Figura 5-7 Estaciones localizadas en la zona del este central del Eje Neovolcánico.**

Aquí se localizan las redes CGEO, MASE y CENAPRED, y algunas estaciones del Servicio sismológico Nacional y del Instituto de Ingeniería de la UNAM, Figura 5-7.

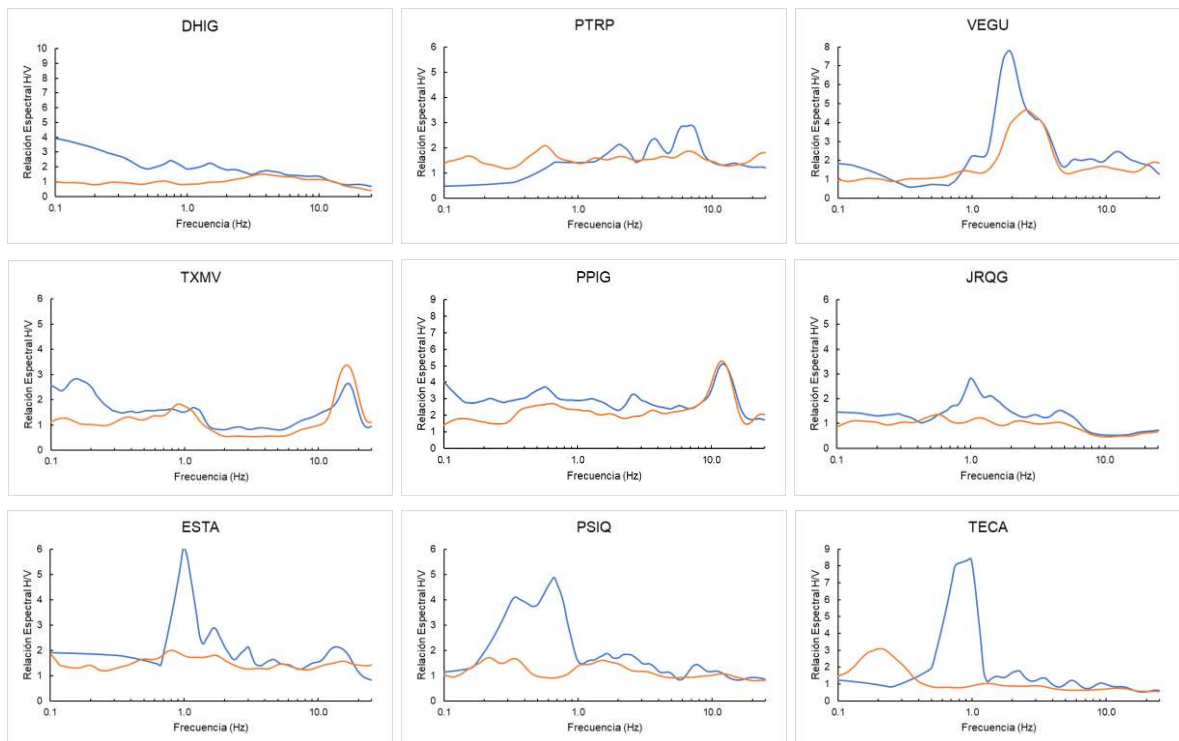
- En la estación DHIG Figura 5-8, las curvas de ruido ambiental y registros de sismos no presentan diferencias significativas, en ellas no hay picos visibles, eso refleja la existencia de un terreno rocoso firme, en donde no hay capas subyacentes que puedan generar contrastes de impedancia importantes.
- La estación PTRP Figura 5-8 presenta diferencias en sus curvas HVSR, para los registros de ruido la curva es plana, no hay picos visibles, en cambio la curva resultado del análisis de registros sísmicos presenta varios picos de baja frecuencia, los cuales podrían considerarse como de origen industrial, pero como la estación se localiza en una zona rural, estos pueden ser producto de la existencia de al menos dos contrastes de impedancia moderados en el suelo subyacente.
- En la estación VEGU Figura 5-8, la respuesta de sitio para registros de sismos y de ruido ambiental no presenta grandes diferencias, las curvas

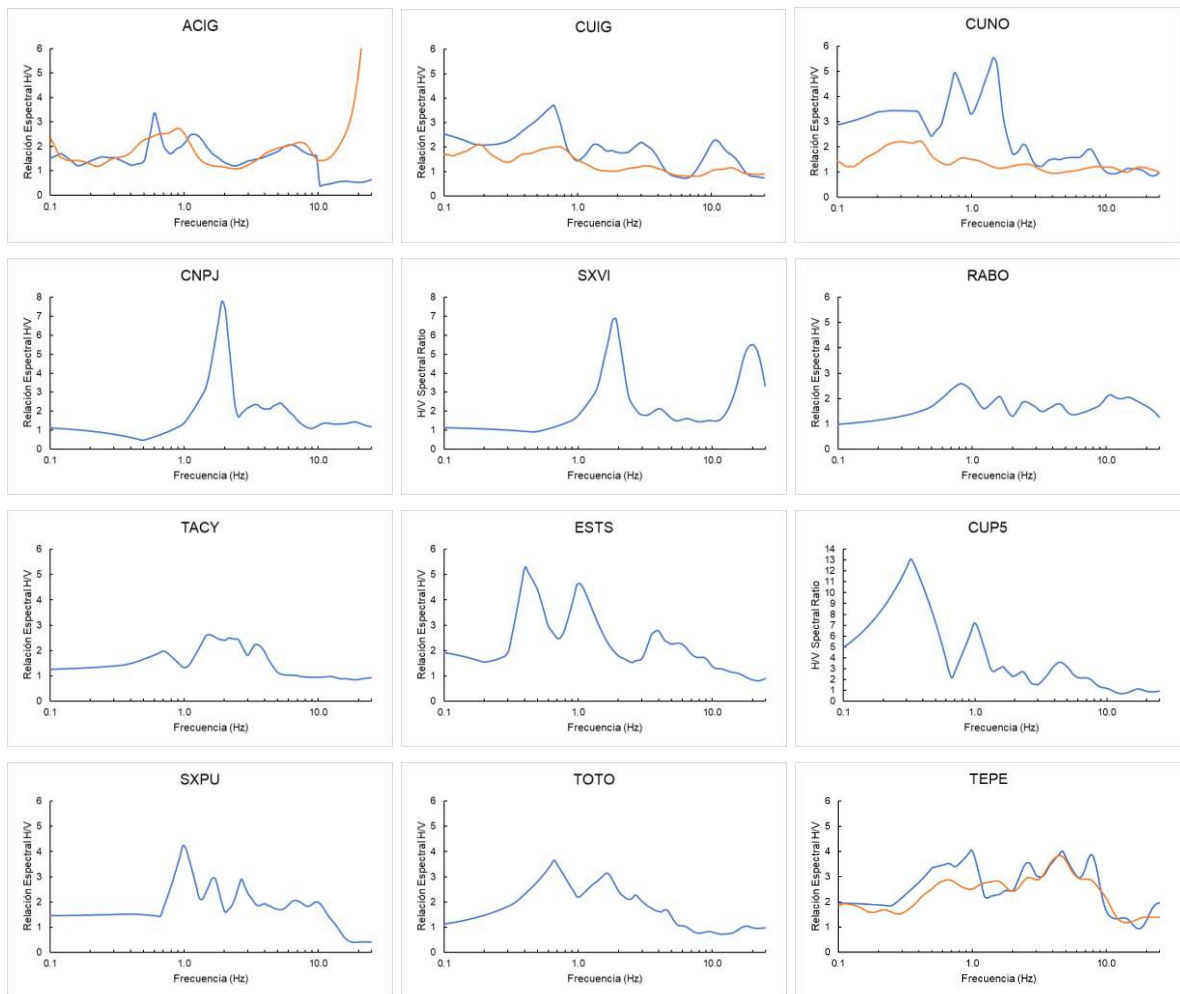
presentan picos claros, cuyas amplitudes se asemejan a las que caracterizan el conocido como pico más claro, por lo tanto, en este punto hay una discontinuidad aguda con un gran contraste de impedancia.

- En las estaciones TXMV y PPIG Figura 5-8, las curvas HVSR tanto de registros de ruido como de sismos tienen un comportamiento similar, presentan un pico en las frecuencias 17 y 12 Hz respectivamente, lo anterior puede ser causado por la existencia de capas delgadas de sedimentos blandos con esas frecuencias fundamentales de vibrar.
- En la estación JRQG Figura 5-8, para los datos de ruido ambiental, la curva es prácticamente plana, no hay picos visibles y eso refleja un terreno rocoso firme, sin capas subyacentes que generen contrastes de impedancia significativos; en cambio, cuando usamos datos de sismos corticales cercanos, aparece un pico entre 3 y 4 Hz, que va del rango de frecuencias de 0.8 a 1 Hz.
- En las estaciones ESTA, PSIQ y TECA Figura 5-8, las curvas HVSR para los registros de ruido no presenta picos, son casi planas, mientras que las curvas para registros sísmicos presentan un pico bastante claro, por lo que es claro que existe una discontinuidad aguda con un gran contraste de impedancia.
- Las curvas de las estaciones ACIG, CUIG y CUNO, Figura 5-8, para registros de ruido no presentan picos, son prácticamente planas, sin embargo, para los registros de sismos las curvas presentan varios picos, y aunque en algunos casos no están bien definidos pueden ser a causa de la presencia de contrastase de impedancia en los estratos subyacentes.
- En las estaciones CNPJ Y SXVI, Figura 5-8, solo se analizaron registros de ruido, aquí las curvas presentan un pico muy claro, mayor a 7, en el rango de frecuencias de 1.8 a 2 Hz, los cuales son atribuibles a la presencia de discontinuidades agudas con contrastes de impedancia significativos. También para las estaciones RABO y TACY, Figura 5-8, solo se tienen

curvas HVSR para registros de ruido, pero en este caso no se tienen picos claros.

- En las estaciones ESTS, CUP5, SXPU y TOTO, Figura 5-8, se observan picos múltiples para las curvas obtenidas de registros de ruido, esto podría atribuirse a la presencia de al menos dos contrastes de impedancia en el suelo subyacente.
- Finalmente en esta zona se tiene la estación TEPE Figura 5-8, en ambas curvas HVSR, tanto de ruido ambiental como de sismos, se observan varios picos, sin embargo no cumplen con las condiciones dadas en el apartado 5.2.3.a), al analizar la ubicación de la estación se podría interpretar que tales picos son de origen industrial, debido a que el aparato se localiza en una zona bastante urbanizada en la Cd. de México.



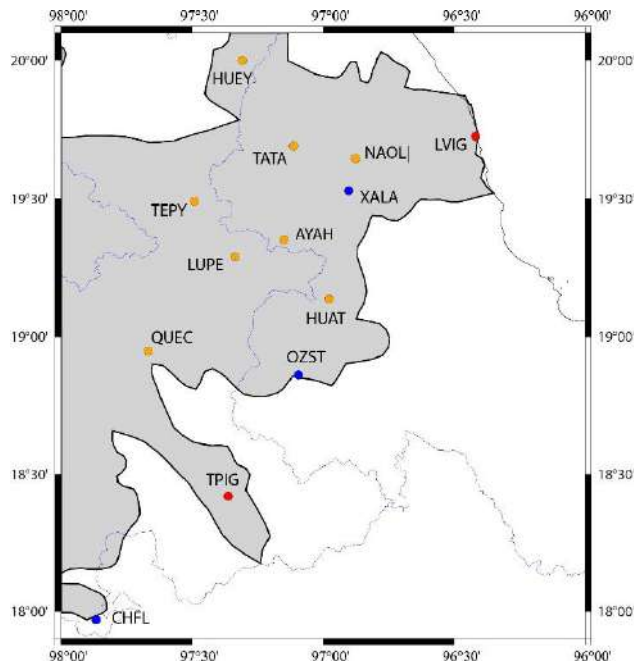


**Figura 5-8 Curvas promedio HVSR de la región este central del Eje Neovolcánico. Línea azul H/V para registros sísmicos. Línea naranja H/V para registros de ruido ambiental.**

iv. Este del Eje Neovolcánico.

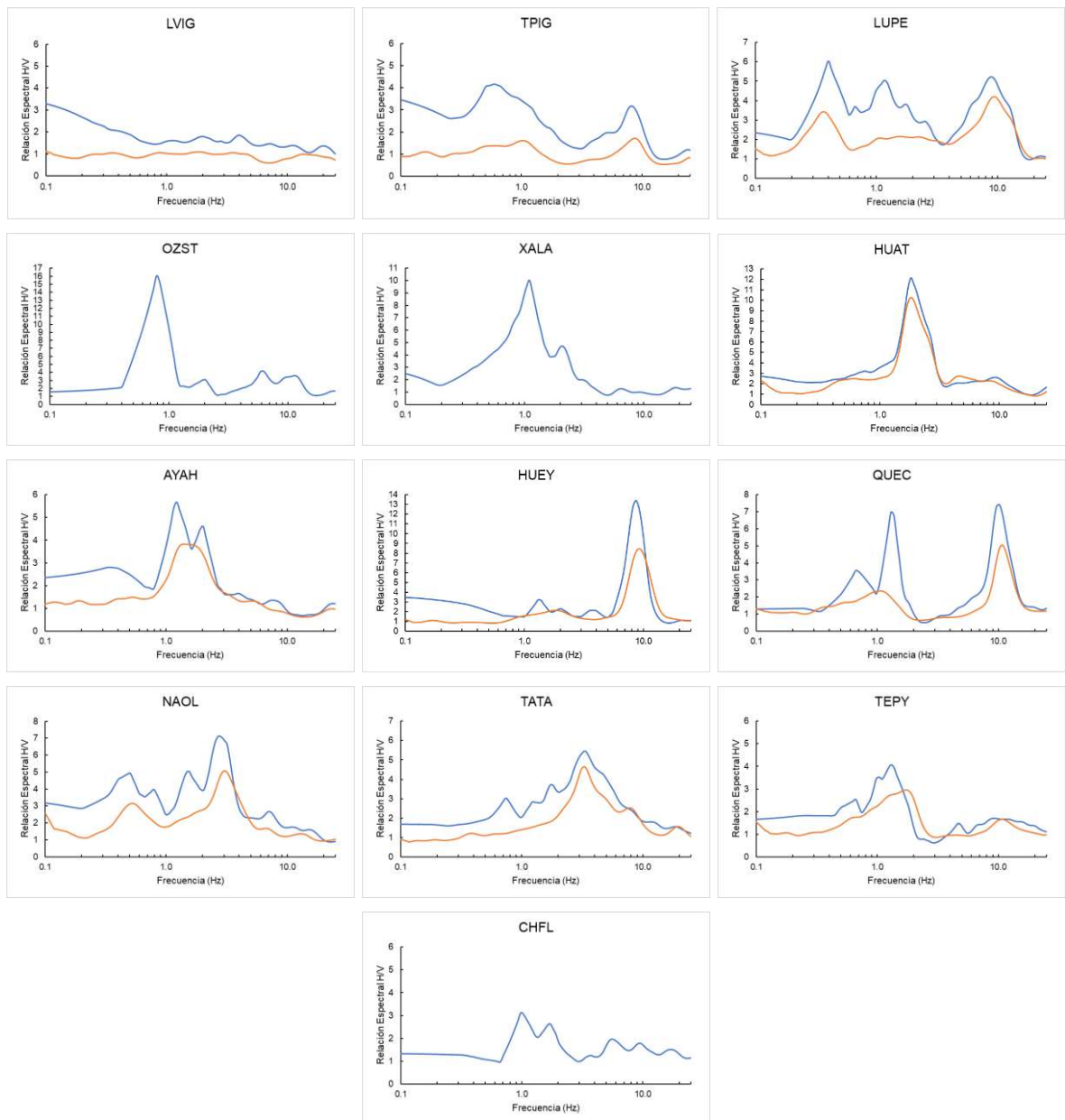
En esta zona las estaciones se localizan principalmente en la región norte del estado de Veracruz, y una parte en Puebla. Hay registros de un sismo ocurrido en 1546, sin embargo, no se tienen las características del mismo ni la fecha exacta del evento (Pérez-Moreno et al., 2018), también se presentó un sismo con una magnitud Mw 6.4 ocurrido en Jalapa en 1920 (Suárez & Novelo-Casanova, 2018). La red GECO, dos estaciones del Servicio Sismológico Nacional y tres más del Instituto de Ingeniería se localizan en esta región del Eje, Figura 5-9.





**Figura 5-9 Estaciones localizadas en la zona del este central del Eje Neovolcánico.**

- Las curvas HVSR para la estación LVIG, Figura 5-10, son prácticamente planas, no hay picos visibles y eso refleja un terreno rocoso firme, sin capas subyacentes que generen contrastes de impedancia de importancia.
- Para las estaciones TPIG y LUPE, Figura 5-10, en ambas curvas se aprecian varios picos no muy claros, pero alrededor de una frecuencia de entre 8 y 9 Hz hay picos de 3 y 5 respectivamente, estos podrían ser consecuencia de la existencia una capa delgada de sedimentos con esas frecuencias naturales de vibración.
- Para las estaciones OZST, XALA, HUAT, y AYAH, Figura 5-10, las curvas HVSR presentan un pico bastante claro, sin duda por la existencia de una discontinuidad aguda con un gran contraste de impedancia.



**Figura 5-10** Curvas promedio HVSR de la región este central del Eje Neovolcánico. Línea azul H/V para registros sísmicos. Línea naranja H/V para registros de ruido ambiental.

- En la estación HUEY, Figura 5-10, la gráfica de ruido ambiental no presenta grandes diferencias respecto de la gráfica resultado del análisis de sismos corticales, en ambas se aprecia un pico aproximado de 8.5 y 13.5 respectivamente, en un rango de frecuencias de 8.5 a 9 Hz, esto se

puede atribuir a la existencia de un estrato de suelo blando con esa frecuencia de vibración, que además tiene contrastes de impedancia de importancia en las capas de suelo subyacentes.

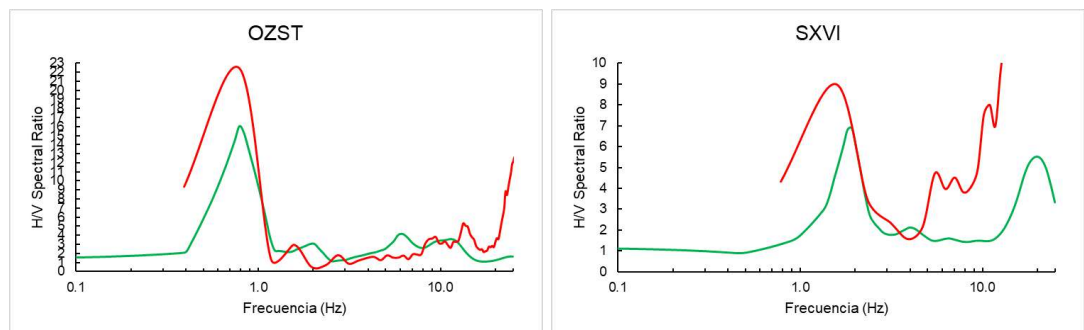
- En la estación QUEC Figura 5-10, la curva obtenida de los registros de sismo presenta dos picos importantes, lo cual podría interpretarse como la existencia de dos contrastes de impedancia importantes, el primer pico de 7 en una frecuencia de alrededor de 1.4 Hz, y el segundo de 7.4 en una frecuencia de 9.7 Hz, en esa misma frecuencia la curva para registros de ruido también tiene un pico de 5, por lo tanto, se tomó 9.7 como la frecuencia fundamental de vibración.
- Hay casos como el de las estaciones NAOL, TATA y TEPY, Figura 5-10, donde las curvas HVSR no exhiben picos claros, debido a que tienen gran amplitud o porque son de baja frecuencia, esto no significa que la respuesta del sitio no pueda presentar amplificaciones del movimiento del suelo, aunque si pueden ser debidos a un fenómeno meteorológico, por una mala conexión a la red o en sí por la presencia de contrastes de impedancia moderados.
- Finalmente en la estación CHFL Figura 5-10, se analizaron únicamente registros de ruido ambiental, en la curva HVSR se aprecian varios picos de baja frecuencia en el rango de frecuencias de 5 a 10 Hz, pero se aprecia un pico más agudo en 1 Hz, donde se consideró la frecuencia fundamental de vibración.

De las gráficas HVSR obtenidas se Identificó la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$  de acuerdo a los criterios recomendados por (Bard et al., 2004) mencionados en el apartado 4.2.3, clasificando los valores en dos grupos, el primero conformado por aquellos valores producto del análisis de registros de ruido ambiental y el segundo por los valores obtenidos del análisis de registros sísmicos. Asimismo, se determinaron los valores de la amplificación  $A_0$  para cada sitio, pero de acuerdo a varios investigadores (Lozano et al., 2009; Mucciarelli &

Gallipoli, 2001; Perron et al., 2018), la técnica HVSR solo realiza una aproximación del mismo, ya que subestima los efectos de sitio y proporciona valores no del todo confiables.

### 5.3. Determinación de los efectos de sitio en la zona de estudio mediante la técnica SSR (Standard Spectral Ratio).

Como ya se mencionó en el apartado 4.3, el estudio de los efectos de sitio por medio de la técnica SSR se realizó en el programa de análisis de señales Degtra A4. A pesar de contar con un gran número de registros de eventos sísmicos, fue complicado detectar aquellos eventos que cumplieran con las condiciones necesarias para poder aplicar esta metodología. Por lo anterior solo se analizaron los eventos registrados por dos estaciones correspondientes al Instituto de Ingeniería de la UNAM. En la Figura 5-11 se muestra las curvas promedio SSR obtenidas del análisis realizado, donde también se insertaron las curvas promedio HVSR para realizar una comparación.



**Figura 5-11 Curvas promedio HVSR y SSR para las estaciones OZST y SXVI. Línea verde H/V para registros sísmicos. Línea roja SSR para registros sísmicos.**

En la estación OZST Figura 5-11, la curva HVSR muestra un pico bastante claro de 13 en el rango de frecuencias de 0.75 a 0.8 Hz, de igual forma la curva SSR presenta un pico de 22.48 en el mismo rango de frecuencias, por lo que en esta zona existen contrastes de impedancia significativos en las capas de suelo subyacente. Para la estación SXVI Figura 5-11, también en ambas curvas se

observan picos muy claros, para la relación HVSR se aprecia un pico con una amplitud de 6.86 en el rango de frecuencias de 1.7 a 2 Hz, mientras que en la curva SSR en el rango de 1.6 a 2.3 se observa un pico con una amplitud máxima de 9, es claro que en esta zona también hay un estrato de suelo blando con un gran contraste de impedancia. Al observar las gráficas correspondientes a cada estación se puede confirmar lo que comentan (Lozano et al., 2009), en ambas curvas la frecuencia fundamental de vibración estimada es prácticamente la misma, pero el factor de amplificación resultado del análisis SSR es en gran medida mayor que el estimado por medio de la relación HVSR, es decir, la técnica de relación espectral horizontal a vertical HVSR si subestima los efectos de sitio en la amplificación del movimiento del suelo.

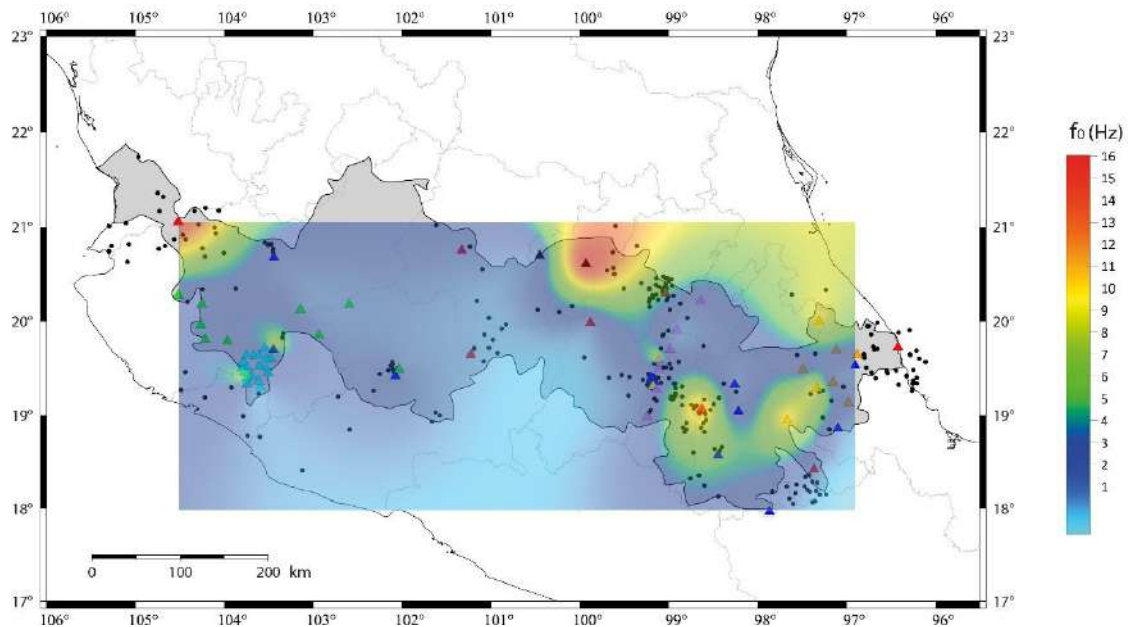
#### **5.4. Obtención de mapas de contorno para el análisis de la variación espacial de los efectos de sitio en la zona de estudio.**

Los mapas de contorno se obtuvieron en el programa Surfer 16. Para ello, las frecuencias fundamentales de vibración  $f_0$  y los factores de amplificación  $A_0$  fueron recabados de las curvas HVSR mostradas en el apartado 5.2. Como ya se ha mencionado, los factores  $A_0$  son aproximaciones, puesto que la técnica de relación espectral horizontal a vertical (HVSR) subestima estos valores.

Adicionalmente se obtuvieron mapas de contorno en función de la velocidad de la onda de corte a 30 m de profundidad  $V_{s30}$ . En el ANEXO B en la Tabla B-1 se muestran los valores de las propiedades para cada sitio.

Los resultados se dividieron en dos grupos, en el primer grupo están los obtenidos del análisis de registros de ruido ambiental y en el segundo grupo los que surgieron a partir del análisis de registros sísmicos. Se obtuvieron tres mapas de contorno por grupo, en total seis, en función de cada uno de los parámetros obtenidos.

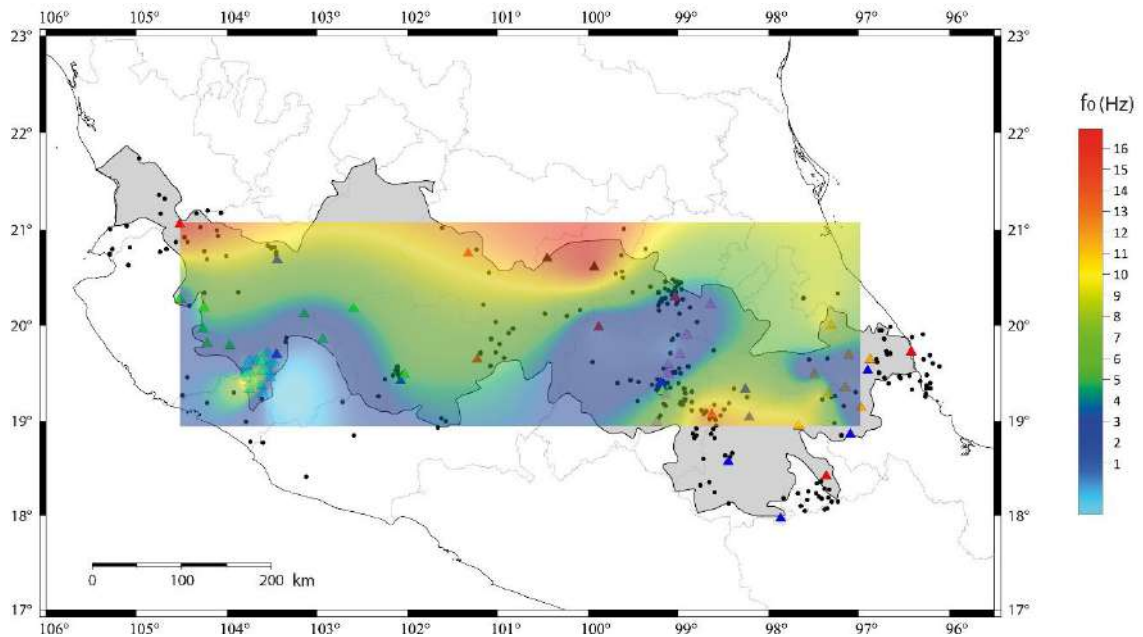
En la Figura 5-12 se muestra el mapa de contorno en función de la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$ , el cual fue resultado del análisis de registros sísmicos ocurridos en la zona de estudio. En ciertas regiones no se tenían muestras de datos o no fue posible determinar el valor de  $f_0$  puesto que en las curvas HVSR no se apreciaban picos claros, en consecuencia, se aprecia que el mapa de contorno no cubre toda la superficie del Eje Neovolcánico. Se observa que  $f_0$  va de un valor de 0.26 a 16.92 Hz, los valores máximos se presentan en el noroeste, en el norte de la región centro-este y en algunos puntos del sureste del Eje Neovolcánico. En la zona central del Eje se presentan los valores más bajos de  $f_0$ , esto se puede atribuir a la poca disponibilidad de instrumentación en esta área.



**Figura 5-12** Mapa de contorno en función de  $f_0$ , resultado del análisis de registros sísmicos.  
Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones.

El mapa de contorno en función de la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$  para el análisis de registros de ruido ambiental se muestra en la Figura 5-13. En este caso no se obtuvieron valores de  $f_0$  para las estaciones de las redes del CENAPRED y del Instituto de Ingeniería de la UNAM, también disminuyó el

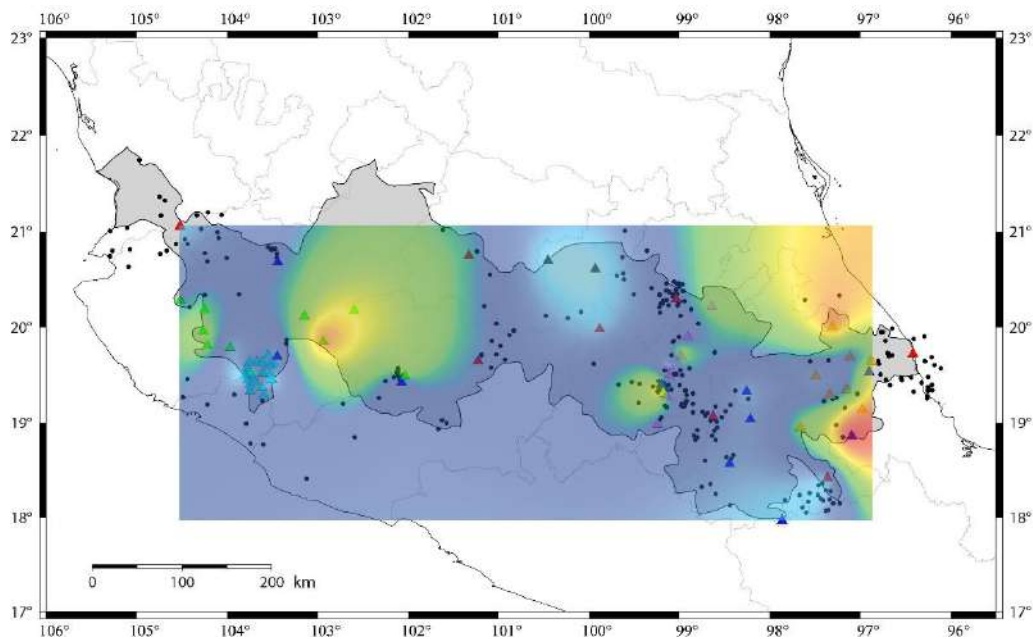
número de estaciones donde fue posible identificar el valor de la frecuencia  $f_0$ , por lo tanto, se puede aseverar que el mapa resultado de este análisis es menos preciso que el anterior. Aquí el valor de  $f_0$  oscila entre 0.21 y 18.92 Hz, el valor menor es casi igual al obtenido del análisis de eventos sísmicos, mientras que el valor mayor supera en 2 Hz al valor anterior. Para este análisis los valores máximos de  $f_0$  se presentan en el noroeste, en el norte de la región centro-este y en parte de la zona este del Eje Neovolcánico. La diferencia más notable entre este mapa y el previo se da en la zona central del Eje, donde anteriormente se tenían valores bajos de  $f_0$ , pero aquí los estos valores llegan hasta 12 Hz aproximadamente.



**Figura 5-13** Mapa de contorno en función de  $f_0$ , resultado del análisis de registros de ruido ambiental. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones.

Como ya se ha mencionado los valores del factor  $A_0$  obtenido por la técnica HVSR son meras aproximaciones, ya que este análisis subestima la amplificación del movimiento del terreno debido a la existencia de contrastes de impedancia en el suelo subyacente.

En la Figura 5-14 se presenta el mapa de contorno en función del factor de amplificación  $A_0$ , el cual se obtuvo del análisis de registros de sismos corticales ocurridos en el Eje Neovolcánico. Los valores de  $A_0$  oscilan entre 2.64 y 16.06. En la región central y en la parte oeste del Eje se obtuvieron los valores máximos del factor  $A_0$ , mientras que los valores menores fueron en el norte de la región centro-este y en el sureste, específicamente en la ciudad de Querétaro y en la frontera entre Puebla y Oaxaca. Al observar el mapa es claro que hay variación de los efectos de sitio dentro de la zona de estudio, debida a la presencia de contrastes de impedancia con diferentes grados de impacto en el suelo subyacente.

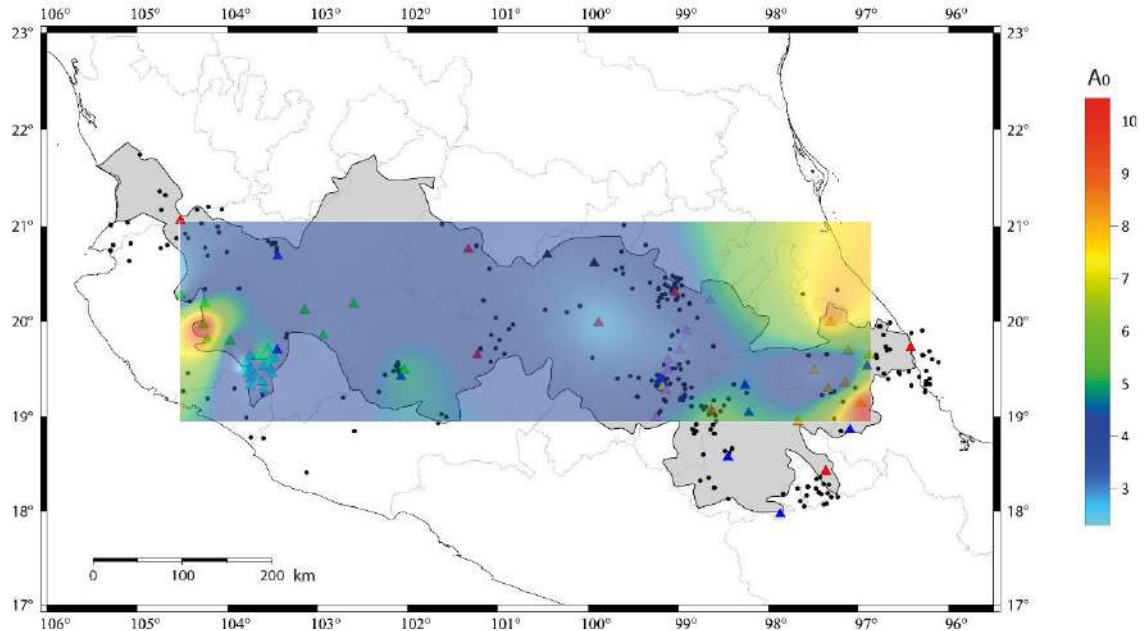


**Figura 5-14** Mapa de contorno en función de  $A_0$ , resultado del análisis de registros sísmicos. **Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones.**

El mapa de contorno en función del factor de amplificación  $A_0$  resultado del análisis de registros de ruido ambiental se muestra en la Figura 5-15. Los valores de  $A_0$  para este análisis van de 1.96 a 10.90, la variación en este valor es mucho mayor que la variación entre los valores de la frecuencia  $f_0$ , esto se puede asociar a que la energía producto del ruido ambiental es mucho menor que la emitida por un evento telúrico, y por ende las amplificaciones del suelo están



relacionadas con el tipo de fuente que las origina. Los valores mayores de  $A_0$  se presentan en la región el suroeste y al este del Eje Neovolcánico, por el otro lado, los valores más pequeños se concentran en la zona centro-este.



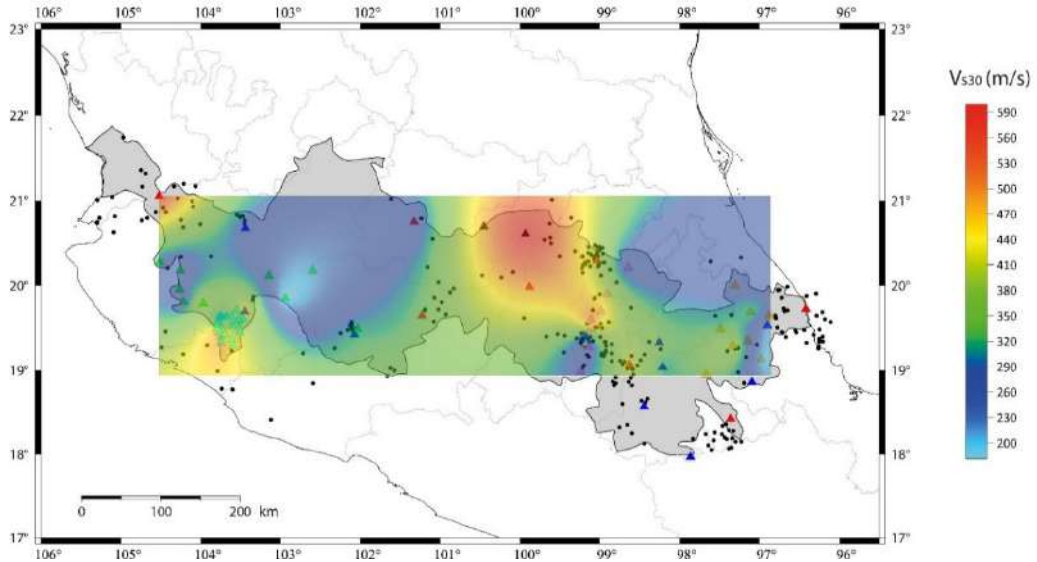
**Figura 5-15 Mapa de contorno en función de  $A_0$ , resultado del análisis de registros de ruido ambiental. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones.**

Las velocidades  $V_{S30}$  se calcularon a partir de las características obtenidas de la curva HVSR (frecuencia  $f_{peak}$  y factor  $A_{peak}$ ), aplicando la ecuación (6), solo en los casos donde  $f_{peak} > 1$ . En la Figura 5-16 se muestra el mapa de contorno en función del parámetro  $V_{S30}$ , el cual es producto del análisis de registros de sismos corticales ocurridos en la zona de estudio. Los valores de  $V_{S30}$  oscilan entre 177 y 610 m/s, los de menor valor se concentran en las zonas central y este del Eje, y los de mayor en las regiones suroeste, noroeste y centro-este.

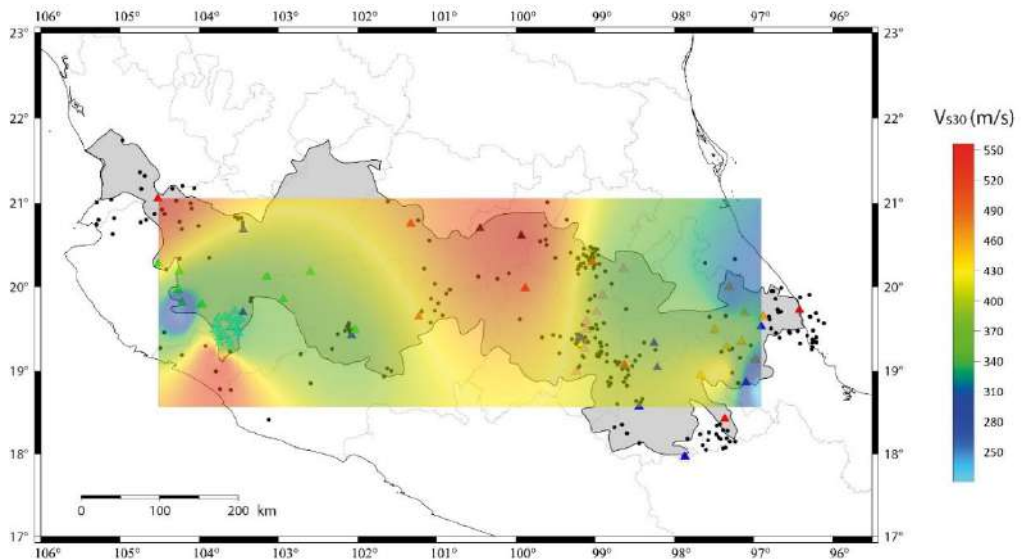
De acuerdo a la clasificación realizada por (NEHRP, 2020), los sitios van del tipo E al C, desde arcillas blandas hasta arena densa o arcillas duras.

En la Figura 5-17 se muestra el mapa de contorno en función de la velocidad promedio de la onda de corte  $V_{S30}$ , resultado del análisis de registros de

ruido ambiental. Los valores van de 216 a 556 m/s, donde los de menor valor se concentran en el este del Eje, y los de mayor en las regiones suroeste, noroeste y centro-este. De acuerdo a la clasificación realizada por (NEHRP, 2020), los sitios van del tipo E al C, desde arcillas blandas hasta arena densa o arcillas duras.



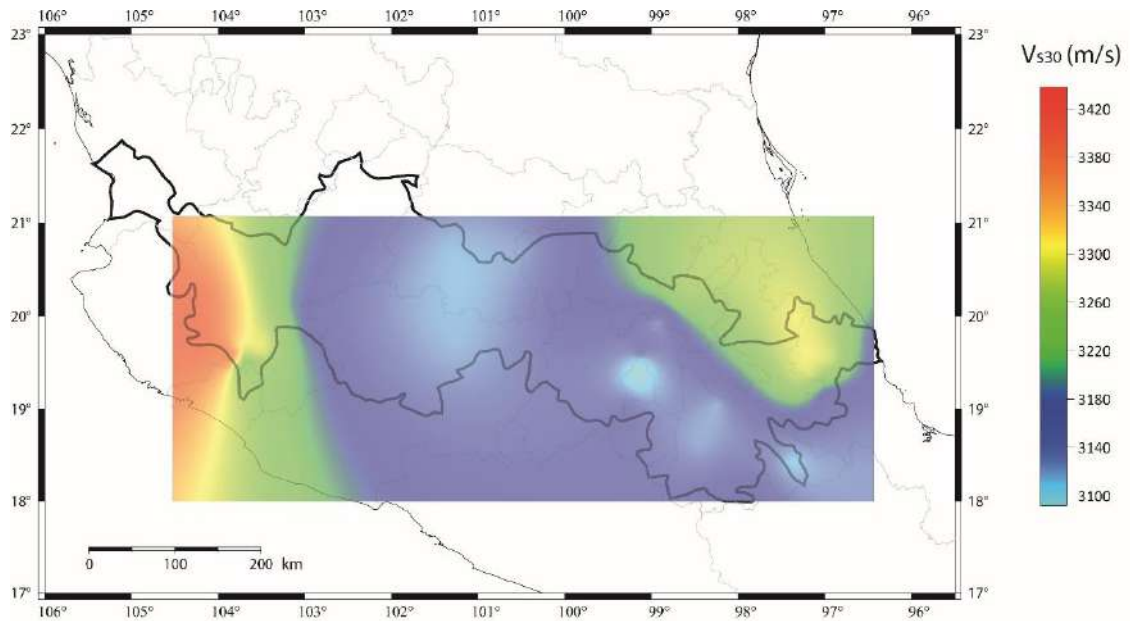
**Figura 5-16** Mapa de contorno en función de  $V_{s30}$ , resultado del análisis de registros sísmicos. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones.



**Figura 5-17** Mapa de contorno en función de  $V_{s30}$ , resultado del análisis de registros de ruido ambiental. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones.

Al igual que los otros dos mapas obtenidos del análisis de ruido ambiental, el número de muestras se redujo significativamente, por lo que el grado de error será mayor que en el mapa de la Figura 5-16.

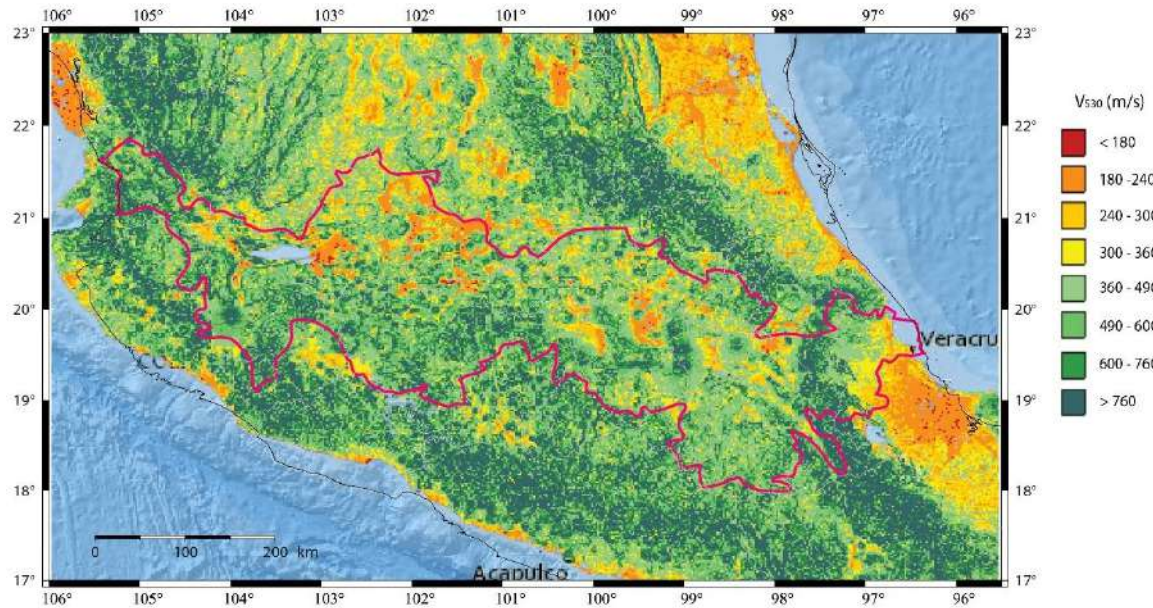
Además, se obtuvo un mapa de contorno en función de la velocidad de la onda de corte  $V_{S30}$  a partir del modelo obtenido por (Spica et al., 2016).



**Figura 5-18** Mapa de contorno en función de  $V_{S30}$ , de acuerdo al modelo de (Spica et al., 2016).

Comparando los resultados de la variación de  $V_{S30}$  obtenida a partir del análisis de registros sísmicos Figura 5-16, con el modelo de Spica, Figura 5-18, se aprecian grandes diferencias. De acuerdo al modelo de Spica, los valores de  $V_{S30}$  van de 3093 a 3431 m/s, mientras que nuestros resultados arrojan variaciones de 177 a 610 m/s; estas variaciones son consecuencia de los dos tipos de análisis aplicados, mientras que las gráficas HVSR son aproximaciones de las funciones de transferencia y el valor de amplitud no es muy confiable, en cambio el modelo de Spica fue obtenido de un estudio de tomografía con un gran alcance geográfico.

Como parte del programa NERPH, *The USGS Earthquake Hazards Program* presenta un mapa interactivo donde muestran los valores de  $V_{S30}$  en varias zonas de los Estados Unidos, tales valores también se pueden obtener en todo el mundo. En la Figura 5-19 se muestra la variación de  $V_{S30}$  en la zona de estudio.



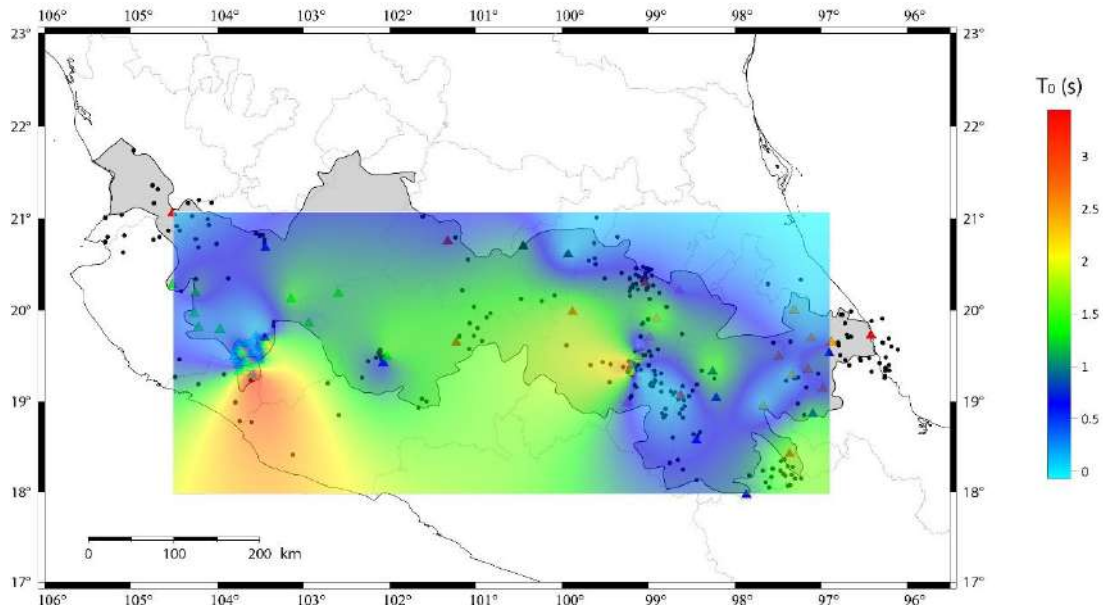
**Figura 5-19 Mapa del Eje Neovolcánico, variación de  $V_{S30}$  de acuerdo a (U.S. Geological Survey, 2021).**

Se observa que en el Eje predominan velocidades de 360 a 490 m/s, pocas regiones presentan velocidades menores a 360 m/s, y en las zonas este y oeste se aprecian valores de 600 m/s o superiores. Es claro que hay variaciones respecto de nuestros resultados, puesto que sus estimaciones fueron basadas en datos recopilados y analizados específicamente para sitios en la Unión Americana.

Además, se obtuvo un mapa de coturno en función del periodo fundamental del suelo  $T_0$ , para observar la variación de la respuesta de sitio a gran escala en términos de este parámetro. Los valores de  $T_0$ , oscilan entre 0.06 y 3.87 s. Los valores máximos se presentan principalmente en el sur de las zonas oeste y



centro, y en una pequeña parte al norte del estado de Puebla. Y los valores menores se encuentran al norte de la región oeste y en gran parte de las zonas centro-este y este.



**Figura 5-20 Mapa de contorno en función de  $T_0$ , resultado del análisis de registros sísmicos. Círculos: epicentros. Triángulos: estaciones.**

### **5.5. Comparación de resultados con estudios análogos en otras partes del mundo.**

En el trabajo realizado por (Gosar, 2017) en Eslovenia, obtuvieron mapas de contorno en función de la frecuencia  $f_0$  y la amplificación del movimiento del suelo  $A_0$ , en sus resultados el valor de  $f_0$  oscila entre 2.5 y 19.5 Hz, mientras que el factor de amplificación va de un valor de 2.1 a 11. Los valores son similares a los obtenidos en nuestro estudio, sin embargo, las diferencias existentes son de esperarse debido a las características geológicas de cada región. En su caso pudieron identificar la frecuencia fundamental de vibración en 66% de los puntos analizados, mientras que el 33% restante las curvas son casi planas, eso comparado con lo obtenido en esta tesis, 56% y 44% respectivamente.

Para esta investigación, en el ANEXO C se analizó si existía una relación entre la geología y la variación de la respuesta de sitio. De acuerdo con lo observado, en el Eje Neovolcánico no hay relación directa entre la variación de  $f_0$  y  $A_0$  respecto de la distribución de las cuencas geológicas en la zona. En cambio en el trabajo realizado por (Singh et al., 2017) en una zona sísmica al oeste de la India, descubrieron una correlación importante entre la geología superficial de la región y la variación de la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$ , la amplificación del movimiento del suelo  $A_0$  y la velocidad promedio de la onda de corte  $V_{S30}$ . Por ejemplo, encontraron que  $f_0$  tiene valores de 0.32 Hz para el Cuaternario, 0.80 Hz para Terciario, 1.8 Hz para Cretácico, 1.8 Hz para Jurásico y 2.3 Hz para las formaciones trampa Deccan.

(Stanko et al., 2017) al norte de Croacia en la ciudad de Varazdin, aplicaron la técnica HVSR a mediciones de ruido ambiental para determinar la respuesta de sitio en función de la frecuencia  $f_0$ , el factor de amplificación  $A_0$  y la velocidad  $V_{S30}$ . Y de manera similar, obtuvieron mapas de contorno en función de estos parámetros para observar la variación a gran escala de los efectos de sitio en la región. Los valores mostrados en sus resultados son los siguientes: las frecuencias fundamentales del suelo 0.47–5.19 Hz, las amplificaciones del movimiento del suelo van de 1.95 a 4.65, y los valores de  $V_{S30}$  oscilan entre 212 y 340 m/s. En nuestro estudio se obtuvieron frecuencias de hasta 17 Hz y valores máximos de  $A_0$  de 16. Hay una gran variación entre los valores máximos de  $f_0$  y  $A_0$  obtenidos en nuestro estudio y aquellos resultado del análisis realizado por (Stanko et al., 2017).

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se obtuvieron registros de eventos sísmicos y ruido ambiental ocurridos en la zona de estudio, y mediante la aplicación de las técnicas de relaciones espectrales SSR (Borcherdt, 1970) y HVSR (Yukata Nakamura, 1989) se realizó el estudio de la respuesta de sitio en el Eje Neovolcánico, representando la variación en mapas de contorno en función de la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$ , la amplificación del terreno  $A_0$  y la velocidad promedio de la onda de corte  $V_{S30}$ . Se encontró que la hipótesis propuesta al inicio de esta investigación se ha cumplido puesto que:

- Hay una importante variación de la frecuencia fundamental  $f_0$  a lo largo de todo el Eje Neovolcánico, en el 20% de las estaciones analizadas las curvas HVSR son prácticamente planas o no hubo picos definidos, por lo que no fue posible identificar  $f_0$ , es decir que en estos puntos no hay contrastes de impedancia significativos por lo tanto el terreno se puede clasificar como rocoso. Se observan picos claros en el 56% de los sitios analizados, con amplitudes que van de 2.64 a 16, donde fue posible identificar las frecuencias fundamentales  $f_0$  en un rango de 0.26 a 16.92 Hz; aquí se presentan contrastes de impedancia importantes debidos a la existencia de discontinuidades agudas en el suelo subyacente.
- En el 24% de los datos analizados se presentaron diferencias entre las curvas HVSR resultado del análisis de registros sísmicos y aquellas obtenidas del análisis de registros de ruido ambiental, en las primeras se aprecian picos claros definidos, mientras que en las segundas su forma es casi plana. Lo anterior se puede relacionar a que la energía asociada a un evento telúrico es mucho mayor a aquella emitida por el ruido ambiental. En esta porción de resultados se puede afirmar que los efectos de sitio dependen en cierto modo de la ubicación y el tipo de fuente.

- En varios sitios se aprecian amplificaciones del terreno que van de 2.64 a 16.06, y aunque sabemos que estos valores obtenidos por medio de la técnica HVSR son meras aproximaciones, ayudaron identificar la frecuencia fundamental  $f_0$  en esos puntos y sirvieron para compararlos con los valores obtenidos por medio de la técnica SSR.
- Las velocidades promedio  $V_{S30}$  obtenidas también nos muestran que la respuesta de sitio en la zona es variable, con valores que oscilan entre 177 y 610 m/s, y de acuerdo a la clasificación realizada por (NEHRP, 2020), los suelos se pueden caracterizar del tipo E al C, de arcillas blandas a arena densa o arcillas duras.
- Del análisis SSR realizado, al comparar las curvas obtenidas con las curvas HVSR se observa que la frecuencia fundamental  $f_0$  es prácticamente la misma, sin embargo, el factor de amplificación resultado del análisis SSR es mayor entre 2 y 9 unidades, esto reafirma lo mencionado por (Lozano et al., 2009; Mucciarelli & Gallipoli, 2001; Perron et al., 2018), que la metodología HVSR solo aproxima el valor de  $A_0$  al subestimar los efectos de sitio.
- Los mapas de contorno en función de  $f_0$ ,  $A_0$  y  $V_{S30}$  nos muestran a gran escala la variación de la respuesta de sitio en la zona del Eje Neovolcánico. Los cuales tienen un cierto grado de incertidumbre, debido a la poca instrumentación en la zona centro del Eje, y a la limitada disponibilidad de registros de eventos sísmicos en algunas redes sismológicas.

Los desplazamientos del suelo son mayores en los puntos donde se tienen los valores máximos del factor de amplificación  $A_0$ , esto implica mayores afectaciones sobre las edificaciones, por lo tanto, es de suma importancia considerar la respuesta de sitio en el análisis y diseño de las estructuras que ahí se construyan.



Cuando el periodo del suelo coincide con el periodo fundamental de vibración de la estructura, ésta puede entrar en resonancia, cuando esto ocurre hay niveles de vibración más altos que pueden provocar daños mayores, incluso llevar a un colapso estructural. En la zona de estudio el valor del periodo fundamental del suelo oscila entre 0.06 y 3.87 s; para evitar que las edificaciones entren en resonancia, dependiendo de la zona, se deberá de poner especial atención en el diseño de estructuras de entre 3 y 160 m de altura.

A partir de los resultados obtenidos se considera esencial contar con más redes sismológicas en la zona de estudio, esto con el fin de tener un mayor número de registros sísmicos, lo cual nos permita reducir el grado de error en la obtención de los mapas de contorno, y que además sea posible ampliar el estudio por medio de la técnica SSR. Al tener un análisis más extenso, el trabajo se podrá implementar para futuras investigaciones tales como: zonificación sísmica o para delimitar mapas de riesgo, también se podrán realizar mejoras a los reglamentos de diseño.

Es importante recalcar que este trabajo no es un estudio de zonificación, más bien es un estudio general de la variación de la respuesta de sitio en la zona. Es un primer paso hacia la obtención de un trabajo más complejo, en el cual será necesario la participación de varias áreas, como geotecnia, estructuras, ingeniería sísmica y topografía

## 7. REFERENCIAS

- Ahn, J. K., Kwak, D. Y., & Kim, H. S. (2021). Estimating VS30 at Korean Peninsular seismic observatory stations using HVSR of event records. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106650>
- Akram, M. R., Ye, A., & Zulfikar, A. C. (2017). Site Amplification and Response Analysis: A case study of October 6th, 2000 M7.3 Western Tottori Earthquake Japan. *4th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Anadolu University-Eskisehir, Turkey*, 1–9.
- Anbazhagan, P., Srilakshmi, K. N., Bajaj, K., Moustafa, S. S. R., & Al-Arifi, N. S. N. (2019). Determination of seismic site classification of seismic recording stations in the Himalayan region using HVSR method. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116, 304–316. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.023>
- Arreygue Rocha, E., Monroy Garduño, H. V., Canuti, P., Casaglie, N., Iotti, A., & Chiesa, S. (2002). Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19, 91–106. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57219202>
- Ávila-Barrientos, L., & Castro, R. R. (2016). Site response of the NARS-Baja and RESBAN broadband networks of the Gulf of California, México. *Geofísica Internacional*, 55(2), 131–154. <https://doi.org/10.19155/geofint.2016.055.2.1717>
- Bard, P., Duval, A., Koehler, A., & Rao, S. (2004). Guidelines for the Implementation Technique on Ambient Vibrations of the H/V Spectral Ratio

Measurements, Processing and Interpretation. *SESAME H/V User Guidelines*, December.

- Beyreuther, M., Barsch, R., Krischer, L., Megies, T., Behr, Y., & Wassermann, J. (2010). ObsPy: A python toolbox for seismology. *Seismological Research Letters*, 81(3), 530–533. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.3.530>
- Borah, S., Goswami, D., & Pathak, J. (2016). *SITE RESPONSE IN GUWAHATI REGION USING STANDARD SPECTRAL RATIO*. 77–81.
- Borcherdt, R. D. (1970). Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 60(1), 29–61.
- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Luna-González, L., & Gámez-González, J. F. (2005). Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 22(1), 1–18. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742005000100001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742005000100001&script=sci_arttext)
- Chávez García, F. J., Domínguez, T., Rodríguez, M., & Pérez, F. (2007). Site effects in a volcanic environment: A comparison between HVSR and array techniques at Colima, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(2), 591–604. <https://doi.org/10.1785/0120060095>
- Chávez García, Francisco J., & Montalva, G. A. (2014). Efectos de sitio para Ingenieros Geotécnicos, estudio del valle Parkway. *Obras y Proyectos*, 16, 6–30.
- Chávez García, Francisco J., & Raptakis, D. (2017). Local amplification and subsoil structure at a difficult site: Understanding site effects from different measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92(June 2015), 334–344. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.10.008>

- Chavez, M., Garcia, S., Cabrera, E., Ashworth, M., Perea, N., Salazar, A., Chavez, E., Saborio-Ulloa, J., & Saborio-Ortega, J. (2014). Site effects and peak ground accelerations observed in Guadalajara, Mexico, for the 9 October 1995 Mw 8 Colima–Jalisco, Earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *104*(5), 2430–2455. <https://doi.org/10.1785/0120130144>
- Clemente-Chavez, A., Zúñiga, F. R., Lermo, J., Figueroa-Soto, A., Valdés, C., Montiel, M., Chávez, O., & Arroyo, M. (2014). On the behavior of site effects in central Mexico ( the Mexican volcanic belt – MVB ), based on records of shallow earthquakes that occurred in the zone between 1998 and 2011. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 1391–1406. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1391-2014>
- De Rubeis, V., Tosi, P., Gasparini, C., & Solipaca, A. (2005). Application of Kriging technique to seismic intensity data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *95*(2), 540–548. <https://doi.org/10.1785/0120030250>
- Escalante, T., & Linaje, M. (2012). *Caracterización biogeográfica de la Faja Volcánica Transmexicana y análisis de los patrones de distribución de su mastofauna* *Biogeographic characterization of the Transmexican Volcanic Belt and analysis of the distributional patterns of the mammal fauna*. 258–272.
- Ferrari, L., Orozco-esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). Tectonophysics The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522–523, 122–149. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.09.018>
- Flores, J. C., & Figueras, M. A. (2018). Clasificación de macizos rocosos de travertino ciudad de Puebla. *XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*, 1–7.
- Galaviz, A. (2016). Investigación sobre aceleraciones máximas esperadas y

observadas en estaciones de la Red Sísmica Mexicana. *Centro Nacional de Prevención de Desastres*, 17(1), 1–13.

Ghofrani, H., & Atkinson, G. M. (2014). Site condition evaluation using horizontal-to-vertical response spectral ratios of earthquakes in the NGA-West 2 and Japanese databases. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 67, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.08.015>

Glinsky, N., Bertrand, E., & Régnier, J. (2019). Numerical simulation of topographical and geological site effects. Applications to canonical topographies and Rognes hill, South East France. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 116(October 2018), 620–636. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.020>

Gosar, A. (2017). Study on the applicability of the microtremor HVSR method to support seismic microzonation in the town of Idrija (W Slovenia). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(6), 925–937. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-925-2017>

INEGI. (2020). *Censo de población y vivienda 2020: Vol. XLI*.

Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 228–241.

Kurniawan, S. (2013). *Mapping the Rivera and Cocos Subduction Zone*. University of Texas.

Langridge, R. M., Persaud, M., Zúñiga, F. R., Aguirre-Díaz, G. de J., Villamor, P., & Lacan, P. (2013). Preliminary paleoseismic results from the pastores fault and its role in the seismic hazard of the acambay graben, trans-mexican volcanic belt, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(3), 463–481.

- Langridge, R. M., Weldon, R. J., Moya, J. C., & Suárez, G. (2000). Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake and the Acambay-Tixmadejé fault, Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B2), 3019–3037. <https://doi.org/10.1029/1999jb900239>
- Lenz, Ó. (2016). Zonificación geotécnica de la ciudad de Xalapa , Veracruz. *Ingeniería Civil* 181, 77–88.
- Lozano, L., Herraiz, M., & Singh, S. K. (2009). Site effect study in central Mexico using H/V and SSR techniques: Independence of seismic site effects on source characteristics. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(3), 504–516. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.05.009>
- Martínez González, J. A. (2015). *Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtemores, para fines de mapas sísmicos de intensidad*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Martínez López, M. del R. (2011). *Estudio sísmico de la estructura cortical en el Bloque de Jalisco a partir de registros locales del proyecto MARS*.
- Mittal, H., Kamal, Kumar, A., & Singh, S. K. (2013). Estimation of site effects in Delhi using standard spectral ratio. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 50, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.03.004>
- Mucciarelli, M., & Gallipoli, M. R. (2001). A critical review of 10 years of microtremor HVSR technique. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 42(3–4), 255–266.
- Nakamura, Yukata. (1989). A Method for Dynamic Characteristics of Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface. En *Proc. 20th JSCE Earthquake Eng. Symposium* (Vol. 30, Número 1, pp. 133–136).

- Nakamura, Yutaka. (1989). Method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan)*, 30(1), 25–33.
- Nakamura, Yutaka. (2019). What Is the Nakamura Method? *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220180376>
- NEHRP. (2020). NEHRP Recommended seismic provisions for new buildings and other structures. *Building Seismic Safety Council*, II(September), 388. <https://dx.doi.org/10.1128/AAC.03728-14>
- Oliver, M. A., & Webster, R. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International journal of geographical information systems*, 4, 313–332.
- Ordaz, M., Castellanos, F., & Zapata, A. (2005). *MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DEGTRA A4*. 4, 1–25.
- Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., & Ivanov, J. M. (2007). Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). *The Leading Edge*, 26(1), 60–64.
- Pelekis, P. C., & Athanasopoulos, G. A. (2013). Seismic microzonation of Chania, Crete (Greece) based on SASW measurements and non-linear site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53, 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.06.013>
- Pérez-Moreno, L. F., Rivas-Nieto, C. A., & Velázquez-Aguilar, L. S. (2018). Seismic intensity for inslab earthquakes in the southeast of the Mexican Volcanic Belt. *XV international Engineering Congress*.
- Pérez-Moreno, L. F., Rodríguez-Pérez, Q., Zúñiga, F. R., Horta-Rangel, J., de la Luz Pérez-Rea, M., & Pérez-Lara, M. A. (2021). Site response evaluation in the trans-mexican volcanic belt based on HVSR from ambient noise and

regional seismicity. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(13).  
<https://doi.org/10.3390/app11136126>

Perron, V., Gélis, C., Froment, B., Hollender, F., Bard, P. Y., Cultrera, G., & Cushing, E. M. (2018). Can broad-band earthquake site responses be predicted by the ambient noise spectral ratio? Insight from observations at two sedimentary basins. *Geophysical Journal International*, 215(2), 1442–1454.  
<https://doi.org/10.1093/GJI/GGY355>

Porras Velázquez, A. (2017). Método Kriging de inferencia espacial. *Repositorio Nacional CONACYT*, 7.

RAII-UNAM. (2014). *La Red Acelerográfica del IIUNAM*.  
<https://aplicaciones.iingen.unam.mx/acelerogramasrsm/redacelerografica.aspx>

Ramírez Gaytan, A., Flores Estrella, H., Preciado, A., Bandy, W. L., Lazcano, S., Alcántara Nolasco, L., Aguirre González, J., & Korn, M. (2020). Subsoil classification and geotechnical zonation for Guadalajara City, México: Vs30, soil fundamental periods, 3D structure and profiles. *Near Surface Geophysics*, 18(2), 175–188. <https://doi.org/10.1002/nsg.12085>

Ritta, R. F., Suárez, L. E., & Pando, M. A. (2012). Determinación del período fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral Horizontal/Vertical. *Mecánica Computacional*, XXXI, 1399–1419, ISSN:2591-3522. <https://cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/download/4130/4056>

Rucker, M. L. (2003). Applying the refraction microtremor (ReMi) shear wave technique to geotechnical characterization. *Proceedings of the 3rd International Conference on Application of Geophysical Methodologies and NDT to Transportation and Infrastructure, Orlando, FL, USA, 8–12 December.*, 8–12.

Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M. A., & Rodríguez-



- Castellanos, A. (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: Application for a layered medium. *Geophysical Journal International*, 186(1), 221–225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x>
- Sánchez Sesma, F. J., Perton, M., Piña Flores, J., Molina Villegas, J. C., & Baena-Rivera, Ma. (2015). Ruido sísmico ambiental en sismología e ingeniería sísmica. *XX Mexican Congress of Earthquake Engineering*.
- Singh, A. P., Shukla, A., Kumar, M. R., & Thakkar, M. G. (2017). Characterizing surface geology, liquefaction potential, and maximum intensity in the kachchh seismic zone, western India, through microtremor analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3), 1277–1292. <https://doi.org/10.1785/0120160264>
- Spica, Z., Perton, M., Calò, M., Legrand, D., Córdoba-Montiel, F., & Iglesias, A. (2016). 3-D shear wave velocity model of Mexico and South US: Bridging seismic networks with ambient noise cross-correlations (C1) and correlation of coda of correlations (C3). *Geophysical Journal International*, 206(3), 1795–1813. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw240>
- SSN. (2020). *Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México*. <https://doi.org/10.21766/SSNMX>
- Stanko, D., Markušić, S., Strelec, S., & Gazdek, M. (2017). HVSR analysis of seismic site effects and soil-structure resonance in Varaždin city (North Croatia). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 92(November 2014), 666–677. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.10.022>
- Stein, S., & Wysession, M. (2005). An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. En *Blackwell Publishing* (Vol. 4). <https://doi.org/10.1029/2003eo220007>
- Suárez, G., Caballero-Jiménez, G. V., & Novelo-Casanova, D. A. (2019). Active

- Crustal Deformation in the Trans-Mexican Volcanic Belt as Evidenced by Historical Earthquakes During the Last 450 Years. *Tectonics*, 38(10), 3544–3562. <https://doi.org/10.1029/2019TC005601>
- Suárez, G., & Novelo-Casanova, D. A. (2018). A pioneering aftershock study of the destructive 4 January 1920 Jalapa, Mexico, earthquake. *Seismological Research Letters*, 89(5), 1894–1899. <https://doi.org/10.1785/0220180150>
- Sun, C., Kim, H., Chung, C., & Chi, H. (2014). Spatial zonations for regional assessment of seismic site effects in the Seoul metropolitan area. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 56, 44–56. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.10.003>
- Suter, M. (2015). *The A . D . 1567 M w 7 . 2 Ameca , Jalisco , Earthquake ( Western Trans-Mexican Volcanic Belt ) : Surface Rupture Parameters , Seismogeological Effects , and Macroseismic Intensities from Historical Sources*. 105(2), 646–656. <https://doi.org/10.1785/0120140163>
- Suter, M. (2018). The 2 October 1847 M<sub>s</sub>5.7 chapala graben triggered earthquake (trans-mexican volcanic belt, west-central Mexico): Macroseismic observations and hazard implications. *Seismological Research Letters*, 89(1), 35–46. <https://doi.org/10.1785/0220170101>
- Suter, M. (2020). *The 6 November 1774 M<sub>s</sub> 6 Bolaños Graben Earthquake ( Southern Basin and Range Province , West-Central Mexico ) : Macroseismic Observations and Neotectonic Implications*. <https://doi.org/10.1785/0220200016>. Supplemental
- Szynkaruk, E., Graduno-Monroy, V. H., & Bocco, G. (2004). Active fault systems and tectono-topographic configuration of the central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geomorphology*, 61(1–2), 111–126. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2003.10.006>

- U.S. Geological Survey. (2021). *Vs30 Models and Data*.  
<https://www.usgs.gov/data/vs30/>
- UNAM. (2021). *Red Sismológica del Estado de Querétaro*.  
<https://tellus.geociencias.unam.mx/index.php/grupo-sismologia/#redsismo>
- Valdés, C., Region, L. A., & Golfo, D. E. L. (2008). *Sesión Especial Redes de observatorios geofísicos*. 28(2).
- Vignola, L., Gallipoli, M. R., Chiauuzi, L., Stabile, T. A., Piscitelli, S., Santarsiero, G., Bellanova, J., Calamita, G., & Perrone, A. (2019). Geophysical and engineering analysis of different earthquake damage in Pescara del Tronto and Vezzano (Arquata del Tronto Municipality) following the 24th August 2016 central Italy earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(10), 5471–5493. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0450-5>
- West, M. (2006). The Colima Deep Seismic Experiment: Imaging the Magmatic Root of Colima Volcano. *International Federation of Digital Seismograph Networks. Dataset/Seismic Network*. [https://doi.org/10.7914/SN/ZA\\_2006](https://doi.org/10.7914/SN/ZA_2006)
- Yaghmaei-Sabegh, S., & Hassani, B. (2020). Investigation of the relation between Vs30 and site characteristics of Iran based on horizontal-to-vertical spectral ratios. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 128(October 2019), 105899. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105899>
- Yang, Y., & Ritzwoller, M. H. (2008). Characteristics of ambient seismic noise as a source for surface wave tomography. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(2). <https://doi.org/10.1029/2007GC001814>
- Zhang, Z., Fleurisson, J., & Pellet, F. L. (2018). A case study of topographic site effects on seismic ground motions at Xishan Park ridge in Zigong, Sichuan, China. *Engineering Geology*, #pagerange#. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.07.004>

- Zhu, C., Cotton, F., & Pilz, M. (2020). Detecting site resonant frequency using HVSR: Fourier versus response spectrum and the first versus the highest peak frequency. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 110(2), 427–440. <https://doi.org/10.1785/0120190186>
- Zuñiga, F. R. (2010). El otro riesgo sísmico : los sismos en el centro de México. *XI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica*, 3–4.
- Zúñiga, F. R., Lacan, P., Rodríguez-pérez, Q., & Márquez-ramírez, V. H. (2019). Journal of South American Earth Sciences Temporal and spatial evolution of instrumented seismicity in the Trans- Mexican Volcanic Belt. *Journal of South American Earth Sciences*, October, 102390. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102390>
- Zúñiga, F. R., Suárez, G., Figueroa-Soto, Á., & Mendoza, A. (2017). A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. *Journal of Seismology*, 21(6), 1295–1322. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9666-0>

**ANEXO A. REGISTROS SÍSMICOS ANALIZADOS EN ESTE TRABAJO,  
UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS.**

**Tabla A-1 Registros analizados para la red del Servicio Sismológico Nacional.**

No. de evento	Fecha UTC	Latitud	Longitud	Magnitud*	Profundidad (km)
1	12/04/2003	19.060	-99.200	3.1	9
2	17/05/2003	19.400	-99.120	3.1	18
3	15/12/2003	20.350	-99.070	4	4
4	01/07/2004	20.270	-99.000	2.8	16
5	08/07/2004	19.500	-98.970	3.3	6
6	13/09/2004	19.420	-99.170	3.1	11
7	08/10/2004	19.340	-98.940	3.3	1
8	08/10/2004	19.290	-98.920	3	10
9	11/12/2004	19.380	-99.290	3.2	2
10	14/12/2004	19.180	-98.980	3.3	27
11	20/12/2004	19.200	-98.850	3	21
12	25/12/2004	19.230	-98.930	3.1	5
13	06/02/2005	20.250	-99.180	3.7	4
14	07/02/2005	19.210	-98.930	3.3	16
15	10/02/2005	20.280	-99.180	3.4	5
16	20/02/2005	19.570	-102.110	4.1	50
17	12/05/2005	19.200	-98.970	3.4	37
18	23/08/2005	19.160	-99.140	3.4	4
19	16/10/2005	19.350	-99.090	3.1	5
20	16/10/2005	19.300	-99.200	3.5	14
21	24/01/2006	20.340	-99.220	3.7	5
22	02/02/2006	19.310	-98.850	3.4	7
23	11/02/2006	19.340	-98.930	3.4	5
24	12/03/2006	19.170	-98.950	3.6	2
25	15/04/2006	19.450	-96.540	3.9	52
26	30/04/2006	19.970	-100.830	4.2	15
27	05/05/2006	19.170	-98.950	3.5	1
28	14/07/2006	20.190	-98.870	3.7	72
29	28/07/2006	19.510	-99.060	3.5	5
30	30/07/2006	19.570	-98.890	3.5	13

31	29/10/2006	18.260	-97.560	3.8	60
32	28/11/2006	19.690	-96.210	3.6	14
33	18/12/2006	20.920	-104.470	3.9	44
34	11/01/2007	20.430	-99.000	3.1	5
35	05/02/2007	20.210	-99.220	3	8
36	17/02/2007	18.200	-97.440	3.2	65
37	12/05/2007	20.800	-104.670	4.5	4
38	14/05/2007	21.360	-104.750	4.4	12
39	30/05/2007	19.210	-99.450	4	3
40	20/06/2007	18.850	-98.800	3.7	1
41	15/07/2007	19.430	-99.530	3.3	3
42	22/07/2007	19.060	-98.530	3.4	2
43	17/10/2007	19.580	-101.080	3.8	5
44	17/10/2007	19.710	-101.190	3.6	16
45	17/10/2007	19.720	-101.190	3.5	12
46	22/02/2008	19.120	-98.490	3.7	1
47	04/07/2008	21.740	-104.970	4.4	59
48	09/08/2008	19.340	-98.380	3.5	4
49	23/11/2008	20.040	-98.790	3.4	2
50	24/11/2008	18.080	-97.350	3.7	71
51	31/12/2008	20.230	-99.120	3.5	5
52	02/01/2009	18.870	-98.840	3.7	5
53	17/01/2009	20.380	-99.040	3.5	12
54	27/01/2009	18.050	-97.600	4.3	56
55	05/03/2009	20.800	-105.270	3.9	14
56	28/03/2009	21.320	-104.690	3.9	20
57	06/05/2009	20.370	-99.110	3.5	11
58	17/08/2009	19.910	-96.290	3.8	5
59	02/11/2009	18.920	-98.800	3.7	5
60	15/12/2009	19.330	-96.410	3.8	26
61	21/03/2010	20.460	-99.030	3.7	5
62	23/03/2010	20.480	-99.060	3.1	5
63	26/03/2010	20.480	-99.060	3.4	5
64	07/04/2010	18.150	-97.230	4.1	76
65	24/06/2010	19.440	-99.230	3.4	5
66	24/06/2010	19.380	-99.150	3.1	14
67	05/07/2010	19.230	-98.920	3.7	10
68	10/09/2010	18.180	-97.410	3.8	74
69	03/12/2010	19.030	-99.220	3.7	4

70	26/12/2010	20.340	-104.250	3.8	17
71	04/03/2011	21.040	-105.110	3.5	17
72	09/03/2011	18.360	-97.420	3.7	72
73	01/06/2011	20.770	-104.740	3.6	16
74	01/08/2011	20.690	-104.220	3.8	10
75	19/08/2011	19.570	-96.110	3.9	20
76	19/09/2011	19.170	-98.600	3.7	1
77	07/10/2011	18.190	-97.340	3.5	67
78	01/11/2011	19.880	-96.410	3	3
79	10/12/2011	19.110	-98.850	3.7	3
80	05/01/2012	19.103	-98.691	3.2	3
81	02/02/2012	19.029	-101.625	4	107.4
82	23/03/2012	20.274	-98.947	2.4	1.2
83	25/06/2012	19.395	-98.997	3.4	1
84	06/07/2012	19.471	-96.548	4.1	17.4
85	24/07/2012	18.106	-97.643	3.7	62
86	09/11/2012	19.902	-99.004	3.3	20
87	02/12/2012	19.483	-96.249	3.9	3.1
88	11/01/2013	19.113	-98.744	3.8	2
89	15/01/2013	19.075	-98.716	3.3	5
90	08/02/2013	20.124	-100.475	3.8	6.5
91	06/03/2013	18.341	-97.464	3.5	15.5
92	15/03/2013	20.099	-100.232	3.7	2
93	30/03/2013	18.167	-97.575	3.3	63
94	15/06/2013	21.008	-105.294	4.2	15.8
95	02/08/2013	20.448	-98.967	2.7	1
96	06/08/2013	20.739	-105.297	3.9	24.8
97	06/08/2013	20.634	-105.091	3.5	5
98	07/08/2013	20.247	-99.208	3.3	1
99	07/09/2013	20.212	-104.416	3.7	15
100	17/09/2013	20.352	-99.217	3.5	2
101	18/09/2013	19.618	-96.793	3.3	5
102	23/09/2013	20.341	-99.213	4	3.1
103	16/10/2013	20.817	-105.075	4.2	8.9
104	29/10/2013	19.606	-96.180	3.3	5
105	10/01/2014	20.994	-104.111	3.6	20
106	22/01/2014	19.010	-98.588	3.2	1.8
107	04/03/2014	19.083	-98.629	3.3	3
108	07/05/2014	20.459	-99.007	3	3

109	20/06/2014	21.027	-104.290	3.5	50
110	25/06/2014	19.921	-98.905	3.6	5
111	15/08/2014	19.372	-96.252	3.6	10
112	18/09/2014	19.650	-96.285	3.4	7.1
113	19/10/2014	18.150	-97.300	3.6	64.2
114	05/12/2014	21.020	-101.618	3.6	11
115	17/12/2014	18.237	-97.674	3.7	60.6
116	31/12/2014	20.872	-104.565	3.1	5
117	11/01/2015	21.202	-104.213	3.8	38.3
118	20/01/2015	20.380	-98.959	2.9	3
119	25/01/2015	20.728	-104.008	3.9	16.1
120	25/01/2015	21.176	-104.065	3.7	9.4
121	04/02/2015	21.169	-104.731	3.7	5
122	22/02/2015	20.869	-104.438	3.2	11.3
123	16/03/2015	21.171	-104.336	3.4	28.2
124	27/03/2015	20.351	-99.021	3.8	5
125	01/05/2015	20.777	-104.249	3.7	39.4
126	03/06/2015	20.933	-104.094	3.7	15
127	13/06/2015	20.749	-105.299	3.8	25
128	25/07/2015	18.070	-97.382	3.8	67.2
129	28/08/2015	19.401	-96.207	3.8	16.1
130	16/10/2015	19.020	-98.655	3.4	1
131	07/11/2015	19.733	-96.696	4.1	5
132	26/12/2015	19.549	-102.106	4	5
133	16/01/2016	19.649	-96.802	3.1	42.6
134	20/01/2016	20.227	-99.020	2.5	5
135	20/01/2016	20.125	-98.985	2.7	5
136	07/06/2016	18.934	-101.664	4	65
137	19/06/2016	19.922	-100.876	4.1	20
138	08/07/2016	19.040	-98.613	3.3	5
139	19/07/2016	18.286	-97.383	3.9	56.7
140	19/12/2016	19.720	-101.024	4	40.8
141	23/01/2017	20.389	-99.145	2.9	5
142	07/02/2017	20.394	-99.036	3	5
143	15/02/2017	19.343	-96.206	4.8	16.6
144	15/02/2017	19.339	-96.256	3.7	16
145	24/09/2017	20.347	-99.506	3.4	5
146	24/12/2017	18.821	-98.598	3.4	3.1
147	03/01/2018	18.866	-98.637	3.2	3.9



148	11/01/2018	19.852	-99.072	3.4	5.6
149	12/02/2018	18.237	-97.472	4	65.9
150	23/02/2018	20.459	-99.143	2.5	5
151	08/06/2018	19.952	-96.750	3.9	11.5
152	03/12/2018	20.794	-101.238	3.8	5
153	07/03/2019	19.397	-96.670	4	5
154	03/04/2019	20.323	-99.076	2.5	4
155	04/04/2019	20.244	-99.015	3.2	5
156	24/04/2019	19.662	-100.927	4	10
157	29/08/2019	19.806	-100.980	4.1	17.3
158	03/11/2019	18.997	-101.575	4.2	7.4
159	07/12/2019	18.918	-98.611	3.1	1.8
160	27/12/2019	18.822	-98.821	3.8	4
161	04/01/2020	19.172	-98.969	3.4	2.4
162	17/01/2020	19.862	-99.061	3	3.9
163	22/01/2020	19.862	-101.073	4.1	3.4
164	24/01/2020	19.419	-96.321	3.3	15
165	30/01/2020	19.462	-102.095	4.2	30.5
166	31/01/2020	19.474	-102.083	4.1	28.2
167	01/02/2020	19.494	-102.108	4	27.3
168	02/02/2020	20.221	-101.158	4	20
169	03/02/2020	19.481	-102.156	4	21.5
170	07/07/2020	19.989	-96.648	3.2	10
171	12/07/2020	19.862	-96.721	3.6	5
172	12/09/2020	19.500	-102.050	4	18

\*Magnitud reportada por el servicio Sismológico Nacional y por la dependencia que registro el evento.

**Tabla A-2 Registros analizados para la red MASE.**

No. de evento	Fecha UTC	Latitud	Longitud	Magnitud*	Profundidad (km)
1	21/06/2005	19.55	-98.99	3	1
2	07/08/2005	19.74	-98.61	4	7
3	16/10/2005	19.35	-99.09	3.1	5
4	24/01/2006	20.34	-99.22	3.7	5
5	11/02/2006	19.34	-98.93	3.4	5
6	12/03/2006	19.17	-98.95	3.6	2
7	14/07/2006	20.19	-98.87	3.7	72
8	30/07/2006	19.57	-98.89	3.5	13

9	11/11/2006	19.62	-99.95	3.6	29
10	25/01/2007	19.18	-99.16	3.7	30
11	30/05/2007	19.21	-99.45	4	3

\*Magnitud reportada por el servicio Sismológico Nacional y por la dependencia que registro el evento.

**Tabla A-3 Registros analizados para la red MARS.**

No. de Evento	Fecha UTC	Latitud	Longitud	Magnitud*	Profundidad (km)
1	26/03/2006	18.410	-103.120	4.2	5
2	19/05/2006	19.200	-102.720	4	9
3	27/06/2006	19.260	-102.320	4	16
4	16/07/2006	18.850	-102.590	4	68
5	30/01/2007	20.350	-103.870	3.7	9
6	25/03/2006	19.190	-104.220	4.4	5
7	30/03/2006	19.460	-104.440	4.2	85
8	13/10/2006	19.270	-104.490	4.2	20

\*Magnitud reportada por el servicio Sismológico Nacional y por la dependencia que registro el evento.

**Tabla A-4 Registros analizados para la red CODEX.**

No. de Evento	Fecha UTC	Latitud	Longitud	Magnitud*	Profundidad (km)
1	05/08/2006	18.990	-103.790	4	14
2	14/10/2006	19.230	-103.610	4	107
3	13/05/2007	19.300	-103.920	3.9	24
4	06/11/2006	18.770	-103.600	3.8	78
5	18/05/2006	18.780	-103.740	4.6	12

\*Magnitud reportada por el servicio Sismológico Nacional y por la dependencia que registro el evento.

**Tabla A-5 Registros analizados para la red GECO.**

No. de evento	Fecha UTC	Latitud	Longitud	Magnitud*	Profundidad (km)
1	16/01/2014	19.266	-97.2627	3.4	9
2	09/05/2014	18.9767	-97.2685	3.7	3
3	04/08/2014	18.1837	-97.8347	4	59.2
4	13/08/2014	20.2883	-97.6115	3.6	25.3
5	15/08/2014	19.3722	-96.2518	3.6	10
6	01/09/2014	20.3335	-97.233	3	10
7	19/09/2014	19.6473	-96.2797	3.3	7.6
8	19/10/2014	18.1498	-97.2997	3.6	64.2

9	08/11/2014	19.5065	-96.7767	3.6	5
10	06/01/2015	19.2837	-96.2592	4.4	17.1
11	06/05/2015	19.1572	-97.1667	3.7	10
12	16/08/2015	19.6465	-97.553	3.4	20
13	25/10/2015	19.2553	-97.3027	3.7	77.3
14	07/11/2015	19.7332	-96.6963	4.1	5
15	18/12/2015	19.3482	-96.233	3.9	16
16	16/01/2016	19.649	-96.8017	3.1	42.6
17	28/01/2016	19.4543	-96.7167	3.4	44
18	08/02/2016	19.6565	-97.3482	4.6	6.9
19	25/02/2016	19.2278	-97.402	3.5	5
20	29/02/2016	19.2567	-96.2615	4	10
21	13/03/2016	19.3063	-97.034	3.7	55.3
22	01/04/2016	19.4778	-96.4395	3.4	1.6
23	01/04/2016	19.701	-96.6835	3.7	4
24	11/06/2016	18.8528	-97.1943	3.9	12.5
25	11/06/2016	18.8528	-97.1943	3.9	12.5
26	16/06/2016	19.9523	-96.7703	3.3	10
27	27/06/2016	19.9535	-96.7642	3.4	10

\*Magnitud reportada por el servicio Sismológico Nacional y por la dependencia que registro el evento.

**Tabla A-6 Registros analizados para la red del Centro de Geociencias.**

No. de evento	Fecha UTC	Latitud	Longitud	Magnitud*	Profundidad (km)
1	08/02/2013	20.124	-100.475	3.8	6.5
2	07/07/2016	20.554	-101.095	3.7	8
3	19/09/2017	20.164	-100.087	3.1	10
4	23/02/2018	20.542	-99.693	3.3	13.8
5	07/06/2018	20.040	-101.023	3.8	10
6	20/09/2018	20.501	-99.612	3.2	2
7	03/12/2018	20.794	-101.238	3.8	5
8	13/12/2018	20.567	-99.620	3.4	9.5
9	14/03/2019	20.735	-99.630	3.6	5
10	23/03/2020	20.157	-99.214	3.8	10
11	20/06/2020	20.256	-99.195	3.3	6.4
12	08/08/2020	20.410	-99.310	3.7	5
13	13/08/2020	20.287	-99.142	2.7	5
14	09/09/2020	21.010	-99.600	3.7	16

15	23/09/2020	20.800	-99.360	3.9	2
----	------------	--------	---------	-----	---

\*Magnitud reportada por el servicio Sismológico Nacional y por la dependencia que registro el evento.

**Tabla A-7 Registros analizados para la red CENAPRED.**

No. de evento	Fecha UTC	Latitud	Longitud	Magnitud*	Profundidad (km)
1	15/11/2001	19.55	-99.16	3.5	3
2	09/05/2002	19.51	-99.03	3.7	26
3	16/11/2002	16.93	-100.25	3.9	23
4	16/11/2003	19.18	-98.95	3.8	5
5	16/10/2005	19.29	-99.19	3.5	10

**Tabla A-8 Registros analizados para la red RAI-UNAM.**

No. de evento	Fecha UTC	Latitud	Longitud	Magnitud*	Profundidad (km)
1	20/10/1985	19.400	-99.670	3.2	9
2	30/10/1985	19.712	-99.087	2.7	5
3	05/01/1986	19.410	-99.440	3.5	1
4	05/01/1986	19.300	-99.150	2.5	1
5	18/08/1991	19.330	-99.240	3.8	1
6	22/05/2009	18.130	-98.440	5.7	45
7	28/09/2011	19.710	-96.650	4.1	17
8	05/10/2012	19.440	-102.250	4.2	16
9	21/06/2013	18.600	-98.720	4	20
10	14/12/2013	19.430	-103.720	4.4	106
11	24/12/2013	19.480	-103.760	3.6	10
12	02/10/2014	19.830	-103.350	3.5	10
13	03/10/2014	19.870	-103.340	3.7	7
14	01/12/2014	19.371	-99.232	3.4	5
15	09/08/2015	19.250	-98.240	3.8	5
16	24/10/2015	19.420	-99.190	1.9	2
17	26/12/2015	19.530	-102.130	4	5
18	27/12/2015	19.520	-102.110	3.8	5
19	27/01/2016	18.280	-97.330	4.1	69
20	08/02/2016	19.660	-97.350	4.6	7
21	11/05/2016	20.810	-103.510	4.8	15
22	15/05/2016	20.820	-103.470	3.9	5
23	11/06/2016	18.850	-97.190	3.9	12
24	12/07/2016	20.770	-103.450	3.6	5
25	28/07/2016	20.730	-103.450	3.9	5
26	29/08/2016	18.950	-98.580	3.8	3

27	04/12/2016	20.820	-103.500	3.7	5
28	02/04/2017	20.836	-103.549	3.4	5
29	10/09/2017	19.308	-99.180	2.7	9.4
30	19/09/2017	18.324	-98.754	3.9	60.2
31	29/09/2017	18.355	-98.659	3.8	50.7
32	24/10/2017	18.662	-98.404	3.8	16.6
33	24/10/2017	18.662	-98.404	3.5	15
34	01/11/2017	18.248	-98.599	4.3	52.8
35	06/11/2017	19.188	-98.437	3.1	3
36	09/11/2017	19.376	-99.186	2	8.5
37	18/11/2017	18.639	-98.481	3.6	32.4
38	24/12/2017	18.821	-98.598	3.4	3.1
39	31/12/2017	18.621	-98.429	3.6	10

## ANEXO B. PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SUELO OBTENIDAS PARA CADA SITIO.

**Tabla B-1 Frecuencia fundamental del suelo  $f_0$ , factor de amplificación  $A_0$  y velocidad de onda de corte  $V_{s30}$  obtenidas.**

Red	Estación	Latitud	Longitud	Registros de eventos sísmicos D < 100			Registros de ruido ambiental		
				$f_0$ (Hz)	$A_0$	$V_{s30}$ (m/s)	$f_0$ (Hz)	$A_0$	$V_{s30}$ (m/s)
CEGEO	JRQG	20.6988	-100.4516	0.98	2.82	-	-	-	-
	TXMV	20.6112	-99.9309	16.92	2.64	610	16.00	3.36	537
SSN	ACIG	19.9845	-99.8823	0.60	3.37	-	0.93	2.70	-
	ANIG	21.0538	-104.5207	16.00	3.07	561	16.92	3.18	556
	CUIG	19.3290	-99.1780	0.67	3.71	-	-	-	-
	DHIG	20.3003	-99.0355	-	-	-	-	-	-
	IGIG	20.7530	-101.3278	1.30	6.57	257	-	-	-
	LVIG	19.7262	-96.4185	-	-	-	-	-	-
	MOIG	19.6468	-101.2271	-	-	-	-	-	-
	PPIG	19.0671	-98.6281	12.11	5.10	417	12.11	5.30	409
	TPIG	18.4202	-97.3620	0.60	3.18	-	-	-	-
CODEX	ALPI	19.5027	-103.5218	4.96	3.77	420	4.44	4.25	388
	BAVA	19.2876	-103.5967	0.29	4.93	-	0.40	3.52	-
	CANO	19.6105	-103.4746	0.32	3.98	-	0.34	4.34	-
	COLM	19.3975	-103.7503	10.24	3.68	477	9.69	3.07	518
	COMA	19.3323	-103.7475	0.74	5.53	-	-	-	-
	CUAT	19.3682	-103.6148	0.93	3.23	-	-	-	-
	ESPN	19.4546	-103.7717	-	-	-	18.92	6.06	410
	GARC	19.6383	-103.6705	3.55	6.07	314	3.75	5.67	327
	MAZE	19.4270	-103.6910	0.79	6.08	-	12.80	3.25	526
	MORA	19.5137	-103.7459	0.60	7.34	-	1.45	3.25	372
	OLOT	19.7110	-103.5480	-	-	-	-	-	-
	PAVE	19.6342	-103.6134	6.93	4.89	389	6.56	5.23	373
	PERC	19.5951	-103.5289	2.40	5.88	299	2.40	5.01	324
	SANM	19.4487	-103.5082	2.40	3.21	405	0.36	3.44	-
SCRI	19.4925	-103.8029	3.97	2.80	470	3.17	1.96	542	
SINN	19.5240	-103.6075	-	-	-	-	-	-	

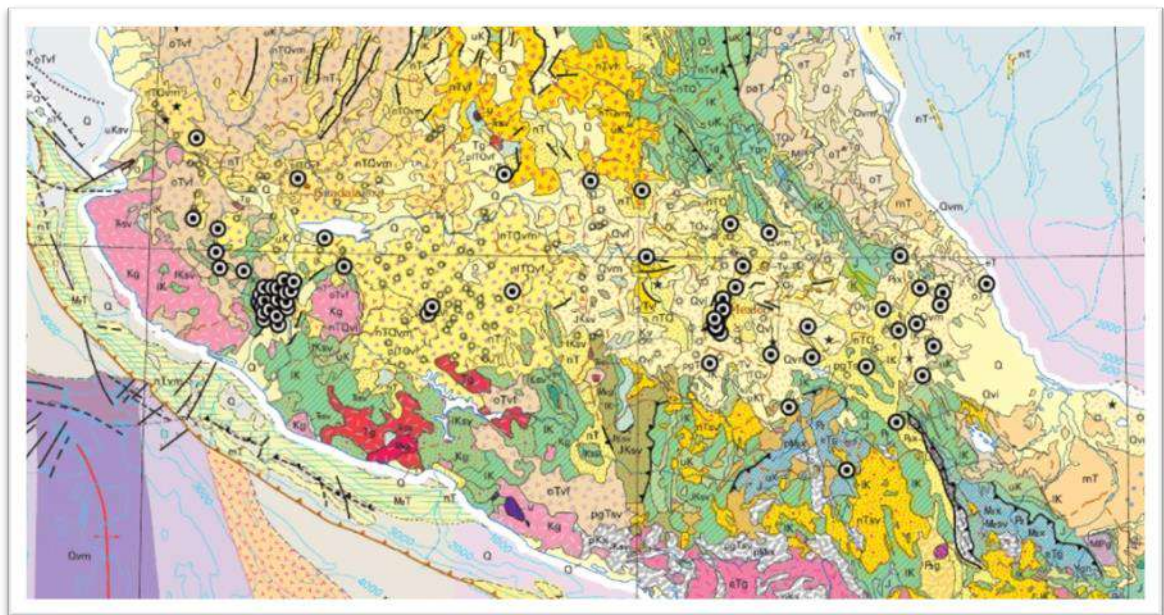
	SNID	19.6352	-103.7535	1.54	4.84	307	0.38	3.23	-
	ZAPO	19.5701	-103.7876	1.16	4.56	303	0.29	2.86	-

**Tabla B-1 Frecuencia fundamental del suelo  $f_0$ , factor de amplificación  $A_0$  y velocidad de onda de corte  $V_{s30}$  obtenidas.**

Red	Estación	Latitud	Longitud	Registros de eventos sísmicos $D < 100$			Registros de ruido ambiental		
				$f_0$ (Hz)	$A_0$	$V_{s30}$ (m/s)	$f_0$ (Hz)	$A_0$	$V_{s30}$ (m/s)
MASE	CUNO	18.9834	-99.2409	1.45	5.53	285	-	-	-
	ESTA	19.4931	-99.1111	0.98	6.06	-	-	-	-
	PSIQ	19.9025	-98.9088	0.63	4.74	-	-	-	-
	PTRP	19.5913	-99.1125	6.93	2.90	505	-	-	-
	TECA	19.7011	-98.9838	0.98	8.41	-	0.21	3.10	-
	TEPE	19.2706	-99.1373	-	-	-	-	-	-
	VEGU	20.2183	-98.6422	1.92	7.79	251	2.54	4.67	339
GECO	AYAH	19.3512	-97.1494	1.23	5.67	274	1.38	3.82	340
	HUAT	19.1367	-96.9765	1.82	12.15	199	1.82	10.30	216
	HUEY	20.0004	-97.3078	9.16	12.69	252	9.16	8.45	309
	LUPE	19.2901	-97.3357	9.16	5.20	394	9.69	4.19	443
	NAOL	19.6465	-96.8760	2.69	7.12	277	3.00	5.06	334
	QUEC	18.9477	-97.6668	10.24	7.42	336	10.83	5.05	411
	TATA	19.6910	-97.1127	3.36	5.46	328	3.36	4.64	356
	TEPY	19.4912	-97.4909	1.30	4.08	326	1.72	2.96	400
CENAPRED	ESTS	19.4916	-99.1111	0.40	5.30	-	-	-	-
	CNPJ	19.3143	-99.1762	1.92	7.79	251	-	-	-
II	CUP5	19.3302	-99.1811	0.26	10.72	-	-	-	-
	SXVI	19.3580	-99.1710	1.92	6.86	267	-	-	-
	TACY	19.4045	-99.1952	-	-	-	-	-	-
	CDGU	19.6995	-103.4478	6.93	3.78	442	-	-	-
	GDLP	20.6825	-103.4422	1.30	5.60	278	-	-	-
	URUA	19.4218	-102.0741	1.72	4.65	319	-	-	-
	CHFL	17.9695	-97.8656	0.98	3.12	-	-	-	-
	RABO	18.5691	-98.4454	-	-	-	-	-	-
	SXPU	19.0399	-98.2151	1.04	4.08	314	-	-	-
	TOTO	19.3302	-98.2568	0.67	3.66	-	-	-	-
	OZST	18.8608	-97.0941	0.79	16.06	-	-	-	-
	XALA	19.5299	-96.9020	1.10	10.02	202	-	-	-

## ANEXO C. RELACIÓN DE RESULTADOS CON LA GEOLOGÍA DEL EJE NEOVOLCÁNICO.

Para poder comparar los resultados con la geología de la zona, se ubicaron las estaciones sismológicas en el mapa geológico obtenido de la página web de la “U.S. Geological Survey (2004)”, donde la zona mostrada fue compilada por el Dr. John C. Reed, Figura C-1.



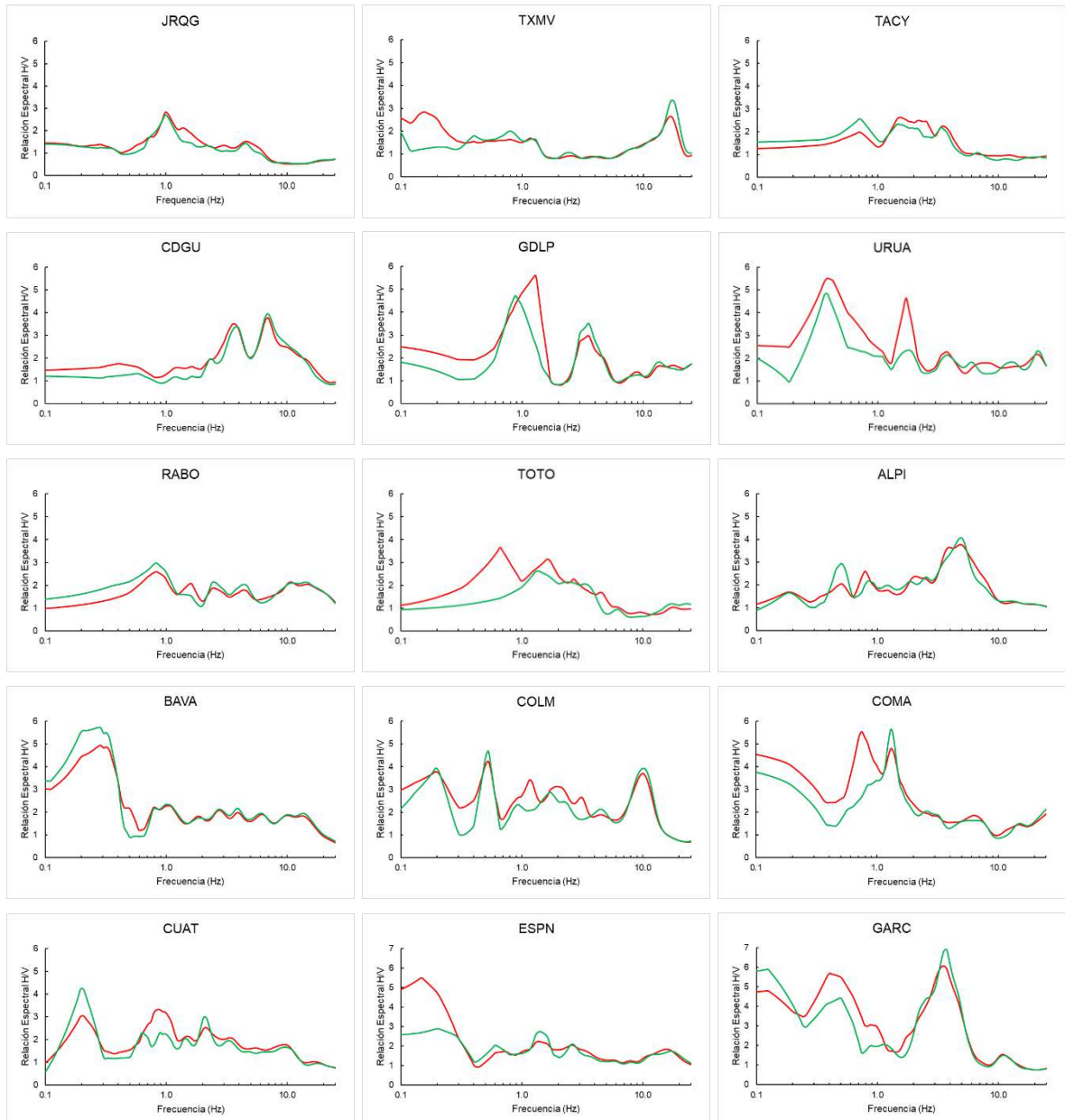
**Figura C-1 Mapa geológico de la zona de estudio. Círculos: estaciones sismológicas.**

No hay relación entre la distribución de las unidades geológicas y la variación de la frecuencia fundamental de vibración  $f_0$  o el factor de amplificación  $A_0$ . Sin embargo, en varias zonas identificadas como sitios de roca las curvas HVSR muestran picos bastante claros, tal es el caso de las estaciones MA44, MA45, GARC, GDLP, MA41, PERC, MA21, MA27, IGIG, MA17, VEGU, ESTA, TECA, CNPJ, SXVI, LUPE, OZST, XALA, HUAT, HUEY, QUEC, AYAH, NAOL y TATA. En estos sitios hay que tener especial cuidado, ya que pueden existir estratos subyacentes que generen contrastes de impedancia importantes.

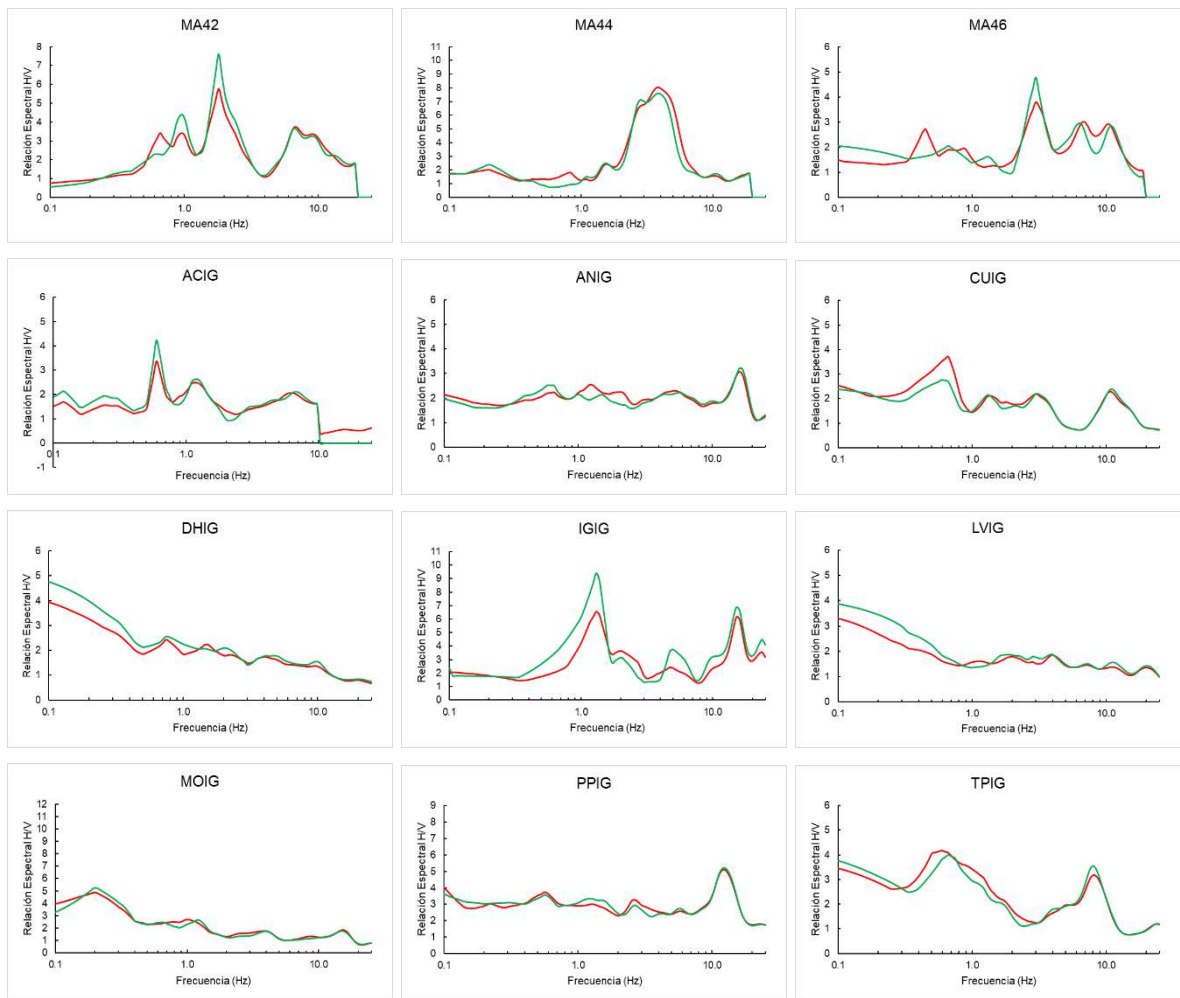


## ANEXO D. ANÁLISIS DE DATOS POR PARTES.

Se realizó un análisis de datos por partes en 45 de las 66 estaciones localizadas dentro del Eje Neovolcánico. En la Figura D-1 se observan los resultados, primero se analizaron entre el 50% y el 60% del total de datos para cada estación (línea verde) y después se realizó el análisis del 100% (línea roja).







**Figura D-1 Graficas HVSR resultado del análisis por partes. Línea verde análisis del 50% al 60% de los datos. Línea roja análisis del 100% de los datos.**

Al observar las gráficas de la Figura D-1 se aprecia que las diferencias son mínimas. Es claro que en las estaciones donde se tiene una mayor cantidad de datos las curvas son casi idénticas y viceversa. Las curvas que presentan picos, en ambos casos son en el mismo rango de frecuencias con pequeñas variaciones. Y el comportamiento se mantiene para las gráficas donde no se tienen picos o estos no son tan claros.