



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SÁN NICOLÁS DE HIDALGO

Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra

“Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy”



POSGRADO INICIT



MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

Aplicación de la técnica de cocientes espectrales en el análisis de efectos de sitio y construcción de escenarios en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca, México.

TESIS

PRESENTA:

GILDARDO TALAVERA CERVANTES

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN
DEL TERRITORIO**

DIRECTOR DE TESIS

DR. ÁNGEL GREGORIO FIGUEROA SOTO

CODIRECTOR DE TESIS

DRA. AVITH DEL REFUGIO MENDOZA PONCE

Morelia, Michoacán, Marzo del 2025

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor el Dr. Ángel Figueroa Soto quiero expresar mi más sincero agradecimiento, quien con su conocimiento y enseñanza permitió el desarrollo de este trabajo de investigación y este se volvió un tanto menos complicado. Más allá de lo académico, admiro la gran persona que es, muchas gracias por todo Doctor.

A la Dra. Avith Mendoza Ponce por la oportunidad de trabajar junto a ella, por la paciencia y empeño que tuvo conmigo con la finalidad de obtener mis objetivos de manera exitosa.

Al comité tutorial por la revisión de esta tesis, por sus comentarios y sugerencias que fueron muy valiosas.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), en especial al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICIT), donde me desempeñé durante los dos años del posgrado y tuve la oportunidad de continuar con mi formación académica.

A mis padres por el esfuerzo y constancia diaria para apoyarme tanto económica como mentalmente. También aprecio que me hayan inculcado valores de vital importancia que son fundamentales para alcanzar mis metas.

Al departamento de bomberos y protección civil de la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca por su ayuda y logística para llevar a cabo el trabajo de campo.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado para la realización de mi maestría.

RESUMEN

Oaxaca es uno de los estados con mayor registro de sismos en la República Mexicana, por los sismos que ocurren en la costa, así como los que se generan al interior del estado. Particularmente en la Heroica Ciudad de Huajuapán de León se han sentido fuertes movimientos del suelo generados principalmente por sismos asociados a proceso de subducción (sismos 23/08/1965, 20/03/2012, 07/09/2021 con magnitudes de 7.5, 7.5 y 7.1, respectivamente); así como, a la ocurrencia de sismos intraplaca con profundidad intermedia generados dentro la placa de Cocos subducida (sismos 15/06/1999, 24/10/1980, 19/09/2017 con magnitudes de 7, 7.1 y 7.1 respectivamente). La Heroica Ciudad de Huajuapán de León ha mostrado daños materiales y pérdidas humanas a lo largo de la historia como consecuencia de la alta frecuencia de ocurrencia de distintos tipos de sismos, así como al gran número de edificaciones en la ciudad construidas en zonas de amplificación sísmica. Debido a lo anterior, es importante contar con estudios de caracterización de los efectos de sitio. A partir de estos estudios conocidos también como Microzonificación Sísmica, se determinan los periodos fundamentales del suelo, así como las amplificaciones relativas que pueden presentarse durante un sismo. Para esta investigación, se realizaron campañas de monitoreo sismológico utilizando un sismómetro de banda ancha cubriendo la Ciudad de Huajuapán en un total de 30 puntos seleccionados estratégicamente. Se determinaron los cocientes espectrales y se generó el primer mapa de periodos dominantes y de amplificaciones para la Heroica Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca. Asimismo, se construyó una base de datos de alturas de las edificaciones existentes a través de imágenes panorámicas y visitas a campo en el área urbana de la Ciudad de Huajuapán de León, con la finalidad de definir escenarios sísmicos con base en los periodos fundamentales y amplificaciones. Estos resultados pueden contribuir para una mejor planificación urbana y mitigar el riesgo sísmico en la Heroica Ciudad de Huajuapán de León.

Palabras claves: *Huajuapán de León; Microzonificación sísmica; Sismómetro de banda ancha, Escenarios sísmicos; Riesgo sísmico.*

ABSTRACT

Oaxaca is one of the states with the highest number of earthquakes registered in the Mexican Republic, due to the earthquakes that occur on the coast, as well as those generated in the interior of the state. Particularly in the Heroic City of Huajuapán de León strong ground movements have been felt, mainly generated by earthquakes associated with subduction processes (earthquakes 23/08/1965, 20/03/2012, 07/09/2021 with magnitudes of 7.5, 7.5 and 7.1, respectively); as well as, to the occurrence of intraplate earthquakes with intermediate depth generated within the subducting Cocos plate (earthquakes 15/06/1999, 24/10/1980, 19/09/2017 with magnitudes of 7, 7.1 and 7.1 respectively). The Heroic City of Huajuapán de León has shown material damage and human losses throughout history as a consequence of the high frequency of occurrence of different types of earthquakes, as well as the large number of buildings in the city built in seismic amplification zones. Due to the above, it is important to have characterization studies of site effects. From these studies, also known as Seismic Microzonification, the fundamental periods of the ground are determined, as well as the relative amplifications that can occur during an earthquake. For this research, seismological monitoring campaigns were carried out using a broadband seismometer covering the city of Huajuapán in a total of 30 strategically selected points. Spectral ratios were determined and the first map of dominant periods and amplifications for the Heroic City of Huajuapán de León, Oaxaca was generated. Likewise, a database of existing building heights was constructed through panoramic images and field visits in the urban area of the city of Huajuapán de León, in order to define seismic scenarios based on the fundamental periods and amplifications. These results can contribute to a better urban planning and mitigate the seismic risk in the Heroic City of Huajuapán de León.

Key words: *Huajuapán de León; Seismic microzonation; Broadband seismometer; Seismic scenarios; Seismic risk.*

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 Planteamiento del Problema	14
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo principal	16
1.2.2 Objetivos secundarios.....	16
1.3 Justificación	16
1.4 Hipótesis	17
1.5 Generalidades.....	17
2. ESTADO DEL ARTE	21
2.1 Área de estudio	21
2.2 Geología, estratigrafía y litología del área de estudio.	24
2.3 Algunos estudios de microzonificación previos en diferentes partes del mundo	29
2.4 Algunos estudios previos en la República Mexicana	31
2.4.1 Estudios previos en la ciudad de Querétaro, Querétaro	33
2.4.2 Estudios previos en la ciudad de Morelia, Michoacán.	34
2.4.3 Estudios previos en el estado de Oaxaca.....	35
2.4.4 Estudios previos en la Ciudad de Huajuapán, Oaxaca	37
3. METODOLOGÍA.....	38
3.1 Adquisición de datos	38
3.2 Medición de ruido sísmico.....	43

3.3 Técnica de cocientes espectrales con ruido (Horizontal to Vertical Noise Ratio o HVNR)	44
4. RESULTADOS	47
4.1 Cocientes Espectrales	47
4.2 Mapas de Isoperiodos y de Amplificaciones	50
4.2.1 Isoperiodos	50
4.2.2 Mapa de Amplificaciones	51
4.3 Base de datos de los niveles de las edificaciones en la Ciudad de Huajuapán de León	53
5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	56
5.1 Discusión	56
5.2 Conclusiones y Recomendaciones	63
7. REFERENCIAS	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de los sismos históricos más importantes que han afectado a la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.....	11
Tabla 2. Sismos con magnitudes mayores que 7.0 en Oaxaca del periodo de 1787 a 2020 (Servicio Sismológico Nacional, UNAM, 2018) (Suárez, 2021)	20
Tabla 3. Tiempos de recurrencia para todo el catálogo con diferentes magnitudes. Donde M_2 es la magnitud de los sismos.....	36
Tabla 4. Puntos de medición de ruido sísmico en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.	42
Tabla 5. Tabla con relación entre niveles, isolíneas, zonas y daños históricos.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Series de tiempo versus profundidad; número de sismos por día (hora local); histograma de magnitudes en la zona de Huajuapán de León. Figura tomada de Solano-Hernández y Mendoza Ponce (2021).....	13
Figura 2. Fotografía de los daños en Huajuapán de León ante el sismo de 1980 (Tomada de CENAPRED, 2019).....	15
Figura 3. Mapas de la regionalización sismotectónica de México. (Arriba) Regiones de sismicidad poco profundas ($h < 40$ km). (Abajo) Regiones de sismicidad de profundidad intermedia ($h > 40$ km). El trazado se realizó para que las magnitudes más grandes aparezcan en la parte superior (Tomado de Zúñiga <i>et al.</i> , 2017).....	18
Figura 4. a) Localización geográfica del estado de Oaxaca en la República Mexicana y b) localización geográfica del municipio de Huajuapán de León, Oaxaca.	22
Figura 5. Mapa Regional de Huajuapán de León. Tomado de Hernández-Nieto (2019).....	23
Figura 6. a) Geología de la Heroica Ciudad de Huajuapán de León (INEGI, 2020). Se muestran los sismos que han ocurrido en la zona a partir de la base de datos del SSN (2024). Fuente: Elaboración propia. b) Propuesta de sección geológica modificada de Campos-Madrigal <i>et al</i> (2013), Los triángulos de color rojo en la figura muestran los puntos de monitoreo más cercanos a cada unidad geológica, mientras que, las cruces negras muestran los sitios de interés más próximos a cada unidad.	25
Figura 7. Columna estratigráfica del área de estudio (modificado de Martiny-Kramer, 2010).	28
Figura 8. Mapa de tasas de ocurrencia para eventos sísmicos en Japón para el periodo de 01/01/2009 al 31/12/2009 (tomado de Lombardi y Marzocchi, 2011)..	30
Figura 9. Mapa de amplificación sísmica en el municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México (tomado de Sánchez, 2015).....	32
Figura 10. Distribución de las pseudoaceleraciones en la ciudad de Querétaro considerando un periodo estructural de 2.0 s considerando el sismo ocurrido el	

01/05/2012 de magnitud 5.6 MW ocurrido en Ciudad Altamirano, Guerrero (Tomado de Zavala, 2019)	33
Figura 11. Mapa de ubicación de los puntos de monitoreo de ruido sísmico en la ciudad de Morelia (Google Earth, 2020).....	35
Figura 12. Mapa de microzonificación sísmica para la Zona Metropolitana de la ciudad de Oaxaca (tomado de Márquez-López <i>et al.</i> , 2024).....	37
Figura 13. Ubicación de los sitios de monitoreo realizados por Ramírez (2012) en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.....	38
Figura 14. Componentes del sismómetro y digitalizador utilizado en el monitoreo de ruido sísmico.	39
Figura 15. Esquema del procedimiento para adquisición de datos de microtemores.	40
Figura 16. Mapa de los puntos de sitios de monitoreo para la Ciudad de Huajuapán de León y su zona urbana.....	40
Figura 17. Cobertura de ruido sísmico en una estación. Tomada de Sánchez-Sesma (2011).....	44
Figura 18. Curva H/V típicas en el análisis de respuesta de suelos (tomada de Lermo <i>et al.</i> , 2013), para estimar el periodo fundamental T_s (pico de la curva, eje x) y nivel de amplificación A_0 (máximo valor del cociente H/V, eje y).	45
Figura 19. Cociente espectral del punto de medición 06.....	48
Figura 20. Cociente espectral del punto de medición 12.....	49
Figura 21. Cociente espectral del punto de medición 18.....	49
Figura 22. Cocientes espectrales de los 30 puntos de medición en Huajuapán de León, Oaxaca.	50
Figura 23. Mapa de isoperiodos de la Heroica Ciudad de Huajuapán.....	51
Figura 24. Mapa de amplificaciones relativas de la Heroica Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.	52
Figura 25. Mapa de las estructuras por niveles (1, 2, 3, 4 y 5) en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca. Los diferentes colores representan la cantidad de niveles de edificaciones	53

Figura 26. Mapa de las estructuras de un nivel en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.	54
Figura 27. Mapa de las estructuras de dos niveles en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.	54
Figura 28. Mapa de las estructuras de tres niveles en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.	55
Figura 29. Mapa de las estructuras de cuatro niveles en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.	55
Figura 30. Mapa de las estructuras de cinco niveles en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.	56
Figura 31. Mapa de isoperiodos para las estructuras de un nivel en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca. Los distintos colores representan los periodos fundamentales asociados a las diferentes zonas de la ciudad.....	57
Figura 32. Mapa de isoperiodos para las estructuras de dos nivel en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca. Los distintos colores representan los periodos fundamentales asociados a las diferentes zonas de la ciudad.....	57
Figura 33. Mapa de isoperiodos para las estructuras de un nivel en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca. Los distintos colores representan los periodos fundamentales asociados a las diferentes zonas de la ciudad.....	58
Figura 34. Mapa de isoperiodos para las estructuras de un nivel en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca. Los distintos colores representan los periodos fundamentales asociados a las diferentes zonas de la ciudad.....	58
Figura 35. Mapa de isoperiodos para las estructuras de dos niveles con isolíneas de 0.2 segundos en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.	60
Figura 36. Mapa de isoperiodos para las estructuras de tres niveles con isolíneas de 0.3 segundos en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.	60
Figura 37. Mapa de isoperiodos para las estructuras de cuatro niveles con isolíneas de 0.4 segundos en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.	61
Figura 38. Mapa geológico de Huajuapán de León, Oaxaca, mostrando los isoperiodos.....	62

1. INTRODUCCIÓN

En México, la configuración tectónica es compleja debido a la interacción de la placa Norteamericana con las placas del Pacífico, Cocos, Rivera y Caribe.

En particular, el estado de Oaxaca es uno de los estados con la mayor frecuencia de ocurrencia de sismos en México. Esto se debe a los sismos de subducción que ocurren en la costa, en una zona de fuerte acoplamiento por la subducción de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana. Además, se registran sismos intraplaca que se originan al interior del estado, causados por rupturas dentro de la placa Cocos subducida así como en el interior de la placa Norteamericana (SSN, 2016).

Recientemente, la Heroica Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca, ha experimentado fuertes aceleraciones del suelo debido a la ocurrencia de sismos de subducción. Entre ellos se encuentran los sismos del 29/11/1978 (magnitud 7.6 M_W), el 20/03/2012 (magnitud 7.5 M_W), el 23/06/2020 (magnitud 7.4 M_W), el 07/09/2021 (magnitud 7.1 M_W) y el 19/09/2022 (magnitud 7.7 M_W). Además, se han registrado sismos intraplaca de profundidad intermedia originados dentro de la placa de Cocos, como los del 28/08/1973 (magnitud 7.3 M_W), el 24/10/1980 (magnitud 7.1 M_W), el 30/09/1999 (magnitud 7.0 M_W) y el 19/09/2017 (magnitud 7.1 M_W) (SSN, 2024).

Los sismos históricos han dejado como evidencia la vulnerabilidad de la zona de estudio. En la tabla 1 se muestran los sismos que más han afectado a la Ciudad de Huajuapán de León, reflejando la magnitud y las consecuencias de estos eventos a lo largo de su historia (Suárez, 2021).

Los sismos reportados por el Servicio Sismológico Nacional cerca de la ciudad de Huajuapán de León, tienen profundidades promedio de 60 km por lo que no se puede asociar a fallas corticales.

Tabla 1. Lista de los sismos históricos más importantes que han afectado a la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

FECHA	DESCRIPCIÓN DEL SISMO	DAÑOS
16 DE AGOSTO DE 1711	Se registró con una magnitud estimada de (M6.9) a una profundidad intermedia ocurrido a las 23:30 con epicentro cercano a la Ciudad de Puebla (Suárez, 2021).	En la región de Huajuapán se reportó que la mayoría de las torres y bóvedas de las iglesias cayeron al suelo (Suárez, 2021).
25 DE MARZO DE 1844	Se registró con una intensidad máxima de 6 ocurrido a las 20:43 (Suárez, 2021).	En Huajuapán de León, Oaxaca, algunos edificios, especialmente la parroquia, se cuartearon (Suárez, 2021).
2 DE FEBRERO DE 1856	Se registró con una intensidad máxima de 9 a una profundidad intermedia con epicentro en la zona de Huajuapán de León, Oaxaca (Suárez, 2021).	Se reportaron daños graves en casas e iglesias de Huajuapán de León, Juxtlahuaca y Silacayoapan, Oaxaca (Suárez, 2021).
3 DE OCTUBRE DE 1864	Se registró con una magnitud estimada de (M7.4) a una profundidad intermedia con epicentro en la región limítrofe de Veracruz, Puebla y Oaxaca ocurrido a las 1:50. Con coordenadas de Latitud 17.53° y Longitud -100.15° (Suárez, 2021).	En varias ciudades y pueblos de la zona limítrofe de los estados de Oaxaca, Puebla y Veracruz las iglesias, edificios públicos y muchas casas particulares sufrieron daños (Suárez, 2021).
11 DE MAYO DE 1870	Se registró con una magnitud estimada de (M8) con epicentro en la costa de Oaxaca ocurrido a las 23:17. Fue un sismo de subducción (Suárez, 2021).	En la ciudad de Oaxaca se dañaron el Palacio de Gobierno y el Palacio de Justicia. El ex-convento de la Concepción y la iglesia de San Agustín perdieron sus dos torres (Suárez, 2021).
19 DE JULIO DE 1882	Se registró con una magnitud (M7.3) a una profundidad de 37 km ocurrido a las 14:30 con epicentro cercano a Huajuapán de León, Oaxaca (Acevedo-Martínez, 1945; Despaigne-Longchamp, 2020).	Destruyó el Palacio Municipal, la cárcel, la torre y las cinco bóvedas de la iglesia parroquial, así como 702 viviendas, causando la muerte de una persona y personas atrapadas en los escombros. Los mayores daños se observaron en Huajuapán de León donde la mayor parte de las casas quedaron inhabitables y los edificios públicos fueron prácticamente destruidos (Acevedo-Martínez, 1945; Despaigne-Longchamp, 2020).
3 DE ENERO DE 1904	Fue el primer sismo de magnitud considerable del siglo XX, ocurrió entre	Causó daños en las casas municipales y algunas viviendas

	las 14:45 y las 15:05 horas, no fue posible contar con el dato de magnitud (Colectivo de autores, 2019; Despaigne-Longchamp, 2020).	de San Jerónimo Silacayoapilla, así como, en los templos de esa localidad, San Miguel de Allende, Asunción Cuyotepeji y Santo Domingo Tonalá (Colectivo de autores, 2019; Despaigne-Longchamp, 2020).
3 DE FEBRERO DE 1911	Se registró con una magnitud (M6.5) a una profundidad de 80 km ocurrido a las 14:41:55 con epicentro a 19 km al este de Huajuapán de León, Oaxaca. Con coordenadas de Latitud 17.8° y Longitud -97.6° (Suárez, 2021).	Pudo haber provocado efectos en la población y las estructuras de la época (Colectivo de autores, 2019).
9 DE FEBRERO DE 1928	Se registró con una magnitud (M6.5) a una profundidad de 84 km ocurrido a las 22:39:37 con epicentro a 9 km al noreste de la población de Acatlán de Osorio, Puebla. Con coordenadas de Latitud 18.26° y Longitud -97.99°. El sismo intraplaca tuvo su origen dentro de la placa de Cocos (Suárez, 2021).	Afectó las poblaciones de los límites con Puebla y principalmente a Huajuapán de León en Oaxaca, donde hubo daños importantes (CENAPRED, 2021)
24 DE OCTUBRE DE 1980	Se registró con una magnitud (M7.1) a una profundidad de 65 km ocurrido a las 8:53:37 con epicentro a 19 km al oeste de Acatlán de Osorio, Puebla. Con coordenadas de Latitud 18.174° y Longitud -98.222° (Suárez, 2021). La ruptura principal ocurrió como un fallamiento normal, con parámetros de falla descritos por un rumbo de N88°W, buzamiento hacia el NNE de 26° (Yamamoto <i>et al.</i> , 1984).	En Huajuapán hubo 54 decesos, 14 en la zona urbana; 378 heridos. El 90 % de las edificaciones tuvieron algún daño; 75 escuelas dañadas; 2000 viviendas caídas y cerca de 5,000 casas ameritaron reparaciones (CENAPRED, 2019).
15 DE JUNIO DE 1999	Se registró con una magnitud (M7) a una profundidad de 63 km ocurrido a las 15:42:04 con epicentro a 29 km al suroeste de San Gabriel Chilac, Puebla. Con coordenadas de Latitud 18.133° y Longitud -97.539°. (Suárez, 2021). La longitud de la zona de ruptura se estimó en alrededor de 28 km con un rumbo de la falla de 50° NW (Quintanar <i>et al.</i> , 1999). Las fallas asociadas a este sismo se localizan dentro de la placa de Cocos. El mecanismo focal asociado a este sismo se relaciona con esfuerzos tensionales debido a la interacción de las placas de Norteamérica y Cocos (Lomas <i>et al.</i> , 1999).	Se señala que, en Oaxaca, por el sismo, los daños fueron notables en la zona de la Mixteca, en los distritos de Teposcolula, Huajuapán, Tlaxiaco, Nochixtlán, Cohixtlahuaca, Huautla de Jiménez y Cuicatlán. El 18 de junio hubo lluvias que agravaron los daños y contribuyeron a incrementar la destrucción de casas dañadas (Ramírez-Herrera y Lugo-Hubp, 2000).

**17 DE
SEPTIEMBRE
DEL 2019**

Se registró con una magnitud (M7.1) a una profundidad de 51 km ocurrido a las 13:14:39 con epicentro a 8 km al noroeste de Chiautla de Tapia, Puebla. Con coordenadas de Latitud 18.3297° y Longitud -98.6712° (Catálogo de Sismos grandes SSN, 2024). El mecanismo focal del sismo indicó una falla de tipo normal (rumbo= 112°, inclinación= 46°, desplazamiento o rake= -93°. En esta zona la Placa de Cocos subduce debajo de la placa de Norteamérica (SSN, 2019).

En un recuento de los daños en Huajuapán de León del sismo, resultaron 533 viviendas afectadas, así como 7 edificios municipales, 3 hospitales, 10 templos, 157 escuelas, 8 dependencias del gobierno y 107 heridos (Ríos y Durán, 2021).

Aunque estos sismos de gran magnitud han marcado la historia sísmica de la región, es importante considerar la sismicidad más reciente en la región. Solano-Hernández y Mendoza-Ponce (2021) presentaron un análisis estadístico para sismos en el periodo de 2015 a 2019, mostrando que el 90% de la sismicidad presentan magnitudes del orden de 4.0, con una magnitud promedio de 3.4 (ver figura 1).

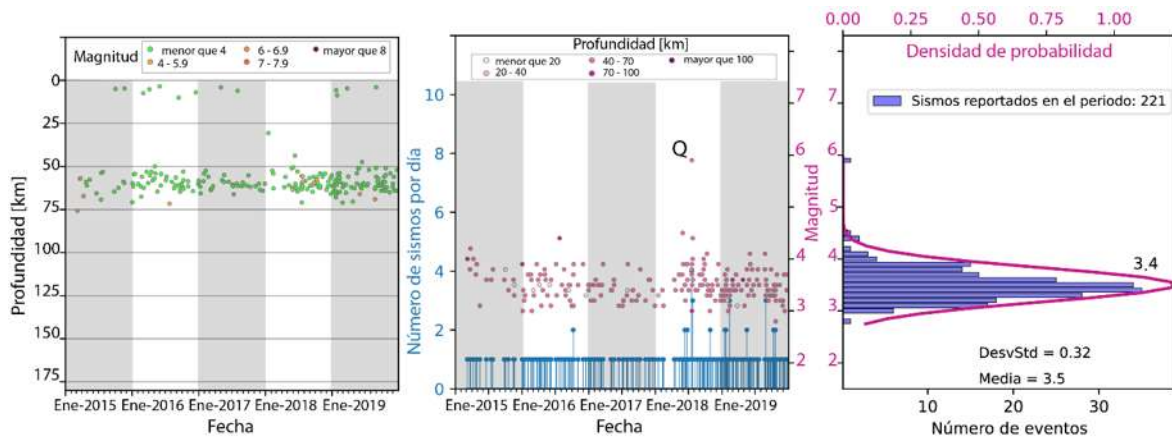


Figura 1. Series de tiempo versus profundidad; número de sismos por día (hora local); histograma de magnitudes en la zona de Huajuapán de León. Figura tomada de Solano-Hernández y Mendoza Ponce (2021).

Este alto índice de sismicidad ha provocado importantes daños materiales y pérdidas humanas en los centros urbanos de Oaxaca. La rigidez del subsuelo (geología del sitio) influye directamente en la magnitud de los daños que pueden sufrir las edificaciones e infraestructura durante un sismo. Las vibraciones de un terreno en específico son intrínsecas de un lugar, depende de su geología y son

características clave para saber los efectos de sitio, es decir, la respuesta del terreno frente a eventos sísmicos de gran magnitud (Peñaloza, 2022). El daño potencial a la infraestructura existente se ve afectado por la respuesta sísmica del terreno, por la falta de planificación territorial y por la falta de un código de construcción.

Para el desarrollo de la presente investigación, se realizaron campañas de monitoreo sismológico de ruido sísmico utilizando un sismógrafo de banda ancha, definiendo puntos de medición específicos. El ruido sísmico, que se refiere a las vibraciones de baja amplitud presentes en el terreno, el cual es crucial para evaluar la respuesta sísmica del suelo. Se calcularon los cocientes espectrales HVNR (“Horizontal to Vertical Noise Ratio”, por sus siglas en inglés), los cuales permiten identificar los periodos dominantes y las amplificaciones del terreno. Asimismo, se construyeron mapas de alturas de los diferentes tipos de edificaciones existentes en la Ciudad, lo que permitió la posterior construcción de escenarios sísmicos de posibles daños, con base en los isoperiodos y amplificaciones relativas. Los resultados del presente trabajo son fundamentales para la planificación urbana y para la posterior mitigación del riesgo sísmico en la Heroica Ciudad de Huajuapán de León.

1.1 Planteamiento del Problema

A lo largo de la historia sísmica de nuestro país, México ha sufrido importantes daños materiales y considerables pérdidas de vidas humanas debido a sismos de gran magnitud. Entre los más devastadores se encuentran el sismo del 28 de marzo de 1787, de magnitud entre 8.4 y 8.6 M_w , con epicentro en las costas de Oaxaca; el sismo del 19 de septiembre de 1985, de magnitud 8.1 M_w , con epicentro en las costas de Michoacán; y el sismo del 7 de septiembre de 2017, de magnitud 8.2 M_w , con epicentro en el Golfo de Tehuantepec (Suárez, 2021).

En la zona donde limitan los estados de Oaxaca, Guerrero y Puebla, se destacan sismos históricos como el del 19 de julio de 1882 y el del 24 de octubre de 1980.

Este último causó daños considerables en las ciudades de Oaxaca, Huajuapán de León (figura 2), Tamazulapán e Ixtlahuaca (CENAPRED, 2021). En particular, la Heroica Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca, se encuentra en esta región de alta actividad sísmica, lo que significa un riesgo importante para la infraestructura y la seguridad de sus habitantes.

Los eventos sísmicos mencionados destacan la necesidad de realizar investigaciones geológicas y geofísicas que complementen los estudios de microzonificación sísmica, con el objetivo de mejorar la seguridad estructural en estas regiones. En la ciudad, generalmente se han construido y continúan construyéndose numerosas estructuras que, en diversos lugares del mundo, han sido identificadas como sísmicamente deficientes o ubicadas cerca de fallas potencialmente activas (Zúñiga *et al.*, 2017).



Figura 2. Fotografía de los daños en Huajuapán de León ante el sismo de 1980 (Tomada de CENAPRED, 2019).

En la mayoría de las ciudades, la falta de estudios detallados sobre los efectos de sitio y la microzonificación sísmica limita la capacidad de las autoridades y los ingenieros para planificar y mitigar adecuadamente los riesgos asociados a los sismos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

Proponer un mapa de microzonificación sísmica y construir escenarios sísmicos para la ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca con base en la caracterización de los efectos de sitio para contribuir a la evaluación del peligro sísmico de la región.

1.2.2 Objetivos secundarios

1. Realizar un trabajo de campo sistemático para la adquisición de datos sísmicos por medio del uso de un sismómetro de banda ancha, seleccionando sitios idóneos.
2. Registrar y analizar el ruido sísmico (microtremores) en sitios de monitoreo dentro de la Ciudad de Huajuapán de León.
3. Calcular los cocientes espectrales HVNR para los sitios de monitoreo sísmico y determinar los periodos fundamentales y amplificaciones relativas.
4. Construir una base de datos de las edificaciones existentes en la ciudad de Huajuapán para estimar los escenarios sísmicos posibles con base en los periodos de interés y las alturas de las estructuras existentes en la ciudad.

1.3 Justificación

La aplicación de la técnica de cocientes espectrales HVNR en el análisis de efectos de sitio permite identificar los periodos dominantes y las amplificaciones del terreno, proporcionando información crucial sobre cómo diferentes áreas de la ciudad pueden responder a eventos sísmicos. Esta técnica es especialmente útil para evaluar la respuesta sísmica del suelo y para desarrollar mapas detallados de microzonificación sísmica.

Además, la construcción de escenarios sísmicos basados en los datos obtenidos a través de los cocientes espectrales y el análisis de las estructuras existentes permitirá a los planificadores urbanos y a los ingenieros diseñar estrategias más efectivas para la mitigación de riesgos. Estos escenarios proporcionan una base

sólida para la toma de decisiones informadas en la planificación urbana, la construcción de nuevas edificaciones y la mejora de la infraestructura existente.

Este proyecto no solo contribuirá al conocimiento científico sobre la sismicidad en Huajuapán de León, sino que también tendrá un impacto directo en la seguridad y el bienestar de sus habitantes, al proporcionar herramientas y datos esenciales para la gestión del riesgo sísmico.

1.4 Hipótesis

Las zonas de mayor peligro sísmico en la ciudad de Huajuapán de León pueden ser identificadas mediante microzonificación sísmica, pues están determinadas por la relación entre los periodos fundamentales del sitio, el espesor de los sedimentos y el tipo de edificaciones existentes. Estos parámetros determinan el tipo de daños que se han presentado en sismos históricos y que pueden presentarse en escenarios futuros.

1.5 Generalidades

Geodinámicamente, México se encuentra inmerso dentro de la interacción de cinco placas tectónicas: Norteamericana, Pacífico, Cocos, Caribe y Rivera. Específicamente, las placas de Rivera y Cocos subducen debajo de la Placa Norteamericana. La Placa de Rivera subduce debajo de los estados de Colima y Jalisco, mientras que la Placa de Cocos subduce debajo de los estados de Chiapas, Oaxaca, Michoacán y Guerrero (Servicio Sismológico Nacional, 2016).

El movimiento simultáneo de estas placas tectónicas configura la actividad sísmica en México: La Placa Norteamericana muestra desplazamiento hacia el suroeste; la Placa del Pacífico hacia el noroeste; la Placa de Cocos presenta un desplazamiento hacia el noreste y la Placa del Caribe hacia el este (Servicio Geológico Mexicano, 2022).

Con base en datos de catálogos instrumentales e históricos, Zúñiga *et al.* (2017) dividieron el territorio mexicano en regiones sismotectónicas (figura 3) con el propósito de definir zonas sismogénicas para estimar el riesgo sísmico. Estas estimaciones se basan en: a) las características tectónicas y geológicas de cada zona, b) mecanismos focales y patrones de fallamiento, c) complejidad de las funciones de tiempo de las fuentes de grandes eventos de subducción, d) sismicidad histórica considerada para delimitar las regiones y e) factor de acoplamiento observado en eventos de subducción (Zúñiga *et al.*, 2017).

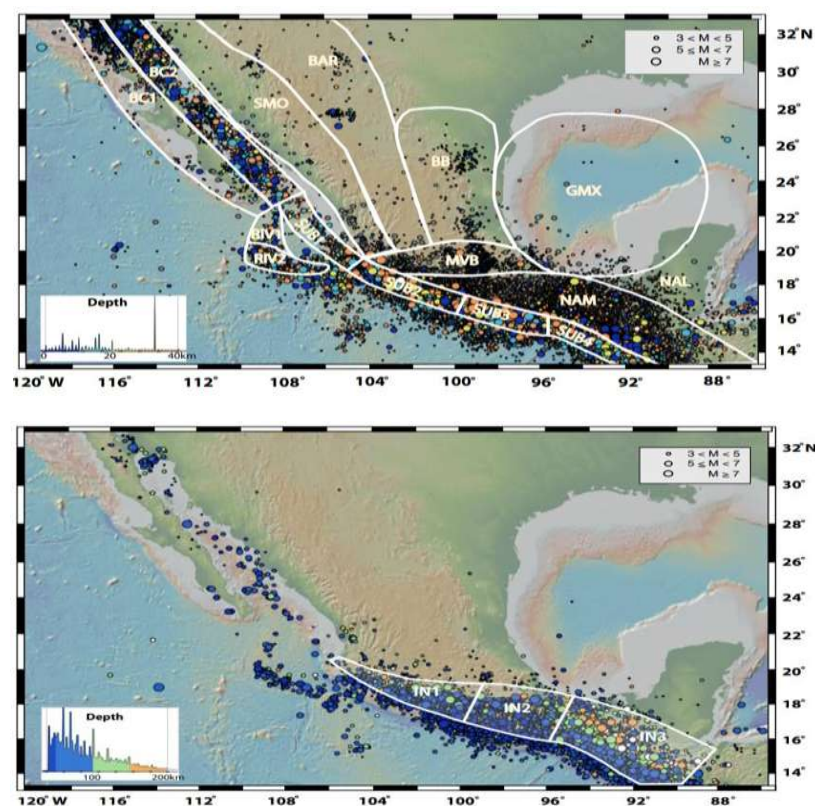


Figura 3. Mapas de la regionalización sismotectónica de México. (Arriba) Regiones de sismicidad poco profundas ($h < 40$ km). (Abajo) Regiones de sismicidad de profundidad intermedia ($h > 40$ km). El trazado se realizó para que las magnitudes más grandes aparezcan en la parte superior (Tomado de Zúñiga *et al.*, 2017).

Oaxaca ha sido afectada por una gran cantidad de sismos con magnitudes mayores a 7.0 M_w . La mayoría de estos eventos sísmicos están asociados con la zona de fuerte acoplamiento entre las placas tectónicas de Cocos y Norteamericana (interplaca, zona SUB3) y otros a procesos de ruptura de la placa Cocos subducida (fallas normales, zona IN2) (Zúñiga *et al.*, 2017). Ejemplos de

sismos generados por el proceso de subducción y que causaron varios decesos y daños en zonas cercanas al epicentro fueron: el sismo del 18 de febrero de 2018 (de magnitud 7.2 M_w), el sismo del 23 de agosto de 1965 (de magnitud 7.5 M_w) y el sismo del 29 de noviembre de 1978 (de magnitud 7.6 M_w) (SSN, 2016).

Adicionalmente, Oaxaca es afectado por eventos intraplaca en la zona sureste de México (zona nombrada por Zúñiga *et al.* (2017) como NAM, ver figura 2) y coincide con la sismicidad en la placa Norteamericana que no está relacionada con el vulcanismo del Cinturón Volcánico Transmexicano; su profundidad máxima se ha definido en 20 km. Por ejemplo, el sismo del 15 de enero de 1931 de magnitud 7.4 M_w dañó inmuebles públicos, así como, exconventos y templos en poblaciones del Valle de Oaxaca, fue identificado mediante un mecanismo focal de falla normal que aparentemente atravesó la litosfera, en una falla ubicada inmediatamente por debajo de una zona de acoplamiento fuerte (Zúñiga *et al.*, 2017). También, el sismo del 30 de septiembre de 1999 de magnitud 7.4 M_w , ocasionó varios decesos en el estado de Oaxaca y causó daños importantes a la infraestructura en casas, hospitales, escuelas, carreteras y puentes (SSN, 2020). Finalmente, el sismo del 7 de septiembre de 2017 (magnitud de 8.2 M_w) ocurrido en el Golfo de Tehuantepec, fue un sismo intraplaca con mecanismos focal asociado a una falla normal que ocurrió dentro de la placa de Cocos. Este sismo provocó graves daños en poblados como Juchitán, Asunción, El Espinal y Ixtaltepec en la región del Istmo (SSN, 2017).

El comienzo del monitoreo sísmico en Oaxaca empieza en la segunda década del siglo XX, ya que, entre 1910 y 1923 se instalaron nueve estaciones sismológicas mecánicas autónomas. La central fue instalada en Tacubaya (Ciudad de México) y las foráneas en las ciudades de Mérida, Oaxaca, Mazatlán, Chihuahua, Guadalajara, Veracruz, Monterrey y Zacatecas. Para ello, se seleccionaron sismógrafos "Wiechert" de fabricación alemana (Márquez-López, 2022).

En el estado de Oaxaca se registra aproximadamente el 25% de los sismos del país, ya que su actividad está asociada principalmente al proceso de subducción

de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica (SSN, 2012). La sismicidad a lo largo de la historia en el estado de Oaxaca, reportada con magnitudes superiores a $M_w > 7$, se observan en la tabla 2.

Tabla 2. Sismos con magnitudes mayores que 7.0 en Oaxaca del periodo de 1787 a 2020 (Servicio Sismológico Nacional, UNAM, 2018) (Suárez, 20201).

AÑO	MES	DÍA	MAGNITUD	PROFUNDIDAD	REFERENCIA
1787	3	28	8.6		Istmo de Tehuantepec, Tsunami en la costa de Oaxaca.
1916	6	2	7	150.0	42 km al sur de SAYULA DE ALEMÁN, VER.
1928	3	21	7.5	33.0	12 km al suroeste de CRUCECITA, OAX.
1928	6	16	7.6	33.0	11 km al oeste de MIAHUATLAN, OAX.
1928	8	4	7.4	33.0	49 km al sur de H TLAXIACO, OAX.
1928	10	8	7.5	33.0	35 km al noroeste de RIO GRANDE, OAX.
1931	1	15	7.4	40.0	30 km al oeste de MIAHUATLAN, OAX.
1937	12	23	7.4	33.0	46 km al suroeste de H TLAXIACO, OAX.
1948	1	6	7	80.0	45 km al sureste de H TLAXIACO, OAX.
1950	12	14	7.2	33.0	47 km al oeste de H TLAXIACO, OAX.
1951	12	11	7	100.0	59 km al este de MATÍAS ROMERO, OAX.
1965	8	23	7.5	12.0	53 km al noreste de CRUCECITA, OAX.
1968	8	2	7.3	16.0	39 km al noreste de PINOTEPA NACIONAL, OAX.
1973	8	28	7.3	82.0	30 km al suroeste de TIERRA BLANCA, VER.
1978	11	29	7.6	23.0	32 km al noroeste de S PEDRO POCHUTLA, OAX.
1980	10	24	7.1	65.0	19 km al oeste de ACLATLAN DE OSORIO, PUE.
1982	6	7	7	19.0	20 km al sureste de OMETEPEC, GRO.
1995	9	14	7.3	21.0	29 km al noreste de OMETEPEC, GRO.
1996	2	24	7.1	15.0	52 km al sur de PINOTEPA NACIONAL, OAX.
1999	6	15	7	63.0	29 km al suroeste de S GABRIEL CHILAC, PUE.
1999	9	30	7.4	39.0	22 km al noreste de PUERTO ESCONDIDO, OAX.
2012	3	20	7.5	18.0	46 km al sur de OMETEPEC, GRO.
2017	9	7	8.2	45.9	140 km al suroeste de PIJJIAPAN, CHIS.
2017	9	19	7.1	38.5	9 km al noreste de CHIAUTLA, PUE.
2018	2	16	7.2	12.0	11 km al sur de PINOTEPA NACIONAL, OAX.
2020	6	23	7.4	22.6	2 km al noreste, de CRUCECITA, OAX

Los ejemplos de sismos mencionados anteriormente subrayan la necesidad de realizar estudios de microzonificación sísmica. Los proyectos de microzonificación sísmica se centran en identificar y caracterizar los materiales superficiales de la corteza para evaluar el peligro sísmico y los efectos locales en ciudades de Oaxaca, como Huajuapán de León. Estos estudios deben definir la distribución y características de los suelos y el substrato, su respuesta dinámica, así como la

presencia de fallas activas y licuefacción. Con esta información, es posible elaborar mapas detallados de peligro sísmico a escala local.

En este contexto, es crucial caracterizar los efectos de sitio en Huajuapán de León y construir escenarios con base en las alturas de las diferentes edificaciones de la ciudad. Esto servirá como insumo para la protección civil municipal, la toma de decisiones y en el futuro, para mejorar las normas de construcción en la ciudad. A pesar de su aporte económico en la región y su alto crecimiento poblacional, La Heroica Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca, no cuenta con un mapa de microzonificación basado en la medición del ruido sísmico actualizado. La falta de esta herramienta esencial pone en riesgo tanto a los habitantes como a la infraestructura.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Área de estudio

México se encuentra entre cinco placas tectónicas: Cocos, Pacífico, Caribe, Rivera y Norteamérica (figura 4). En esta última se encuentra la mayor parte del territorio mexicano. Geográficamente, la Placa del Pacífico incluye la península de Baja California, al Océano Pacífico y el occidente de California. La Placa del Caribe incluye el sur de Chiapas. Las placas de Rivera y Cocos son oceánicas y se ubican en el Océano Pacífico (Servicio Geológico Mexicano, 2022).

Huajuapán de León, en el estado de Oaxaca, se ubica en una zona tectónicamente activa y con alta sismicidad debido a la interacción entre la placa de Cocos y la placa Norteamericana, ya que la subducción de la primera bajo la segunda genera frecuentes movimientos sísmicos. Además, la presencia de fallas locales contribuye a la complejidad tectónica y a la variabilidad en la respuesta sísmica del terreno.

La Heroica Ciudad de Huajuapán de León se localiza al noroeste del estado de Oaxaca, pertenece al municipio de Huajuapán de León, Oaxaca (figura 4). La ciudad está ubicada entre los paralelos $17^{\circ}43'$ y $18^{\circ}03'$ de latitud y los meridianos $97^{\circ}42'$ y $97^{\circ}55'$ de longitud oeste y a una altitud entre 1,400 y 2,300 msnm (INEGI, 2010).

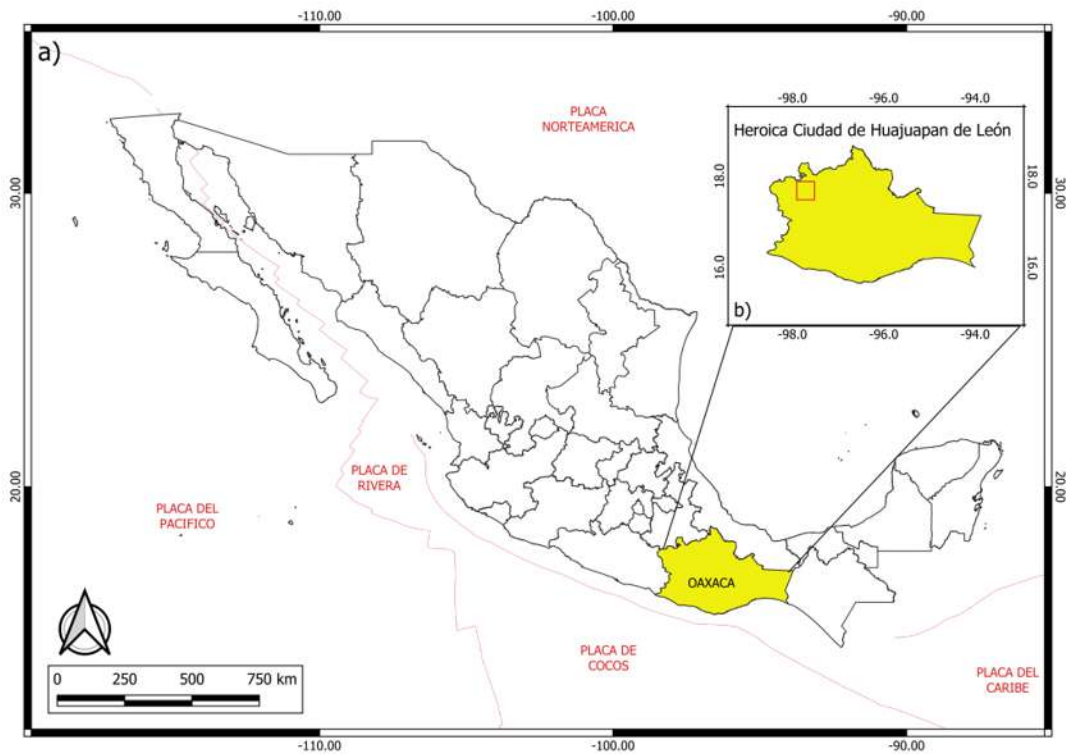


Figura 4. a) Localización geográfica del estado de Oaxaca en la República Mexicana y b) localización geográfica del municipio de Huajuapán de León, Oaxaca.

El relieve de Huajuapán de León está definido por la existencia de montañas que forman parte de la Sierra Mixteca. Las principales elevaciones distinguibles en la ciudad (figura 6) son: La Soledad (altitud 2132 m) y Yucunitzá (altitud 1377 m) (Hernández, 2023).

Los sismos que han afectado a la Ciudad de Huajuapán han sido los que se han generado por el proceso de subducción debido a su gran magnitud y frecuencia de ocurrencia en las costas. Pero, sobre todo, los sismos intraplaca en la placa de Cocos subducida y en la Norteamericana, ya que se origina a poca profundidad y provocan mayores daños. En la zona de estudio existen al menos tres fallas: las

fallas de Sabino, Río Salado y Las Peñas. La Falla Sabino se ubica al oeste de Huajuapán de León y es considerada como una falla normal; La Falla Río Salado se ubica al suroeste de Huajuapán de León y tiene una longitud aproximada de 25 km (figura 5). La Falla de Río Salado, considerada como una falla lateral izquierda, tiene un rumbo de ESE-WNW, corta al Complejo Acatlán y se considera que terminó su actividad antes del Oligoceno (Martiny *et al.*, 2010).

Finalmente, la Falla Las Peñas, al suroeste de Huajuapán de León, tiene una longitud aproximadamente de 18 km con un buzamiento subvertical y de orientación Norte-Sur, que ponen en contacto las sucesiones continentales Jurásicas con sucesiones marinas de la misma edad. La falla corta rocas volcanoclásticas y lavas del Oligoceno por medio de un desplazamiento lateral izquierdo (Martiny *et al.*, 2012).

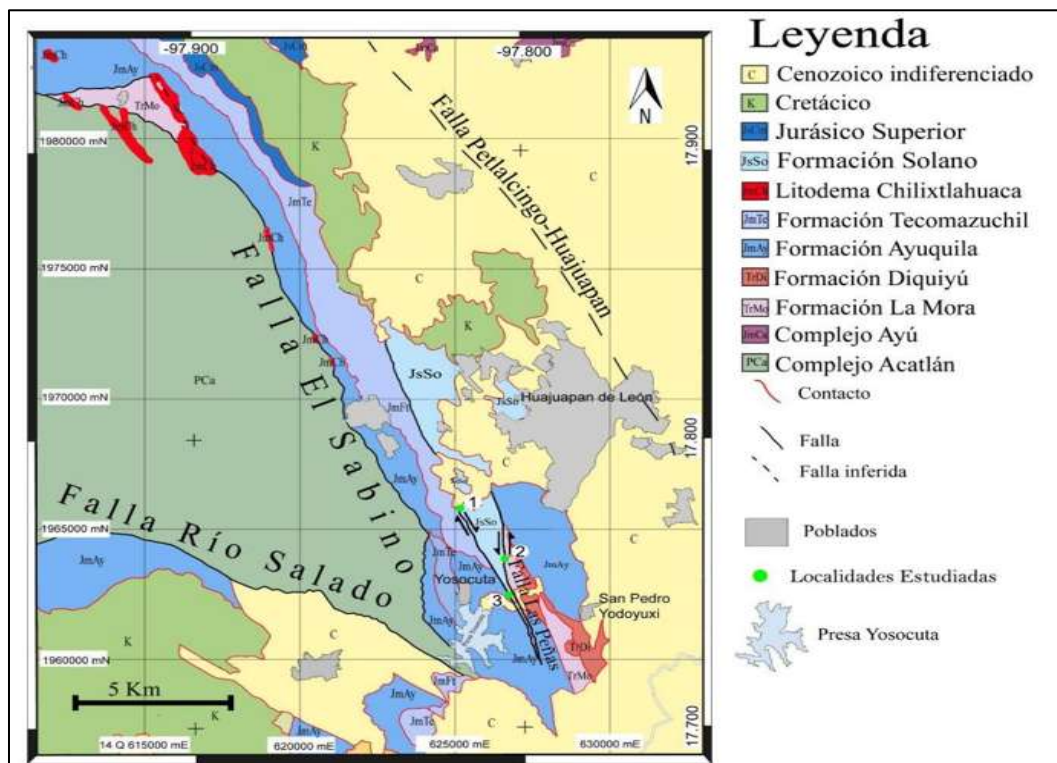


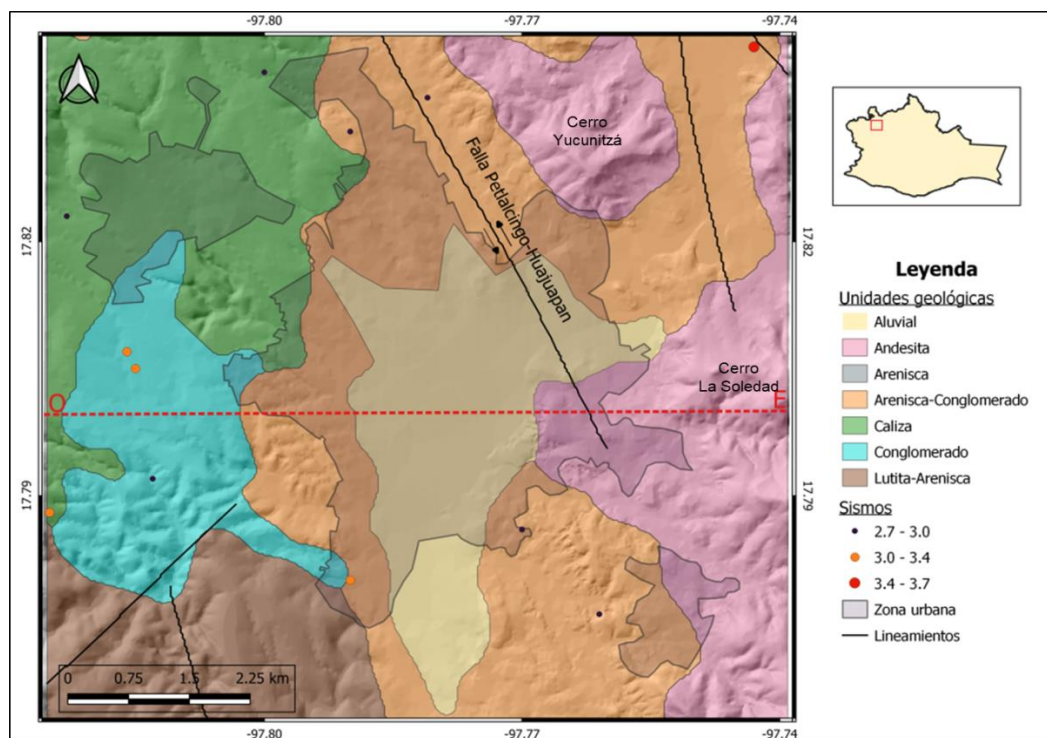
Figura 5. Mapa Regional de Huajuapán de León. Tomado de Hernández-Nieto (2019).

2.2 Geología, estratigrafía y litología del área de estudio.

La Heroica Ciudad de Huajuapán de León se ubica dentro de la cuenca de Tlaxiaco o provincia geológica de Tlaxiaco. Debido a la variedad de problemas estratigráficos, paleontológicos y tectónicos que presenta, esta provincia geológica ha sido considerada una de las más difíciles de interpretar (López-Ramos, 1983).

Los tipos de rocas que se pueden encontrar dentro del área de Huajuapán son de diferente composición y edad (figura 6). Las rocas más antiguas pertenecen al Paleozoico Inferior, están conformadas por una unidad esquistosa denominada Complejo Acatlán que se considera el basamento regional y está constituido principalmente por facies de esquistos verdes que contiene moscovita, biotita y cuarzo (Uribe, 1999).

a)



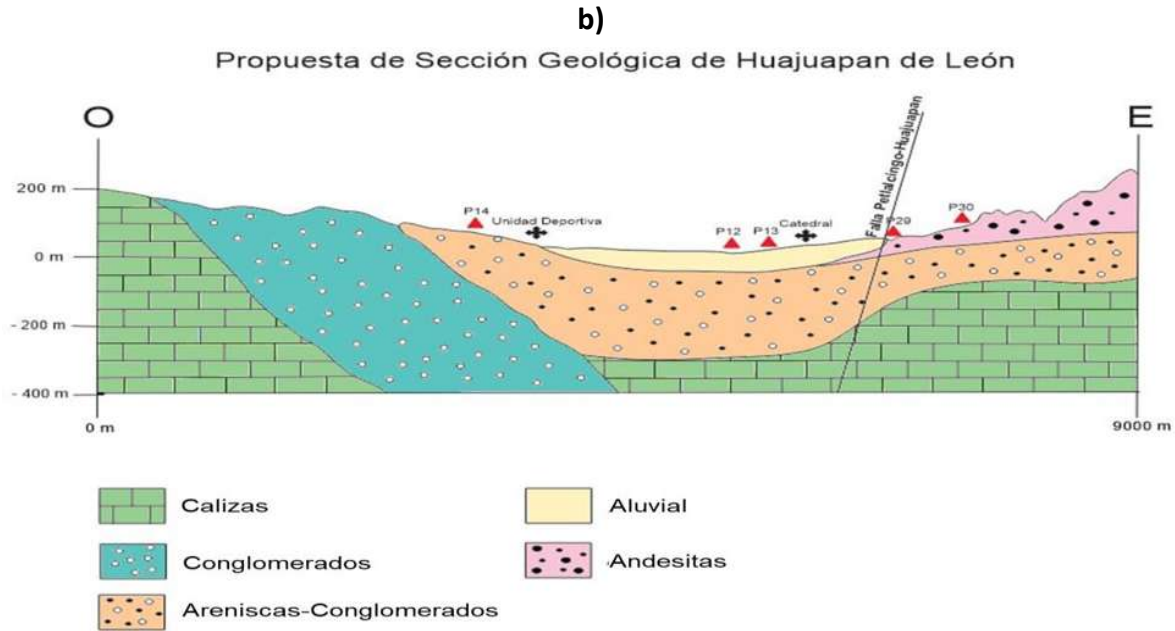


Figura 6. a) Geología de la Heroica Ciudad de Huajuapán de León (INEGI, 2020). Se muestran los sismos que han ocurrido en la zona a partir de la base de datos del SSN (2024). Fuente: Elaboración propia. b) Propuesta de sección geológica modificada de Campos-Madrigal *et al* (2013), Los triángulos de color rojo en la figura muestran los puntos de monitoreo más cercanos a cada unidad geológica, mientras que, las cruces negras muestran los sitios de interés más próximos a cada unidad.

En la figura 6a se puede observar el mapa geológico en planta de la ciudad de Huajuapán de León, destacando la diversidad de tipos de rocas presentes. Entre ellas se encuentra calizas, conglomerados, areniscas, andesitas y depósitos. Las rocas más antiguas son las areniscas del Jurásico Inferior, seguidas por las calizas del Jurásico y, por último, los conglomerados. Todas estas unidades son cubiertas por depósitos aluviales con edades del Terciario Inferior. La zona urbana, representada en color gris, está mayormente construida sobre los depósitos aluviales. Al oriente de la ciudad de Huajuapán se encuentra una falla lateral izquierda llamada Petlalcingo – Huajuapán, la cual es una estructura de 37 km de longitud con rumbo entre N15°W y S20°E y con echados de entre 73° hasta verticales con buzamiento al NE. Esta falla afecta a las formaciones Huajuapán y Tecomazúchil (SISPLADE, 2022). Los sismos presentados en la figura 6a tienen profundidades promedio de 60 km, esto indica que los sismos se asocian a ruptura dentro de la placa de Cocos subducida.

En la figura 6b, se presenta una propuesta de sección geológica de Huajuapán, basada en la cuenca tectónica Ayuquila. Esta se elaboró a partir de la cartografía de sistemas de abanicos aluviales que incluyen depósitos con estructuras trenzados con un drenaje general hacia el sur (Campos-Madrigal *et al.*, 2013). El perfil trazado de oeste a este de la geología en planta (figura 6a), muestra una altura máxima de 200 m y profundidad máxima de -400 m, abarcando una distancia de 9 km. Las unidades geológicas más profundas incluyen en la base depósitos de calizas y conglomerados, seguidas en discordancia por la unidad de areniscas, conglomerados, y andesitas, estas últimas cubiertas por depósitos aluviales. La falla Petlalcingo-Huajuapán, corta las andesitas, las areniscas, conglomerados, así como las calizas.

Las secuencias de rocas sedimentarias de edad Mesozoica pertenecen a unidades del Jurásico Inferior. Estas secuencias están formadas por lechos rojos marinos y continentales (lutitas-areniscas) y pertenecientes a las formaciones 1) el Rosario, 2) Conglomerado Cualac, 3) Zorrillo, 4) Taberna y 5) Simón (Salas, 1949). Estas formaciones se acomodan en forma discordante con el complejo basal (INEGI, 2004) y afloran al noroeste de Huajuapán, expandiéndose hacia el sur. La estructura de los conglomerados es compacta con una selección en el tamaño del grano de regular a pobre presentando fuertes variaciones dentro de una misma capa. La granulometría que más predomina es la de arena gruesa que oscila entre los 0.5 a 2 mm y grava arenosa de 0.5 a 10 mm. Con una menor proporción existen estratos con tamaño de grano fino a muy fino o menores a 0.05 mm. Los granos clásticos son principalmente de cuarzo, fragmentos de feldespatos, rocas volcánicas extrusivas y calcita cementados con carbonatos de sílice y calcio (Ramírez, 2012).

Le sobreyacen en discordancia unidades relacionadas al Cretácico Inferior conformadas por lutitas, calizas y caliza-lutitas, asociadas con la Formación Zapotitlán y Teposcolula. Esta unidad se correlaciona a la Formación Teposcolula de edad Jurásica (INEGI, 2004). Se encuentra sobreyaciendo a la unidad lutitas-areniscas, dicha unidad está formada por calizas, de textura mudstone, de colores

gris claro a gris oscuro hasta negro, en estratos donde los espesores varían de 0.4 hasta 1.2 metros; estas se encuentran plegadas y fracturadas, con presencia de miliólidos, en una matriz de cuarzo, calcita y pedernal. Cabe mencionar que se presentan algunos estromatolitos (Caballero-Miranda, 1990).

En algunos sitios al NNW de Huajuapán se observan zonas de carsticidad (incluso con formación de cavernas y grutas) (Caballero-Miranda, 1990). Morfológicamente estas zonas forman colinas con pendientes suaves asociadas con formas cársticas. Uribe (1999) y Caballero (1989) la ubican dentro de la unidad Solano y la caracterizan como una unidad estratificada con echados buzando hacia el noreste.

Para el Cenozoico, el registro estratigráfico es de carácter continental, describiendo depósitos volcanoclásticos y fluviales, así como lavas y rocas volcánicas piroclásticas. En el área de estudio las litologías corresponden a cenizas volcánicas, brechas, arcillas arenosas, capas de conglomerados y areniscas, que se presentan interestratificadas y se sobreyacen de manera discordante a los paquetes Mesozoicos (Gutiérrez, 2010).

En las cercanías de Huajuapán (figura 7), los conglomerados han sido descritos de manera general por Salas (1949) y Erben (1956). Salas (1949) asoció todas las rocas continentales del Paleógeno dentro de una unidad y las describió como una “serie de areniscas, arcillas, arenas, cenizas volcánicas y capas de conglomerados y brechas que suceden interestratificados en la sección”; a esta unidad la denominó como “Capas Huajuapán”.

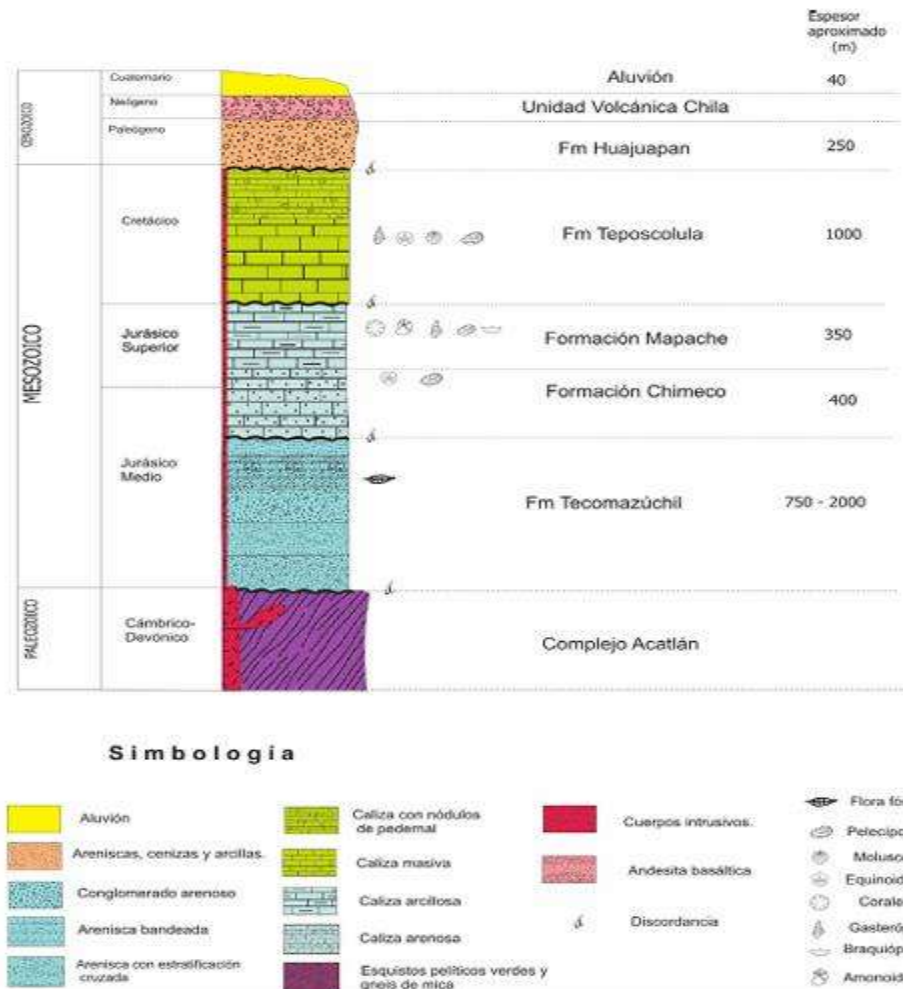


Figura 7. Columna estratigr3fica del 3rea de estudio (modificado de Martiny *et al.*, 2010).

El Cenozoico est3 representado por rocas con origen sedimentario, volc3nico e intrusivo, as3 como unidades de suelo (INEGI, 2004). Las rocas sedimentarias con dep3sitos fluviolcustrs se asocian al Terciario Inferior e incluyen unidades de conglomerados y areniscas-conglomerados de la Formaci3n Huajuapan (Salas, 1949). La unidad de conglomerado es considerada como parte del Conglomerado Tamazulapan y se relaciona con la Formaci3n Balsas (Uribe, 1999). La unidad de conglomerado sobreyace en forma discordante a las calizas del Cret3ceo Inferior de la Formaci3n Teposcolula (Salas, 1949). El conglomerado, de espesores de hasta 80m, es una roca cl3stica formada por guijarros redondeados de calizas, as3 como rocas extrusivas y cuarzo, con clastos subangulosos a redondeados de

diámetros mayores a 2 mm de color gris oscuro, la matriz consiste de arenas y limos que incluyen cuarzo, feldespatos, micas y productos de alteración como sericita, clorita y caolinita, cementados por calcita o cuarzo (Ramírez, 2012).

2.3 Algunos estudios de microzonificación previos en diferentes partes del mundo

Mundialmente, se han realizado diversos estudios sobre el uso de efectos de sitio a partir de registros sísmicos desde principios del siglo XX. Por ejemplo, los estudios de Nogoshi e Igarashi (1971), Nakamura (1989), Lermo y Chávez-García (1994) han llegado a conclusiones importantes para coadyuvar en la reglamentación local para el diseño por sismo. Un ejemplo muy particular es el manual de la Comisión Federal de Electricidad (2015) y las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (2017). Asimismo, se han realizado estudios para considerar otros parámetros que influyen en la respuesta del suelo, como son el amortiguamiento del medio o la velocidad de propagación de las ondas (e.g. Lermo y Limaymanta, 2007).

Los estudios de ingeniería sísmica y de sismología han ido cambiando conforme la ciencia básica y la tecnología avanzan, produciendo continuamente nuevas metodologías, información y equipos sismológicos más sofisticados. En nuestro planeta, las zonas con mayor actividad sísmica están asociados con los límites de placas tectónicas donde se ven afectados países como el nuestro (Zavala, 2019).

Aunque la actividad al interior del continente por fallas corticales es de menor frecuencia, no deberíamos desestimar la posibilidad de daños en regiones con baja sismicidad que se tiene en lugares que se vieron afectados por eventos sísmicos dada la información histórica. Un ejemplo de ellos son sismos como los de Kalemie (República Democrática del Congo), João Câmara (Brasil), Catania (Italia) o más localmente en Acambay, Estado de México (Zavala, 2019).

Como ejemplo, en Japón se ha buscado la manera de generar modelos de pronóstico para la ocurrencia de sismos (figura 8) (Lombardi y Marzocchi, 2011;

Geller, 2011; Clancey, 2012). A pesar de los esfuerzos que se hacen por determinar las variaciones de sismicidad para intentar pronosticar la ubicación del epicentro, en general los modelos no han tenido éxito. Los análisis de Lombardi y Marzocchi (2011) toman en consideración la ocurrencia de sismos de magnitud mayor a 6.0 M_w y la probable influencia de fluidos de la corteza como un detonando de la actividad sísmica (Sarlis *et al.*, 2015; Enescu *et al.*, 2016).

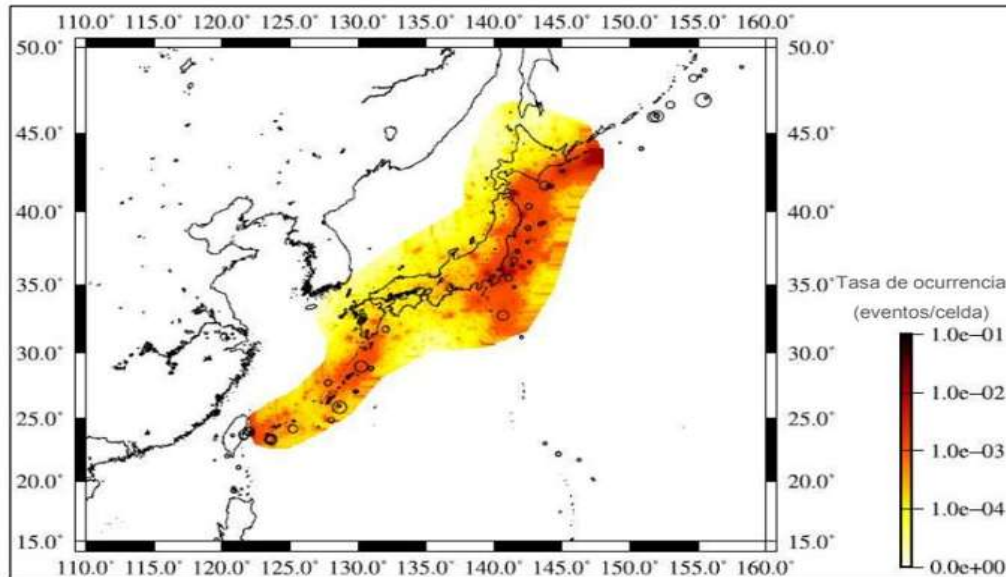


Figura 8. Mapa de tasas de ocurrencia para eventos sísmicos en Japón para el periodo de 01/01/2009 al 31/12/2009 (tomado de Lombardi y Marzocchi, 2011).

La gran actividad sísmica de Japón y en general de varias zonas de nuestro planeta, ha llevado a la creación de nuevas técnicas para comprender más el fenómeno sísmico, considerando que cada región o zona tiene sus propias características sismotectónicas. Por ejemplo, en el oeste de los Estados Unidos de norteamérica, la sismicidad está asociada principalmente a la gran cantidad de fallas geológicas existentes en la región, por lo que existen trabajos donde se pretenden definir los movimientos verticales generados por los sismos con una precisión sub milimétrica con la combinación de mediciones del sistema de posicionamiento global (GNSS, Global Navigation Satellite System por su siglas en inglés) combinado con el método de radar de apertura interferométrica sintética ("InSAR", por sus siglas en inglés) con la finalidad de caracterizar la tectónica de un sitio de interés (Bürgmann *et al.*, 2006).

Además de la implementación de metodologías y tecnologías novedosas, se busca el resultado al problema con el menor costo posible. Es aquí donde entra el uso del ruido sísmico o microtemores a partir de la técnica HVNR (“Horizontal Vertical Noise Ratio”, por sus siglas en inglés) y su correlación con la intensidad sísmica para un sismo establecido, como el ocurrido en Maule, Chile (Leyton *et al.*, 2012).

2.4 Algunos estudios previos en la República Mexicana

El Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), es el segundo campo volcánico más grande del mundo, se localiza en la región central del país y está expuesto a una gran actividad sísmica que ocurre tanto en la zona de la costa debido a los procesos de subducción como por sismos asociados a fallas en la corteza (Zavala, 2019). En la costa los sismos de falla inversa asociados a la subducción y que se caracterizan por ocurrir a una profundidad menor a 40 km (Zúñiga *et al.*, 2017) y son causados por la interacción entre la Placa Norteamericana con la Placa de Cocos. Los sismos de tipo cortical (fallas corticales), como los originados en Acambay, Estado de México (p.ej. Lacan y Arango-Galván, 2021), se relacionan los diversos sistemas de fallas que existen dentro del CVTM (Rivera *et al.*, 2013) y cuya actividad ha provocado daños en construcciones aunque con menor frecuencia. Finalmente, los sismos intraplaca (como el que ocurrió en la región de Puebla-Morelos el 19 de septiembre del 2017 de magnitud $M_w = 7.1$ y profundidad= 53 km), son aquellos que ocurren dentro de una misma placa tectónica subducida y se dan a profundidades mayores a los 50 km (Zavala, 2019).

Para el estudio de la sismicidad en México una parte muy importante y fundamental es la evaluación del peligro sísmico, el cual se define como el grado de exposición que una zona de interés tiene a los movimientos sísmicos (Bazán y Meli, 2004). Gráficamente, el peligro sísmico se representa por la curva de tasas de excedencia, en la cual se muestra el número de eventos por unidad de tiempo (frecuencia), posteriormente se escogen valores de peligro sísmico como puede ser la amplitud o aceleración máxima del suelo que esperamos que ocurra o que

sea superada (Sánchez, 2015). Asimismo, se han elaborado estudios de peligro sísmico en municipios y ciudades de la República Mexicana que por lo regular carecen de criterios para el diseño por sismo en su reglamento de construcción (Zavala, 2019). El objetivo de este tipo de estudios es establecer las tasas de intensidades (en función de la aceleración del terreno) y considerando la correlación entre los efectos del movimiento a nivel regional y el régimen tectónico. Un ejemplo se muestra en la figura 9, en donde se estimaron los niveles de amplificación para el municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México (Sánchez, 2015).

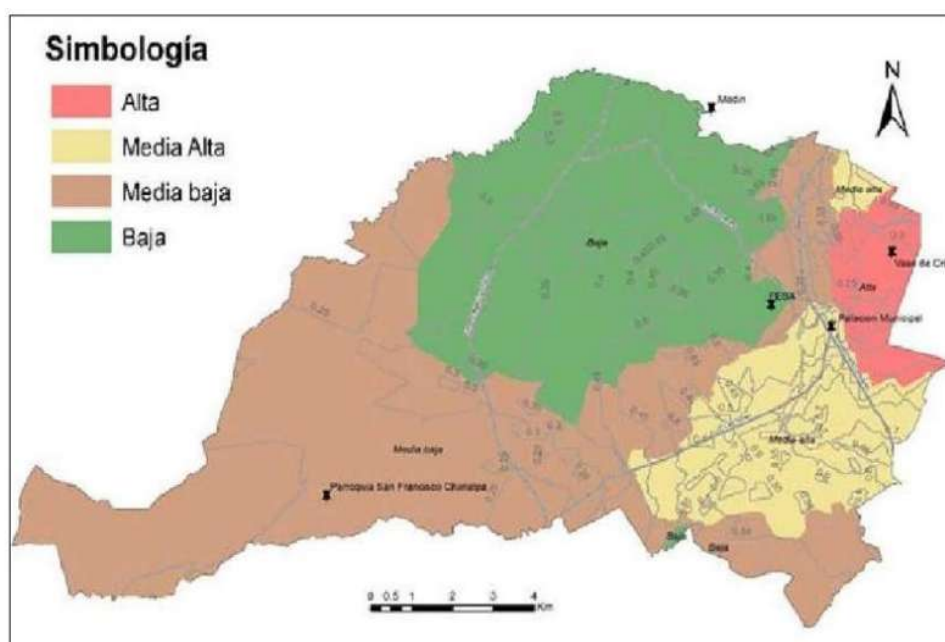


Figura 9. Mapa de amplificación sísmica en el municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México (tomado de Sánchez, 2015).

A partir de la instalación de redes temporales en toda la República Mexicana, se han registrado una gran cantidad de sismogramas en distintos ambientes geológicos con una duración de semanas e incluso meses (Martínez, 2015). Lo anterior nos ha permitido obtener el registro de sismos de considerable magnitud de distintas fuentes sismogénicas y para diversas trayectorias sísmicas, lo que permite a su vez generar catálogos sísmicos para realizar estudios de regionalización para análisis de riesgo y peligro sísmico, como el presentado por Zúñiga *et al.* (2017).

CENAPRED (2017) recomienda utilizar instrumentos sismológicos de banda ancha, debido a que estos instrumentos permiten medir la respuesta del suelo para bajas frecuencias, lo que nos permitiría obtener una mejor resolución en la determinación de la frecuencia fundamental, de los modos superiores y de la componente de amplificación relativa en el rango comprendido entre 0.1 y 10 Hz (Martínez, 2015; CENAPRED, 2017).

2.4.1 Estudios previos en la ciudad de Querétaro, Querétaro

Un ejemplo del uso de la técnica HSRV fue desarrollado en la ciudad de Querétaro (figura 10), en donde se delimitó el riesgo de las edificaciones. A partir de la construcción de mapas de intensidad sísmica debido a la ocurrencia de sismos de mecanismos focales asociados a fallas normales e inversas. Para este estudio se siguió la recomendación de CENAPRED (2017) y se utilizó un sismógrafo de banda ancha para realizar las mediciones dentro de la ciudad de Querétaro (Zavala, 2019).

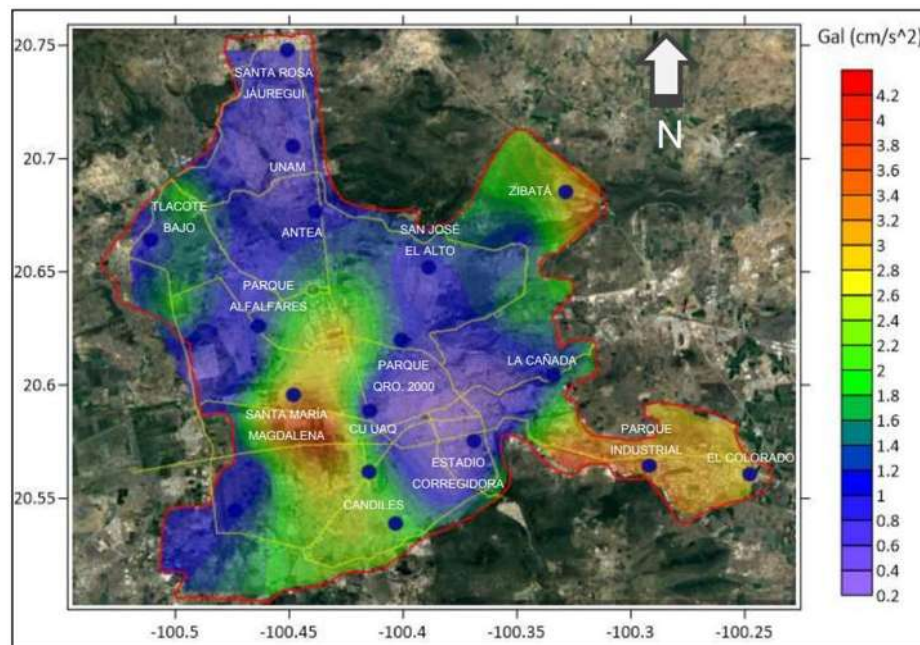


Figura 10. Distribución de las pseudoaceleraciones en la ciudad de Querétaro considerando un periodo estructural de 2.0 s considerando el sismo ocurrido el 01/05/2012 de magnitud 5.6 M_w ocurrido en Ciudad Altamirano, Guerrero (Tomado de Zavala, 2019).

En la figura 10, Zavala (2019) presentó un mapa de intensidad sísmica. Es posible observar que la parte suroeste de la ciudad de Querétaro se acelera entre 3 y 5 gales. Lo mismo ocurre en las zonas sureste y noreste de la ciudad. A partir de estos resultados sería posible definir zonas con el mismo riesgo sísmico considerando que en la región suroeste está conformada por terrenos agrícolas sin construcciones importantes y algunos fraccionamientos con casas habitación de alturas menores a dos niveles, mientras que las zonas sureste y noreste cuentan con edificios de hasta 20 pisos. Por lo anterior, Zavala (2019) concluyó que la primera región se vería menos afectada que la segunda debido a que no cuenta con las edificaciones que entren en resonancia con el movimiento del suelo.

Para la ciudad de Querétaro y su zona conurbada, Zavala (2019) también obtuvo un mapa para caracterizar el efecto de sitio con la ayuda de las FTE (Función de Transferencia Empírica) que permite caracterizar el comportamiento dinámico del suelo, visto desde un enfoque sismológico. Para el mapa de zonificación sísmica utilizó un mapa previo presentado por Bustillos (2005), revalidada por Arroyo *et al.* (2012) y replanteada por González (2014) quienes consideraron aspectos que cubren desde el uso de sensores hasta criterios nuevos para la agrupación de los espectros y las técnicas de procesamiento de señales. A partir de lo anterior, Zavala (2019) presentó una alternativa para acotar el riesgo sísmico mediante 30 mapas de riesgo que consideren tanto el comportamiento dinámico del suelo como las construcciones (Zavala, 2019).

2.4.2 Estudios previos en la ciudad de Morelia, Michoacán.

Peñaloza (2022) realizó una caracterización del ruido sísmico registrado en la ciudad de Morelia utilizando un sismógrafo de banda ancha, para caracterizar los periodos fundamentales por medio del uso de la técnica de cocientes espectrales y posteriormente proveer de un mapa preliminar de isoperiodos para la ciudad de Morelia, Michoacán (figura 11).

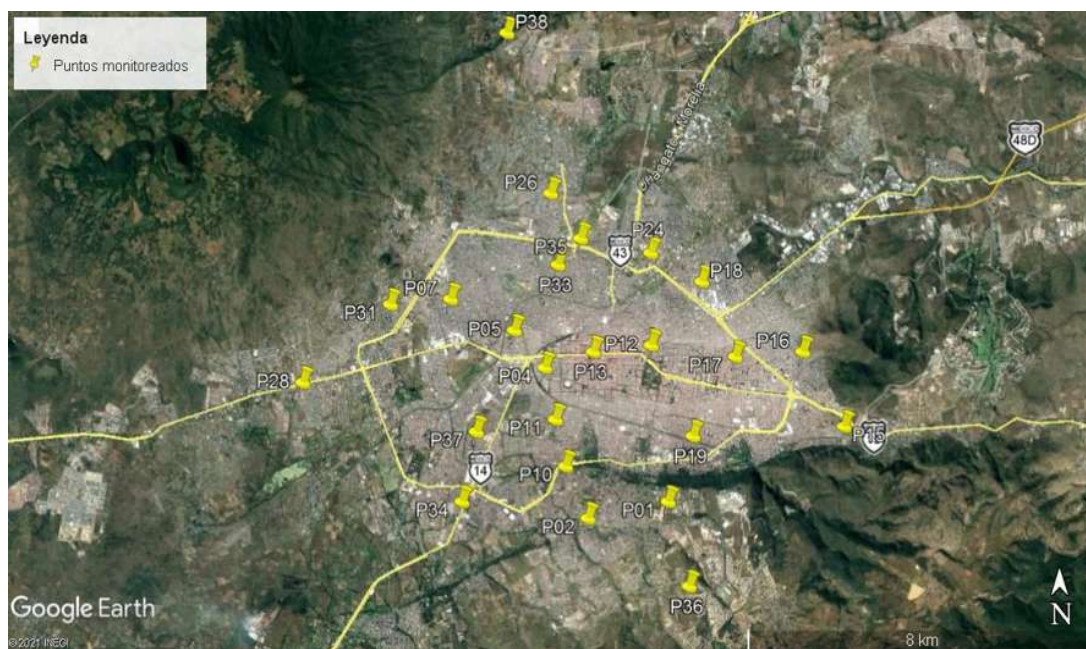


Figura 11. Mapa de ubicación de los puntos de monitoreo de ruido sísmico en la ciudad de Morelia (Google Earth, 2020).

Para la ciudad de Morelia, Michoacán, la mayoría de los sitios de monitoreo están asociados a frecuencias fundamentales en el rango de 0.6 - 4 Hz. Estos valores están relacionados directamente con la geología que, además de ser sitios que suelen ser evidentemente buenos para monitorear, están rodeados por una constante corriente de ruido ambiental, lo que hace la diferencia en esta zona de frecuencias bajas (Peñaloza, 2022).

2.4.3 Estudios previos en el estado de Oaxaca

Talavera y Mendoza-Ponce (2024) realizaron un análisis estadístico de la sismicidad y los tiempos de recurrencia en Oaxaca, basándose en un catálogo sísmico homogeneizado a la magnitud de momento (M_w) del período 1987-2021. Este estudio se centró en cinco regiones sismotectónicas del sur de México (SUB3, SUB4, IN2, IN3 y NAM) propuestas por Zúñiga *et al.* (2017). El objetivo principal fue comprender mejor el valor b y los tiempos de recurrencia en estas áreas, que abarcan Oaxaca y sus estados vecinos: Guerrero, Puebla, Veracruz y Chiapas.

La metodología para calcular el valor b incluyó la determinación de la magnitud de corte usando el método de Máxima Curvatura y la estimación del valor b mediante máxima verosimilitud. Se generaron gráficas de frecuencia-magnitud para reportar estos valores. Adicionalmente, se calcularon los tiempos de recurrencia para diferentes magnitudes (6, 6.5, 7 y 7.5).

Los resultados resumidos de Talavera y Mendoza-Ponce (2024) se presentan en la tabla 3. En resumen, SUB3 presenta la mayor peligrosidad sísmica, mientras que IN3 tiene un menor tiempo de recurrencia en comparación con IN2, a pesar de tener valores- b similares. En la región NAM, aunque los eventos sísmicos de mayor magnitud son menos frecuentes, representan un peligro significativo para la población debido a su carácter somero.

Tabla 3. Tiempos de recurrencia para todo el catálogo con diferentes magnitudes. Donde M es la magnitud de los sismos.

REGIÓN	VALOR-B	PERIODO DE RECURRENCIA PARA $M \geq 6.5$ (AÑOS)	COMENTARIOS
SUB3	0.97 ± 0.04	4.64 ± 1.91	Mayor peligrosidad sísmica debido al fuerte acoplamiento entre las placas de Norteamérica y Cocos
SUB4	1.26 ± 0.01	32.47 ± 0.07	Mayor número de eventos sísmicos de magnitud mayor a 6
IN2	1.24 ± 0.02	72.69 ± 0.05	Valores- b similares a IN3
IN3	1.25 ± 0.03	21.70 ± 0.31	Valores- b similares a IN2, pero menor tiempo de recurrencia
NAM	1.15 ± 0.12	70.22 ± 0.38	Pocos eventos sísmicos de mayor magnitud, pero peligro latente debido a temblores someros

Particularmente, en la Zona Metropolitana de la ciudad de Oaxaca (ZMO), Márquez-López (2022) realizó una evaluación de las áreas susceptibles ante peligros geohidrológicos y en particular Márquez-López *et al.* (2024) determinaron mapas de clasificación sísmica para la ZMO (figura 12). Los resultados obtenidos por Márquez-López *et al.* (2024), proporcionan información complementaria a los estudios que se han realizado antes en la zona y constituyen un apoyo en la toma

de decisiones para la prevención, mitigación y atención de emergencias que puedan afectar a la población futura.

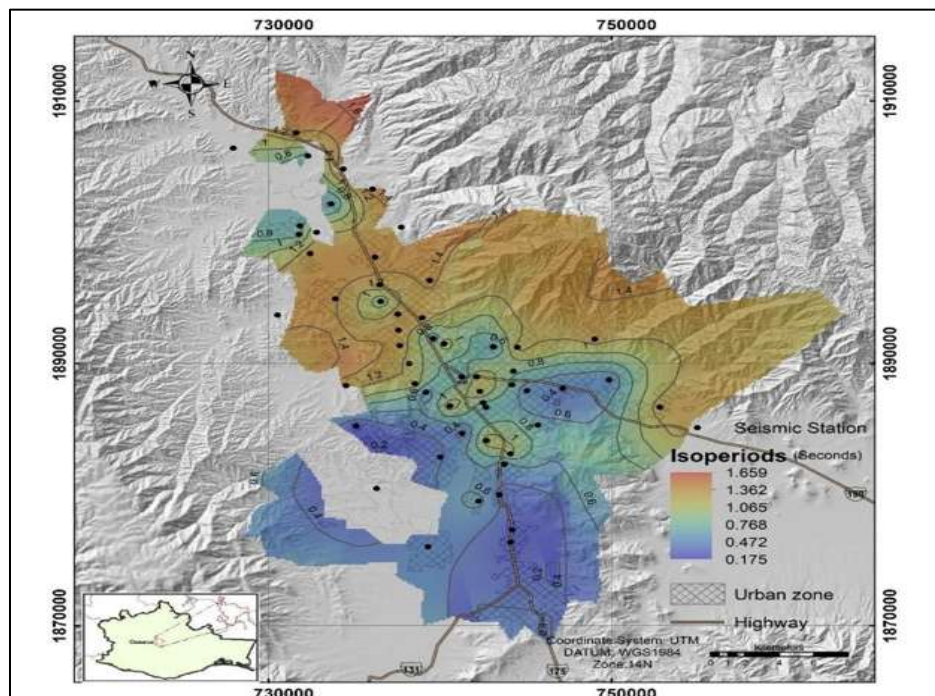


Figura 12. Mapa de microzonificación sísmica para la Zona Metropolitana de la ciudad de Oaxaca (tomado de Márquez-López *et al.*, 2024).

2.4.4 Estudios previos en la Ciudad de Huajuapán, Oaxaca

En la Heroica Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca, Ramírez (2012) realizó pruebas de medición utilizando equipos sísmicos para definir los sitios idóneos para realizar una microzonificación sísmica. Para la ubicación de las estaciones sísmicas en la ciudad, Ramírez (2012) realizó pruebas de medición de ruido sísmico en 7 sitios distintos de la ciudad utilizando un sismógrafo de banda ancha que operaba por periodos de tiempo entre 40 a 50 minutos (figura 13).

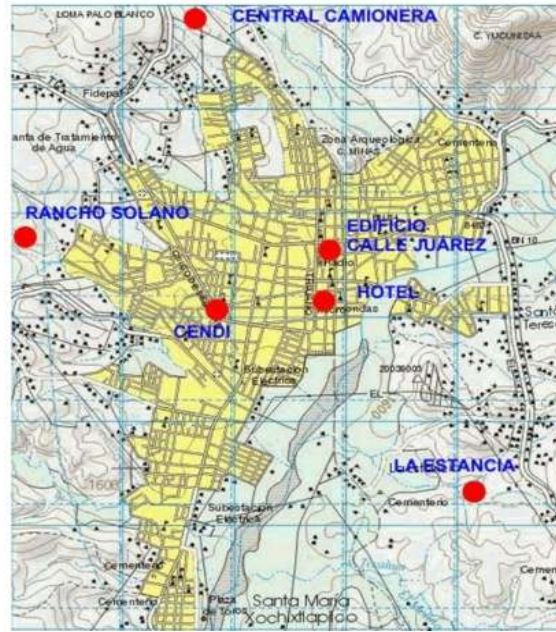


Figura 13. Ubicación de los sitios de monitoreo realizados por Ramírez (2012) en la Heróica Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

Para la metodología en campo, Ramírez (2012) hizo mediciones en sitios con la finalidad principal de instalar de manera fija una caseta sismológica. El registro sísmico permitió conocer los niveles de ruido antropogénico para diferentes horas del día y de esta forma definió qué tipo de fuente es la que genera las mayores amplitudes del terreno.

3. METODOLOGÍA

3.1 Adquisición de datos

Las mediciones de vibración ambiental, también conocidas como ruido sísmico o microtemores, se desarrollaron en la Ciudad de Huajuapán de León, mediante la implementación en campo de un sismómetro de banda ancha modelo Trillium Compact 120 s que cuenta con un rango grande de frecuencias, así como un bajo ruido instrumental, en conjunto con un Digitalizador modelo DataCube3 (figura 14). Los sismómetros de banda ancha, como lo sugiere CENAPRED (2017), son el mejor equipo para trabajos de zonificación sísmica comparado con el uso de

geófonos, acelerógrafos y sismómetros de periodo corto considerando su rango operativo en amplitud y frecuencia, ya que la parte confiable de la respuesta se encuentra entre 0.05 Hz para el sismómetro, 1 Hz para el acelerógrafo y 2 Hz para los geófonos (e.g. SESAME, 2004; Chávez-García y Tejeda-Jácome, 2010; González, 2014; Martínez, 2015; Molnar *et al.*, 2018).

Equipo Utilizado	
	
Sismómetro Trillium	Sensor DataCube
Tamaño: 9 cm de diámetro. Peso: 1.2 kg. Salida: XYZ que representan las componentes vertical y horizontal.	Consumo de energía bajo. Tamaño ultracompacto. Registrador de datos sísmicos de 3 canales. Antena GPS externa Fuente de alimentación externa.

Figura 14. Componentes del sismómetro y digitalizador utilizado en el monitoreo de ruido sísmico.

Para realizar la adquisición de los datos de microtemores, se siguió el procedimiento ilustrado en la figura 15. En primer lugar, se definieron los sitios para realizar el registro temporal de vibración ambiental. La selección de estos sitios se basó en estudios previos del suelo, como cartas geológicas y modelos de velocidad de onda de corte, los cuales están asociados con el comportamiento dinámico del terreno. Para ello se elaboró un mapa de sitios de medición tal y como se puede observar en la figura 16.

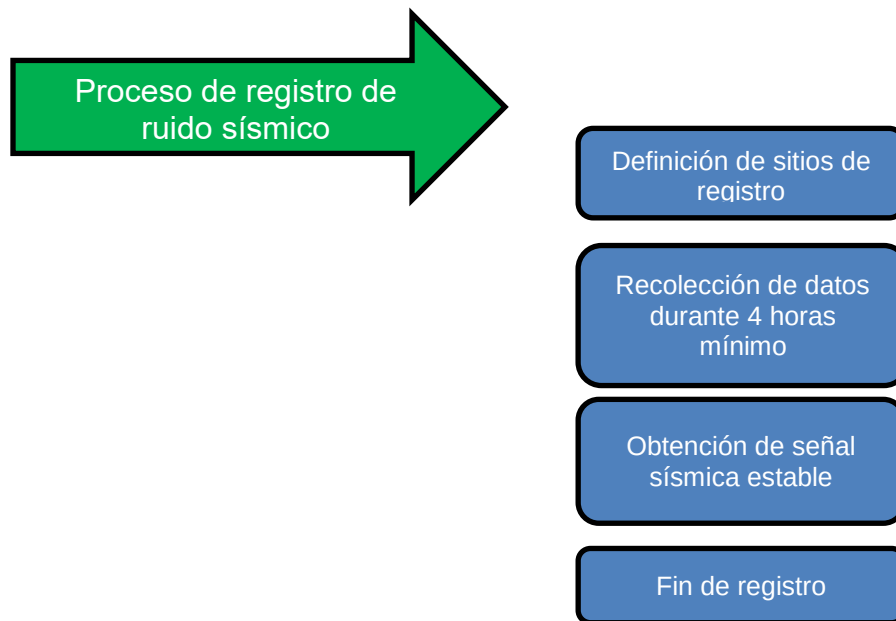


Figura 15. Esquema del procedimiento para adquisición de datos de microtremores.

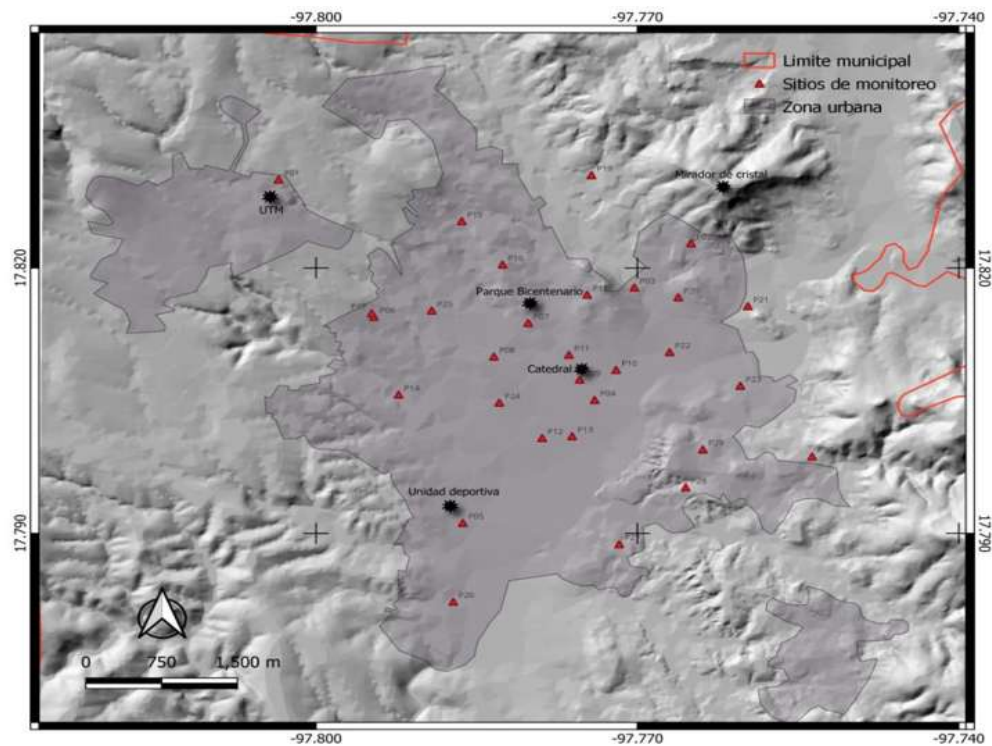


Figura 16. Mapa de los puntos de sitios de monitoreo para la Ciudad de Huajuapán de León y su zona urbana.

Es importante mencionar que una señal estable se obtiene cuando la actividad humana no se encuentra lo suficientemente cerca del sensor para generar señales anómalas.

Una vez definidos el número de puntos, el orden de medición y la ubicación, se procedió al registro de la señal utilizando un sismógrafo de banda ancha. Se realizaron algunas excepciones en cuanto al tiempo de registro para puntos estratégicos específicos, basándose en estudios recientes elaborados por Martínez (2015), Zavala (2019) y por Márquez-López *et al.* (2024); estos estudios indican que existe una deficiencia en la respuesta a bajas frecuencias en la relación espectral, la cual se normaliza con el aumento del tiempo de registro.

Para la obtención de datos de vibración ambiental, se consideraron varias condiciones críticas durante la colocación y operación de los sensores. A continuación, se detallan los aspectos esenciales para garantizar la calidad y confiabilidad de los datos recolectados.

- Colocación. Los sensores se colocaron siempre en planta baja sobre diversas superficies (banquetas, pavimento, piso cerámico) y se cubrieron con una cubeta aislante térmica. Se buscó minimizar la perturbación causada por peatones, vehículos, animales o el viento, lo cual solo pudo verificarse al procesar las señales. En los casos donde no fue estable la señal o el espectro HVNR mostró resultados atípicos en cuanto al nivel de amplificación (mayor a 10 veces) y forma espectral, se procedió a repetir la medición en el sitio.
- Nivelación. Se aseguró que el sensor estuviera nivelado en todo momento para mantener la precisión de las mediciones.
- Duración. El tiempo promedio de registro fue de cuatro horas en cada punto. Sin embargo, algunos registros se realizaron durante toda una

noche, resultando en mejores señales debido a la reducción del ruido antrópico.

- **Clima:** Se evitó medir durante y después de lluvias para no colocar el sensor en suelos que estuvieran saturados. También se intentó minimizar la influencia del viento, ubicando el sensor en espacios cerrados cuando fue posible.
- **Hora:** Las mediciones se realizaron mayoritariamente entre las 9:00 a.m. y las 6:00 p.m. Aquellos registros que mostraron resultados cuestionables se repitieron entre las 6:00 p.m. y las 9:00 a.m. del día siguiente, con el fin de proporcionar mayor estabilidad al sensor.

Durante la etapa de registro de datos, se realizaron un total de 30 mediciones de microtemores a lo largo y ancho de la zona conurbana de la Heróica Ciudad de Huajuapán de León, en función del mapa anteriormente establecido (Figura 16, tabla 4). Las mediciones se llevaron a cabo a diferentes horas del día, con preferencia por registros de noche en lugares donde el ruido antropogénico era elevado debido a la proximidad de la fuente. Esto fue para asegurar un comportamiento estable de la señal y evitar que movimientos cercanos al sensor alteraran la componente vertical, ocasionando ampliaciones no propias del suelo.

Tabla 4. Puntos de medición de ruido sísmico en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

ID	Y	X	REFERENCIA
P01	17.83	-97.8035	Campus UTM
P02	17.8228	-97.765	Coordinación Protección Civil
P03	17.8178	-97.7703	Col. del Maestro
P04	17.8051	-97.774	Calle Reforma #24 Centro
P05	17.7912	-97.7863	DIF
P06	17.8145	-97.7946	Col. Militar CDC
P07	17.8138	-97.7802	Parque-Bicentenario
P08	17.81	-97.7834	Panteón 16 de septiembre

P09	17.8074	-97.7754	Atrio de la Catedral
P10	17.8085	-97.772	Mercado Zaragoza
P11	17.8102	-97.7764	Mercado Cuauhtémoc
P12	17.8008	-97.7789	Parque Jagüey
P13	17.801	-97.7761	Parque Las Huertas
P14	17.8057	-97.7923	Mirador
P15	17.8253	-97.7864	Parque San Miguel
P16	17.8204	-97.7826	Col. Reforma
P17	17.8149	-97.7948	Rep. Col. Militar CDC
P18	17.817	-97.7747	CDC Calvario
P19	17.8305	-97.7743	Fraccionamiento San Ángel
P20	17.8167	-97.7662	Col. Maestro
P21	17.8157	-97.7597	San Mateo
P22	17.8105	-97.767	El Delfín
P23	17.8067	-97.7604	Hotel Casa Blanca
P24	17.8048	-97.7829	INE
P25	17.8152	-97.7892	Restaurante Las Palmas
P26	17.7823	-97.7872	Casa Sara - Santa María
P27	17.7888	-97.7717	CONAGUA
P28	17.7952	-97.7655	Tienda-La Estancia
P29	17.7995	-97.7639	Casa Beto - Vista Hermosa
P30	17.7987	-97.7537	Secundaria Técnica 232

3.2 Medición de ruido sísmico

La microzonificación sísmica es una metodología de análisis importante y necesaria para realizar estudios de peligro sísmico así como para la mitigación del riesgo sísmico en zonas urbanas y son de beneficio para la planificación del territorio así como para aumentar los niveles de las fuerzas sísmicas en la concepción de estructuras antisísmicas (CENAPRED, 2017).

El ruido sísmico ambiental (RSA) o microtemores, es el conjunto de vibraciones de la superficie de la Tierra que son detectadas con sismómetros y permiten calcular los periodos dominantes de la vibración del suelo en ambientes urbanos alrededor del mundo. El RSA puede ser producido por fuentes como pueden ser: pequeños sismos locales o regionales; sismos de lugares lejanos que generan ondas de superficie; el oleaje en la zona costera; el viento; incluso el tráfico

vehicular. Esta energía sísmica viaja en la corteza y es detectada por los instrumentos de medición (figura 17) (Sánchez-Sesma *et al.*, 2011).

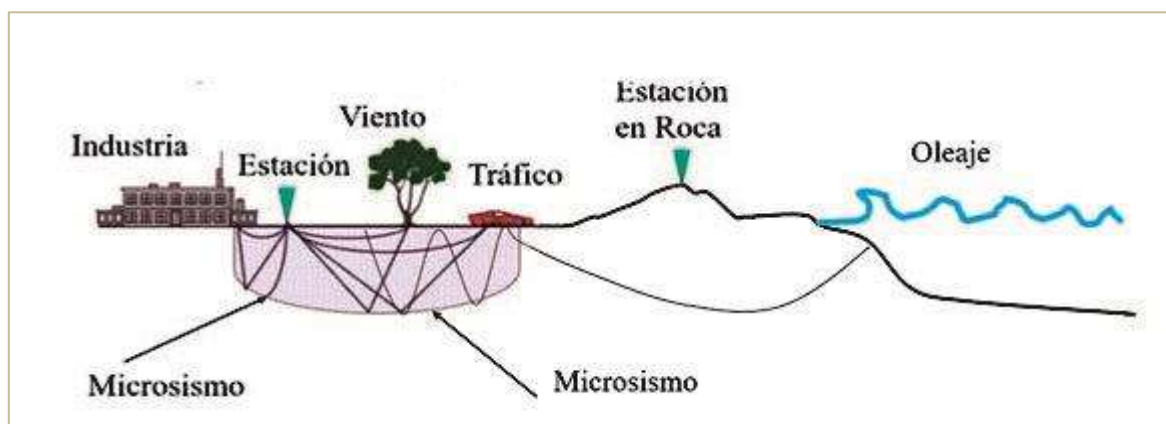


Figura 17. Cobertura de ruido sísmico en una estación. Tomada de Sánchez-Sesma *et al.*, (2011).

A partir de los movimientos verticales y horizontales registrados por los sensores, se calculan los espectros de amplitudes de Fourier $H(f)$ y $V(f)$, respectivamente (Sánchez-Sesma *et al.*, 2011). La frecuencia se mide en ciclos por segundo (o Hertz, Hz) que es el recíproco del periodo, por ejemplo: una frecuencia de 0.1 Hz está asociado con un periodo de oscilación de 10 segundos. Finalmente, a partir del cociente espectral (HSVR) se determina el pico asociado con el periodo fundamental de resonancia de un sitio dado (Nakamura, 1989) y que es un insumo importante para estudios de microzonificación (Sánchez-Sesma *et al.*, 2011).

3.3 Técnica de cocientes espectrales con ruido (Horizontal to Vertical Noise Ratio o HVNR)

Esta técnica fue desarrollada por Nakamura (1989) y posteriormente adaptada por Lermo y Chávez-García (1994). El proceso inicia con la adquisición de ruido sísmico ambiental (microtremores), posteriormente se procede a dividir el registro ambiental en ondas de cuerpo y superficiales para las tres componentes (una vertical y dos horizontales) (Bard, 1999). Esta técnica puede ser evaluada a partir del cálculo de las Densidades Espectrales Direccionales (DED) o mediante el algoritmo de la Media Cuadrática (MC) creada por Sánchez-Sesma *et al.* (2011).

La técnica de HVSR de Nakamura (1989; 2000) es aplicada para estimar el periodo fundamental del sitio así como el factor de nivel de amplificación relativa del suelo. La técnica ha sido usada y aprobada ampliamente en el mundo para la realización de mapas de zonificación sísmica (e.g., Abdel-Rahman *et al.*, 2012; Nath y Thingbaijam, 2009). La técnica se basa en la obtención de una curva espectral de Fourier de frecuencias que representa el cociente de las componentes horizontales respecto a la componente vertical de un registro de ruido ambiental; donde lo importante es la interpretación de la forma de la curva H/V. Una curva casi plana representa un suelo rocoso de bajo nivel de amplificación y una curva con picos representa un suelo blando con varios valores de periodos con diferente respuesta de nivel de amplificación del suelo (figura 18).

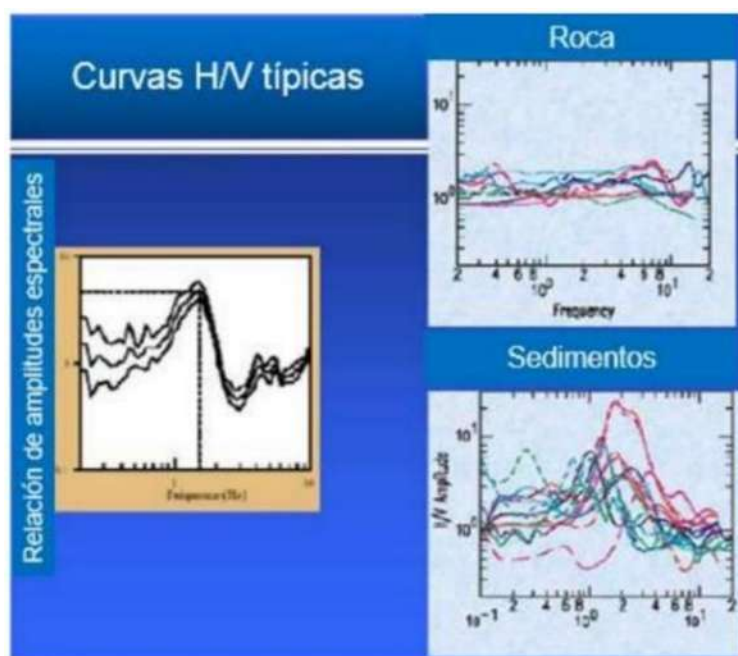


Figura 18. Curva H/V típicas en el análisis de respuesta de suelos (tomada de Lermo *et al.*, 2013), para estimar el periodo fundamental T_s (pico de la curva, eje x) y nivel de amplificación A_0 (máximo valor del cociente H/V, eje y).

Martínez (2015) demostró que a través de registro de microtemores (vibración ambiental) es posible estimar la respuesta de amplificación que se esperaría si se calcula con registros sísmicos asociada a sismos. Por lo tanto, el procesamiento de los datos de ruido en la Ciudad de Huajuapán de León se realizó con la técnica HVNR a partir de registros de vibración ambiental, siguiendo las recomendaciones

establecidas por Martínez (2015). Fue posible obtener no solo el periodo fundamental T_0 de cada sitio de medición, sino también el factor de amplificación A_0 . Entre las recomendaciones destacan:

1. Emplear equipos sismógrafos de banda ancha (con sensor de velocidad), debido a su mejor respuesta en bajas frecuencias (0.1 a 10 Hz o de 0.1 a 10s).
2. Analizar registros de 2 a 3 horas, en rango de altas frecuencias (o bien periodos bajos).
3. Realizar los registros de vibración ambiental en horarios de bajo nivel ruido ambiental (entre las 3:00 y las 7:00 hrs. y de 22:00 a 1:00 hrs.).

El procesamiento para la obtención de HVNR se realizó utilizando el software Geopsy ("Geophysical Signal Database for Noise Array Processing") (SESAME WP05, 2002). En primer lugar, todos los registros fueron revisados visualmente para identificar las partes con menor ruido ambiental o excluir las señales inadecuadas. En promedio, se analizaron 15 ventanas de aproximadamente 5 minutos cada una por sitio. Finalmente, se obtuvieron 30 curvas H/V para su posterior análisis e interpretación.

Sanchez-Sesma *et al.* (2011) planteó la hipótesis de que la componente vertical del ruido ambiental en la superficie del suelo conserva las características del subsuelo, pues está influenciada por la onda Rayleigh. Por lo tanto, puede utilizarse para eliminar tanto la fuente como los efectos de las ondas Rayleigh de los componentes horizontales. Esto es eficaz para identificar los aspectos fundamentales de frecuencia de resonancia de una capa sedimentaria, donde la profundidad de una capa de suelo blando con frecuencia de resonancia y cizallamiento la velocidad de onda V_s viene dada por $H = \frac{V_s}{4 \times F}$ (Sánchez-Sesma *et al.*, 2011).

La relación espectral H/V de los microtemores medidos confirmó su capacidad para estimar la frecuencia predominante y el factor de amplificación. El resultado

de la estimación es estable para el tiempo y la estación medidos (Nakamura, 1989).

Los registros de ruido sísmico se inspeccionaron visualmente para seleccionar señales completas y con una buena relación señal/ruido. Se utilizaron dos paquetes de software para procesar los datos: SAC (“Seismic Analysis Code”) y Geopsy (“Geophysical Signal Database for Noise Array Processing”) (SESAME WP05, 2002). Los resultados de estos programas se compararon debido a sus diferentes funciones de suavizado en la obtención de H/V.

Las relaciones espectrales H/V se calcularon para los tres componentes de cada registro de forma automática utilizando el programa Geopsy (SESAME WP05, 2002). Para el H/V de cada ventana seleccionada, se aplicó una función de suavizado con un coeficiente de ancho de banda de $b=40$ y una ventana cónica coseno del 15%. Este tipo de función de suavizado emplea un número distinto de puntos en alta y baja frecuencia, siendo recomendada especialmente para la frecuencia. Con el software SAC (Código de Análisis Sísmico), se determinaron las relaciones espectrales en ventanas de 60 segundos, y un suavizado con una ventana de Von Hann.

4. RESULTADOS

4.1 Cocientes Espectrales

El objetivo de estas mediciones fue primeramente identificar las frecuencias fundamentales del suelo y los factores de amplificación relativa en diversas zonas de Huajuapán de León, lo cual es crucial para evaluar la vulnerabilidad sísmica y planificar estrategias de mitigación.

Con el uso de un sismógrafo de banda ancha, se calcularon las frecuencias fundamentales mediante cocientes espectrales del suelo en la Ciudad de Huajuapán de León. Las figuras 19, 20 y 21 presentan tres cocientes espectrales

correspondientes a diferentes zonas representativas de la ciudad: uno con el periodo fundamental de suelo más alto (0.1 Hz) con una amplificación de 5.36 (figura 19), uno con el periodo fundamental intermedio (0.33 Hz) con una amplificación de 4.29 (figura 20) y otro con el periodo fundamental más bajo (0.7) con una amplificación de 2.09 (figura 21).

Cabe destacar que los sitios mostrados en las figuras 19, 20 y 21 corresponden a los puntos de monitoreo P6, P12 y P18 respectivamente. En términos de geología, el P6 se encuentra sobre roca caliza, el P12 sobre depositos aluviales y el P18 sobre roca arenisca-conglomerado.

La figura 22, muestra todos los cocientes espectrales de los 30 sitios de monitoreo realizados en la zona de estudio, proporcionando una visión completa de las características sísmicas de la región. Podemos ver que las frecuencias fundamentales oscilan entre 0.5 y 10 Hz, y las amplificaciones relativas alcanzan valores de hasta 7 para los puntos de monitoreo P8 y P9.

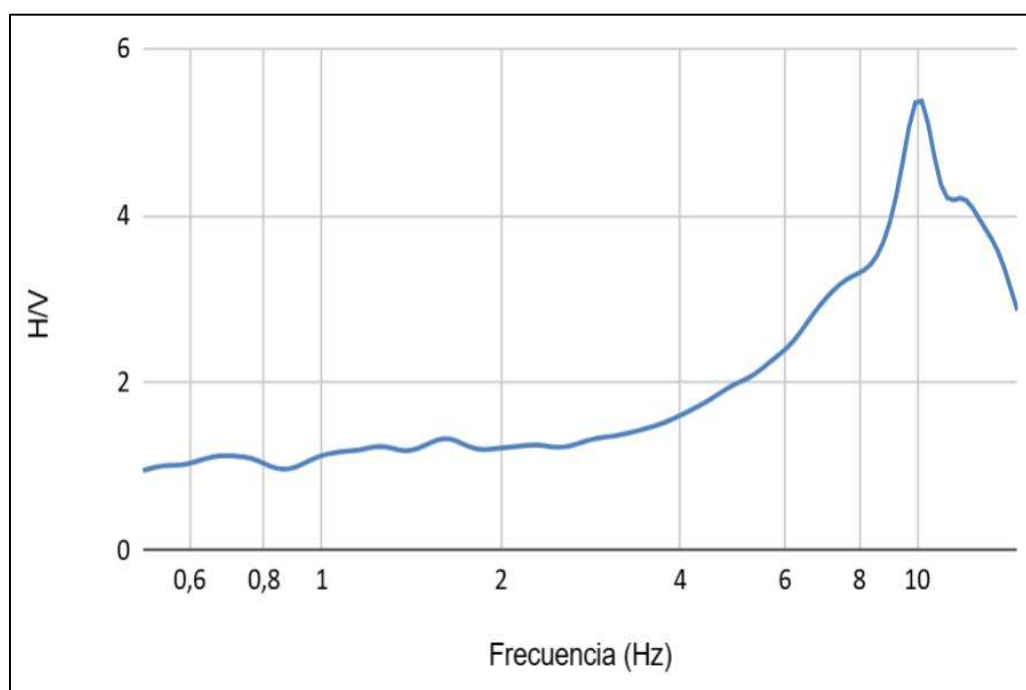


Figura 19. Cociente espectral del punto de medición 06.

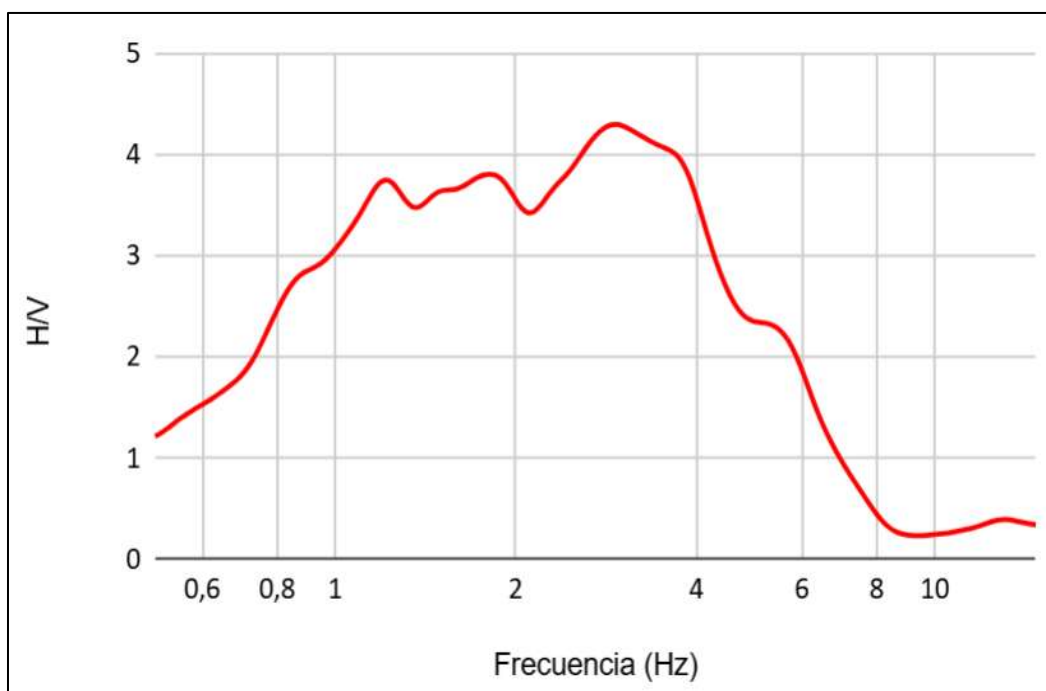


Figura 20. Cociente espectral del punto de medición 12.

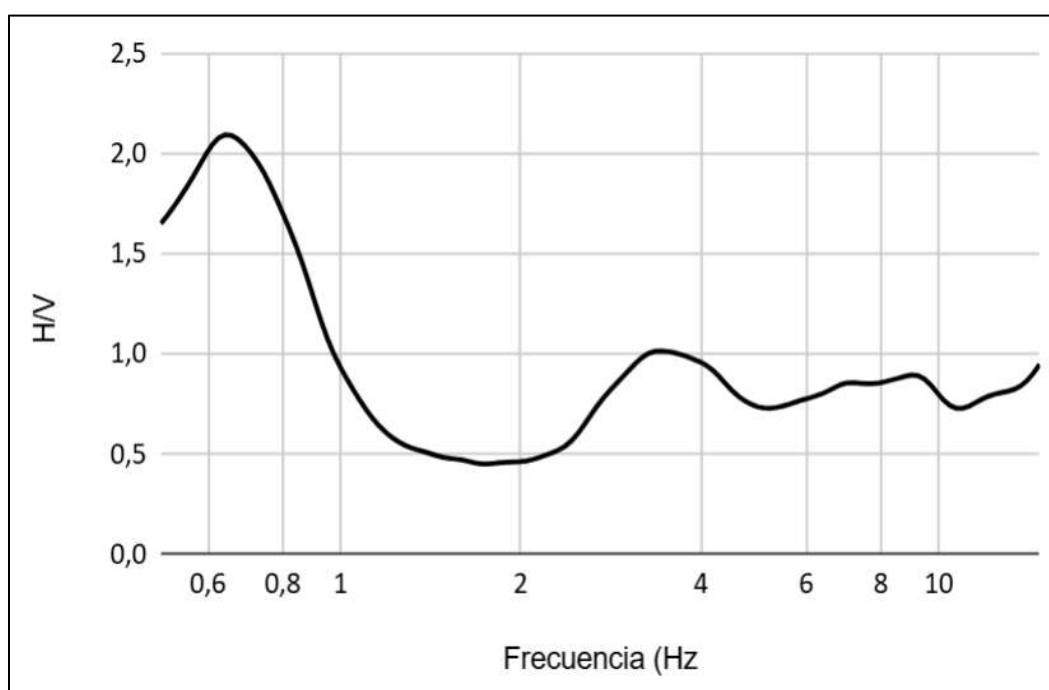


Figura 21. Cociente espectral del punto de medición 18.

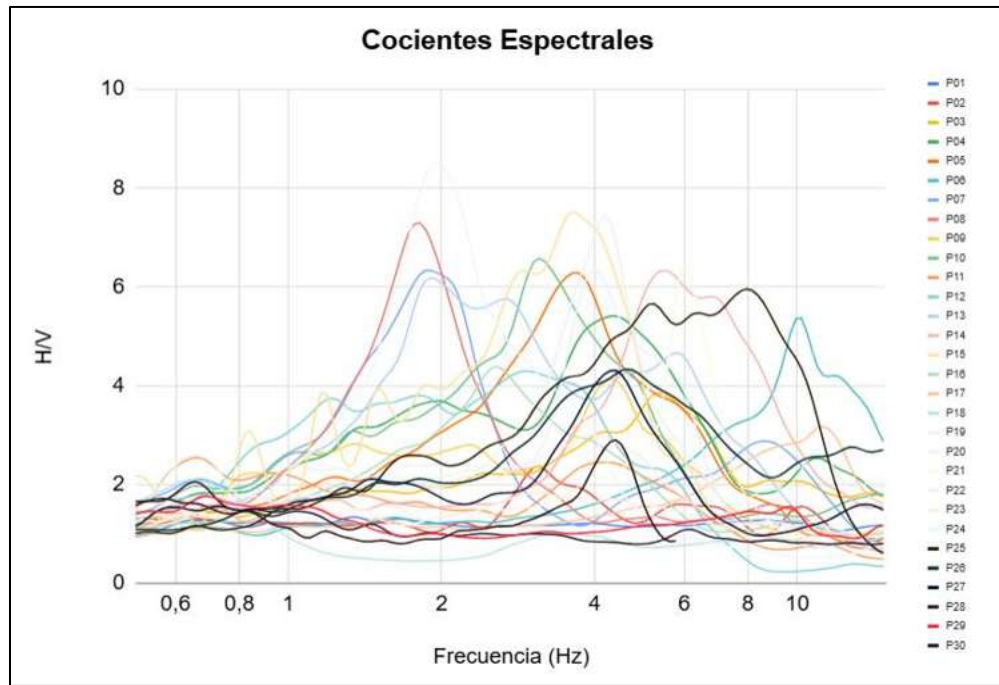


Figura 22. Cocientes espectrales de los 30 puntos de medición en Huajuapán de León, Oaxaca.

4.2 Mapas de Isoperiodos y de Amplificaciones

4.2.1 Isoperiodos

A partir de las gráficas de los cocientes espectrales (figura 22), se determinaron en primera instancia los periodos fundamentales del suelo, utilizando el método de interpolación ponderada por distancia inversa (IDW, por sus siglas en inglés) (figura 23), se generó un mapa detallado de los periodos fundamentales del suelo en segundos, conocidos como isoperiodos.

La interpolación IDW determina los valores de las celdas utilizando una combinación linealmente ponderada de un conjunto de puntos de la muestra. La ponderación es una función inversa de la distancia. La superficie interpolada debe ser la de una variable dependiente de la localización (Watson y Philip, 1985), en este caso los periodos fundamentales.

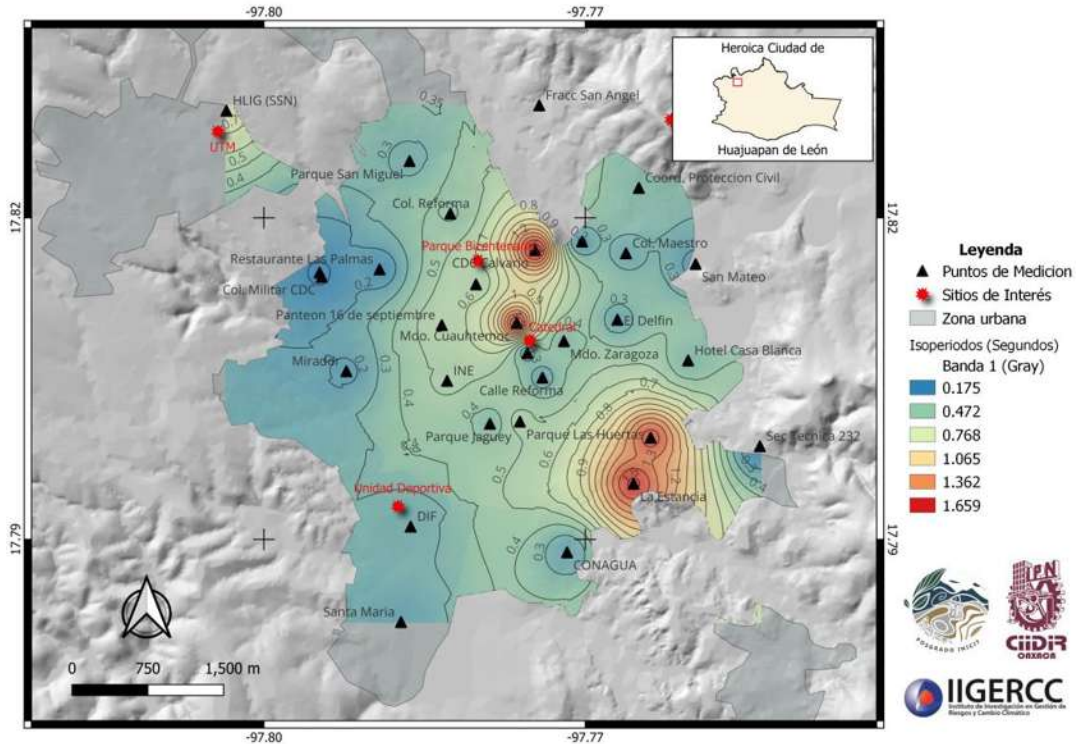


Figura 23. Mapa de isoperiodos de la Heroica Ciudad de Huajuapán.

4.2.2 Mapa de Amplificaciones

El objetivo principal de estas mediciones es identificar y analizar las amplificaciones espectrales en los distintos sitios de monitoreo, permitiendo así una comprensión más precisa de las condiciones locales y su impacto en la propagación de ondas sísmicas.

A partir de los cocientes espectrales obtenidos (figura 22), se determinaron las amplificaciones específicas para cada uno de los sitios de monitoreo. Utilizando el método de predicción por Kriging (D. G. Krige, 1950), se generó un mapa de amplificaciones relativas el cual se representa en la figura 24.

Por otro lado, las zonas con menos probabilidad de daños se encuentran en áreas donde los periodos fundamentales del suelo son más cortos y las características geológicas (en este caso andesitas) proporcionan mayor estabilidad. Estas áreas se beneficiarán de una menor amplificación sísmica y, por lo tanto, estarán menos expuestas a daños estructurales severos durante un evento sísmico.

Encontrándose en estas zonas sitios de interés como la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM).

En contraste, las zonas de gran amplificación se encuentran en áreas donde las condiciones geológicas (depósitos aluviales y areniscas-conglomerados) y los periodos fundamentales del suelo favorecen un mayor incremento en la intensidad de las ondas sísmicas. Estas zonas de gran amplificación, identificadas en el mapa, presentan un mayor riesgo de sufrir daños estructurales severos durante un sismo, debido a la amplificación significativa de las ondas sísmicas. Encontrándose en estas zonas sitios de interés como la unidad deportiva. Por lo tanto, es crucial prestar especial atención a estas áreas para implementar medidas de mitigación y reforzar la infraestructura existente, minimizando así el riesgo de daños.

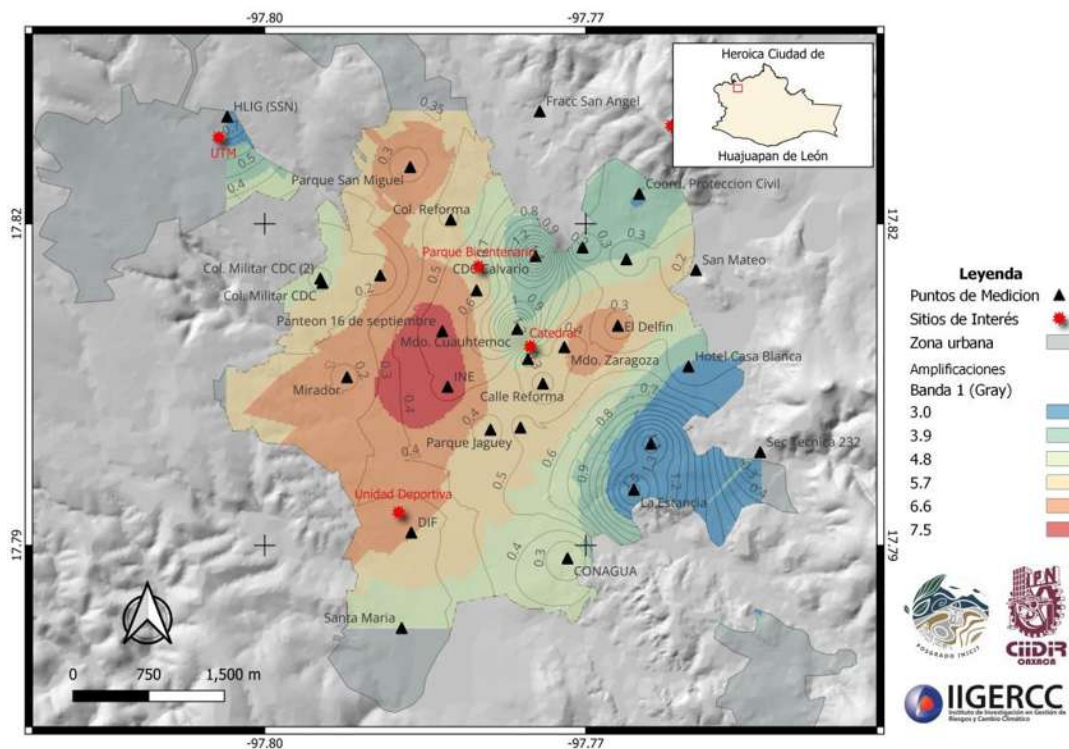


Figura 24. Mapa de amplificaciones relativas de la Heroica Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

4.3 Base de datos de los niveles de las edificaciones en la Ciudad de Huajuapán de León

El propósito de esta base de datos es identificar y catalogar las edificaciones de la Ciudad de Huajuapán de León, considerando el número de niveles y parcialmente los materiales de construcción, con el fin de evaluar la distribución y características estructurales de la ciudad.

Finalmente, se construyó una base de datos detallada de las estructuras, abarcando un total de 2566 edificaciones en la Ciudad de Huajuapán de León. Para la recopilación de esta información, se utilizaron imágenes de “Google StreetView” y se realizaron algunas visitas presenciales a la ciudad (figura 25).

Esta base de datos incluye la ubicación espacial precisa de cada estructura y el número de niveles (de 1 a 5) que poseen. Adicionalmente, cuando fue posible, se clasificaron las estructuras según el tipo de material de construcción, identificando si son de adobe, mampostería o estructuras reforzadas. Esta información es crucial para entender la vulnerabilidad y resistencia de las edificaciones ante eventos sísmicos u otros desastres.

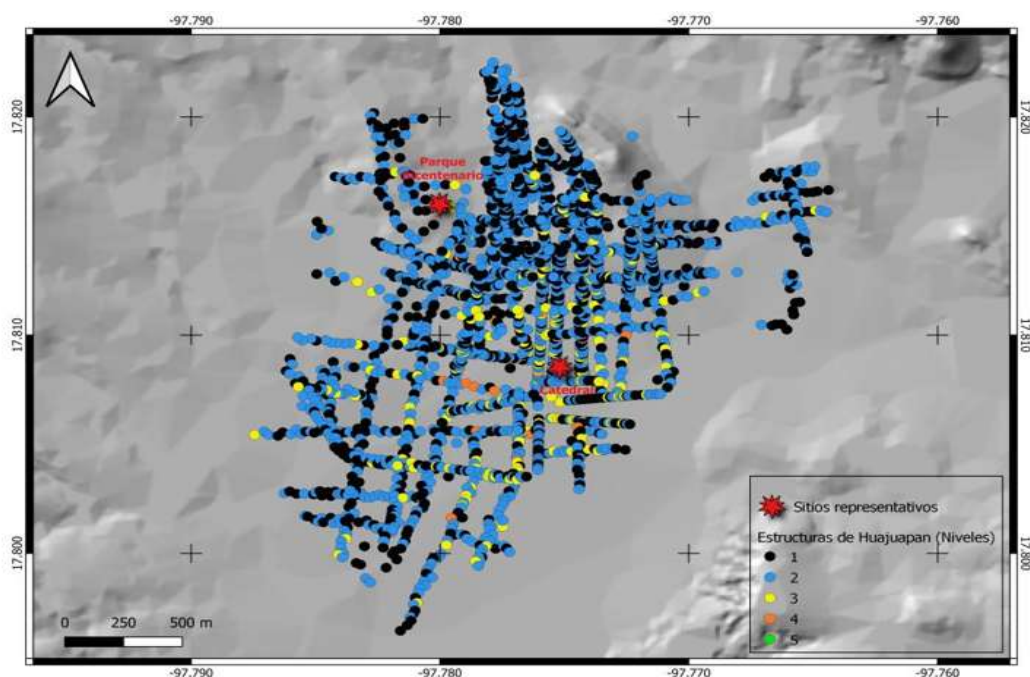


Figura 25. Mapa de las estructuras por niveles (1, 2, 3, 4 y 5) en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca. Los diferentes colores representan la cantidad de niveles de las edificaciones.

En las figuras 26 a 30 se presentan, de manera individual, las estructuras correspondientes a cada nivel, del 1 al 5, para la Ciudad de Huajuapán de León.

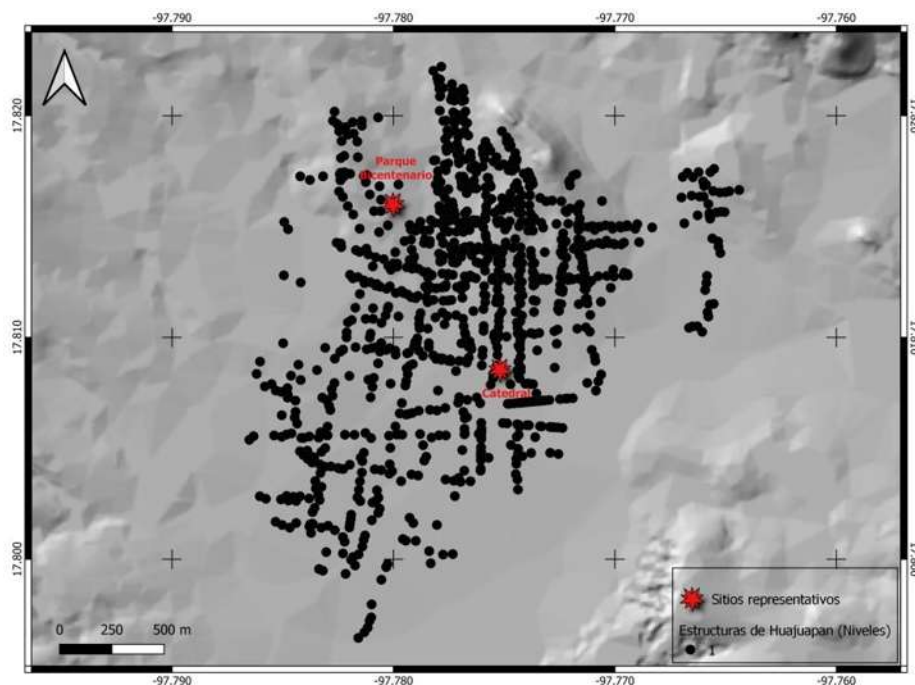


Figura 26. Mapa de estructuras de un nivel en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

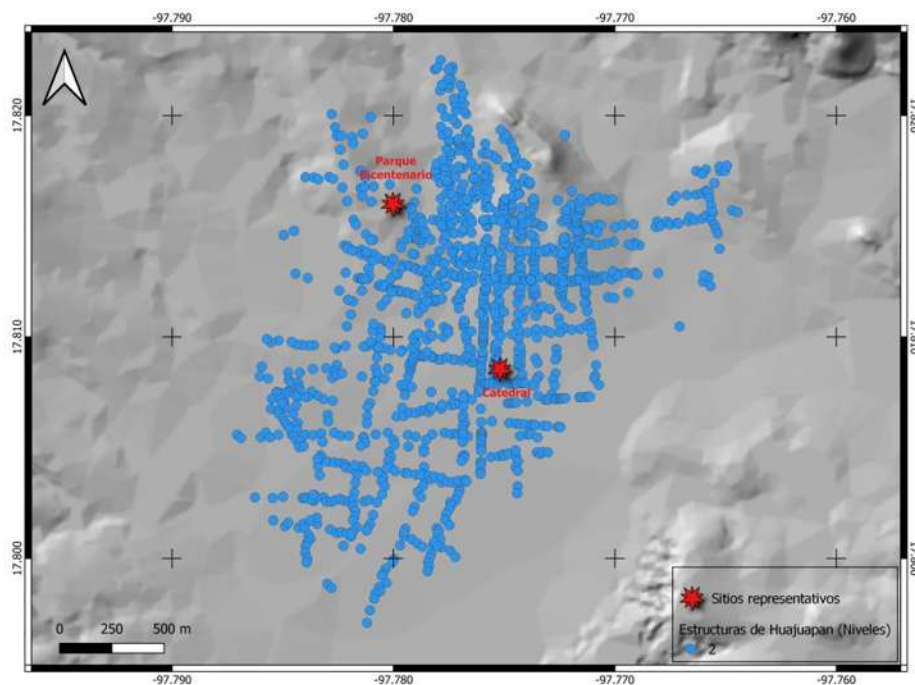


Figura 27. Mapa de estructuras de dos niveles en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

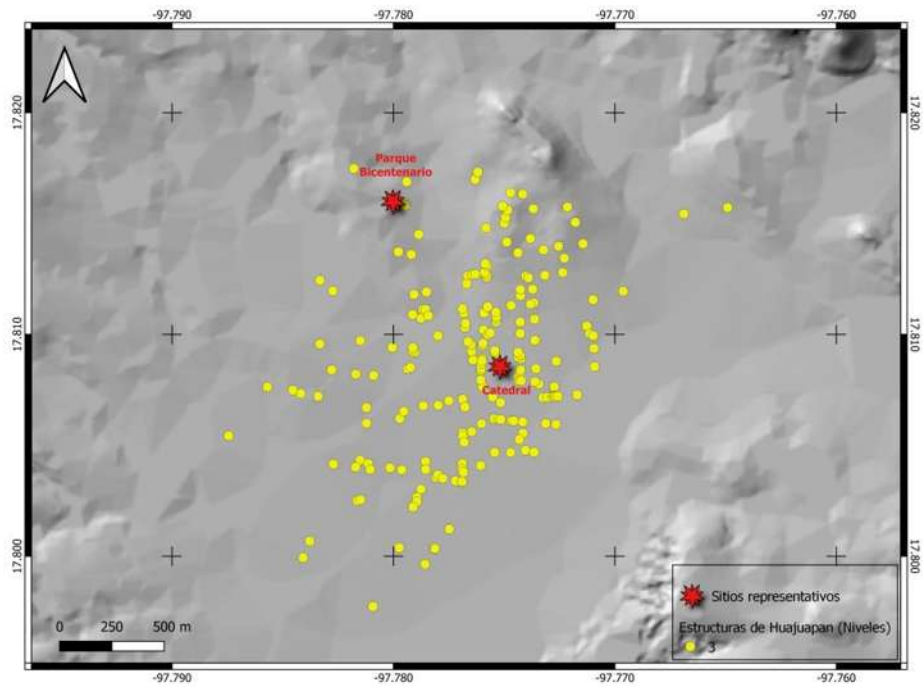


Figura 28. Mapa de estructuras de tres niveles en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

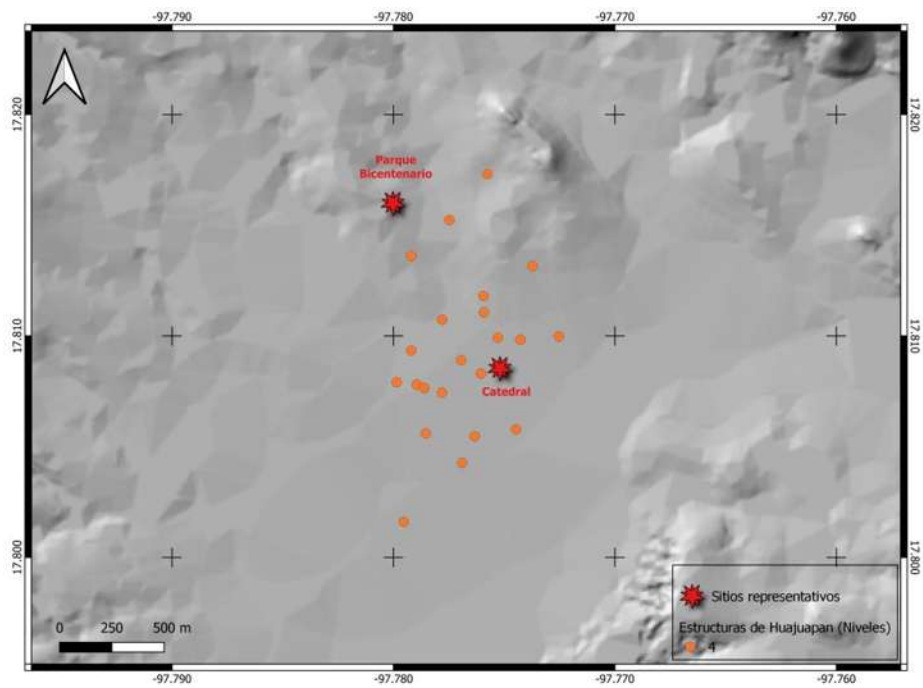


Figura 29. Mapa de estructuras de cuatro niveles en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

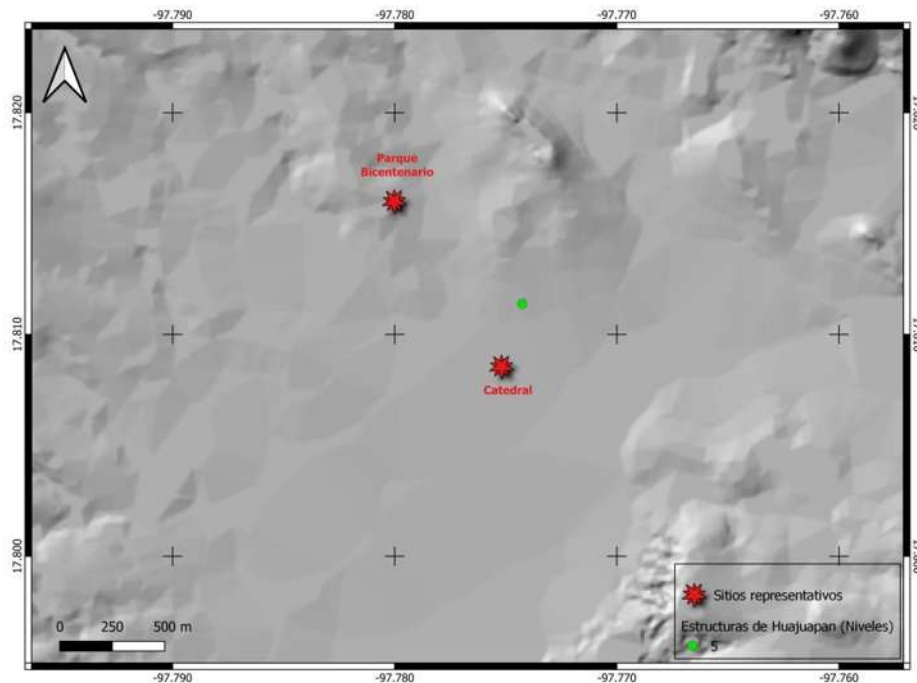


Figura 30. Mapa de estructuras de cinco niveles en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1 Discusión

Como comparación entre la Ciudad de Huajuapán de León y la ZMO (Márquez-López *et al.*, 2024) que recientemente tiene un mapa de isoperíodos podemos mencionar que en la ZMO se obtuvieron frecuencias características del suelo muy similares. Mientras que para la Ciudad de Huajuapán de León las frecuencias oscilan en el rango de entre 6 Hz a 10 Hz, para la ZMO fueron de 5 Hz a 12 Hz, en cuanto a las rocas del basamento para la ciudad de Huajuapán de León predominan la roca caliza y andesita, con una amplificación posiblemente relacionada al espesor del aluvión y arenisca.

Se generaron mapas para cada nivel de las estructuras, utilizando isolíneas para estimar los escenarios posibles con base en los periodos de interés para la ciudad, facilitando la identificación de áreas con comportamientos sísmicos similares. Estos mapas se presentan en las figuras 31, 32, 33 y 34.

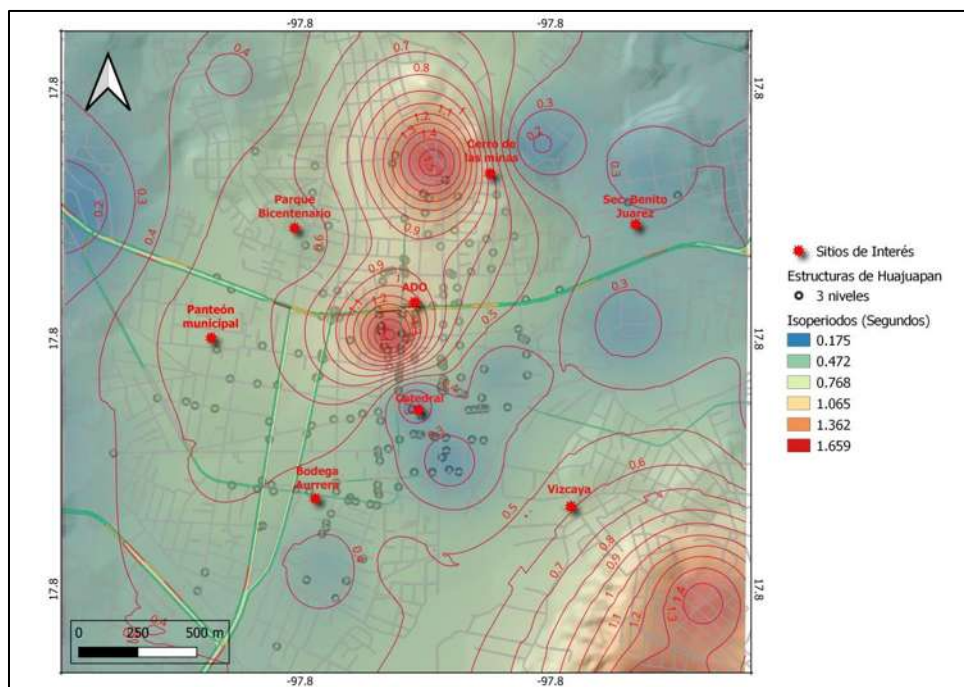


Figura 33. Mapa de isoperiodos para las estructuras de tres niveles en la Ciudad Huajuapán de León, Oaxaca. Los distintos colores representan los periodos fundamentales asociados a las diferentes zonas de la ciudad.

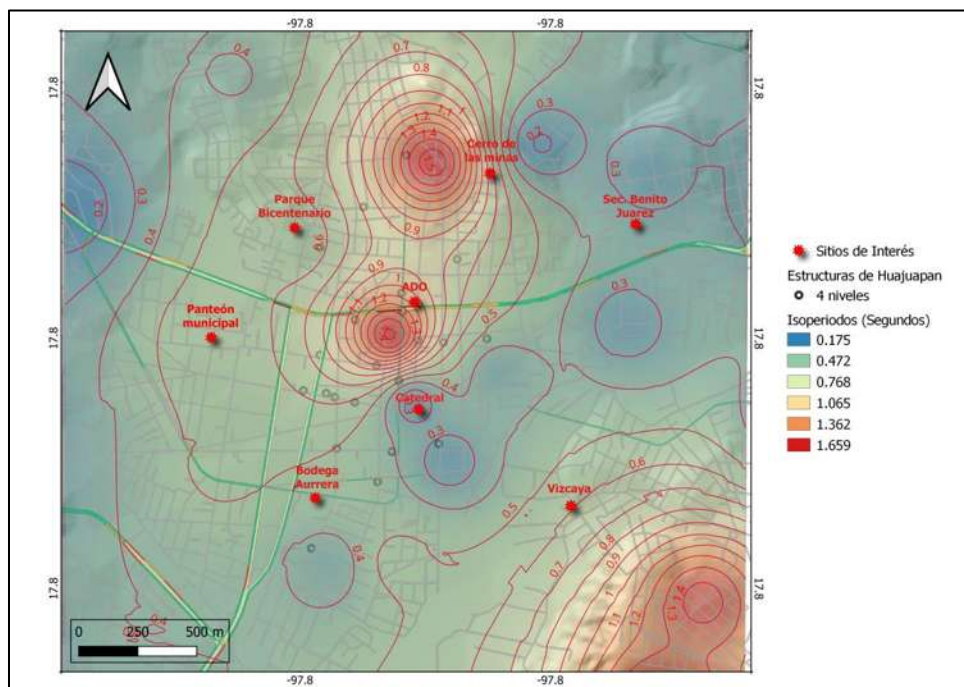


Figura 34. Mapa de isoperiodos para las estructuras de cuatro niveles en la Ciudad Huajuapán de León, Oaxaca. Los distintos colores representan los periodos fundamentales asociados a las diferentes zonas de la ciudad.

El propósito de estos mapas es proporcionar una representación visual clara y detallada de los posibles escenarios sísmicos, facilitando la evaluación de riesgos y la planificación de medidas de mitigación en la Ciudad de Huajuapán de León.

A partir de los mapas de isoperiodos, es posible identificar que los periodos bajos se encuentran mayormente en las zonas del noreste, y en menor medida en el noroeste y parte del centro de la ciudad. Los periodos intermedios se concentran principalmente en el centro de la ciudad, mientras que los periodos altos se distribuyen mayormente en el centro y en menor medida al sureste de la ciudad.

A modo de comparación, los picos de mayor ruido obtenidos de las estaciones empleadas con sismómetros de banda ancha para Huajuapán de León, Oaxaca por Ramírez (2012) son similares a los obtenidos en este trabajo, ya que ambos se sitúan en la misma geología aluvial (frecuencia entre 5 y 6 Hz) y correspondientes a periodos entre 0.16 segundos y 0.2 segundos. Esta área se localiza en el centro de la ciudad.

En las figuras 35, 36 y 37 se presentan mapas donde las estructuras de 2 niveles están acompañas de isolíneas representativas de 0.2 segundos, las estructuras de 3 niveles con isolíneas de 0.3 segundos y, las estructuras de 4 niveles con isolíneas de 0.4 segundos. Estos mapas proporcionan escenarios detallados para evaluar el comportamiento sísmico.

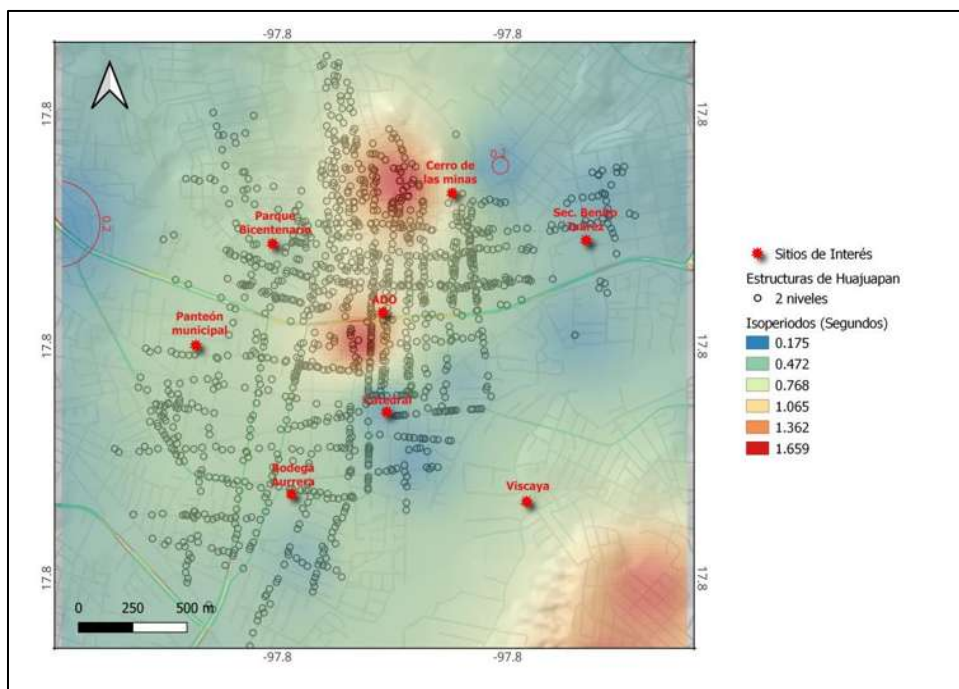


Figura 35. Mapa de isoperiodos para las estructuras de dos niveles con isólinas de 0.2 segundos en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

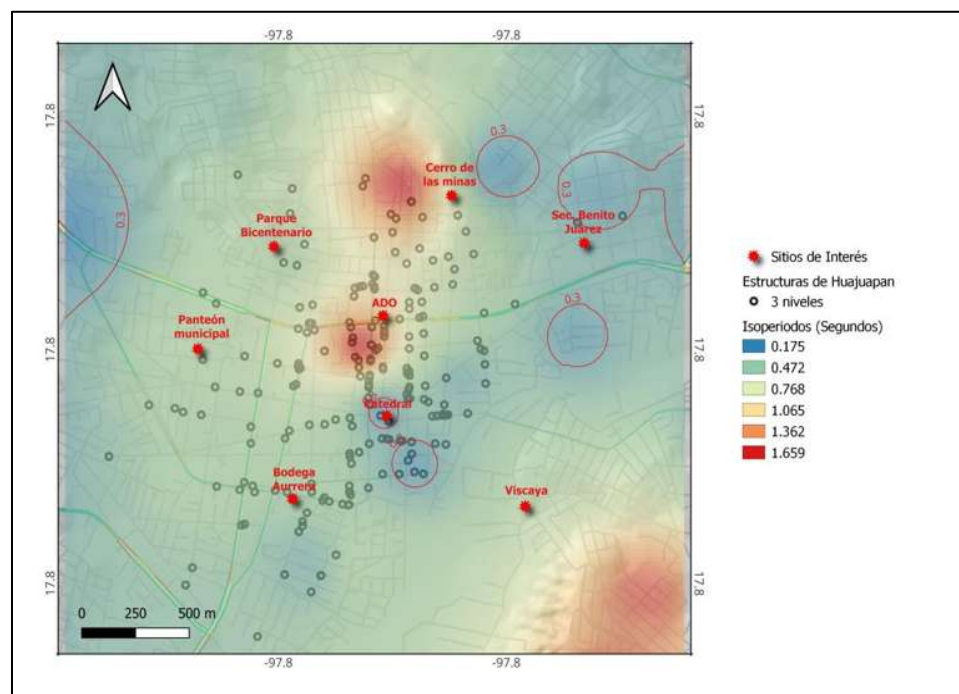


Figura 36. Mapa de isoperiodos para las estructuras de tres niveles con isólinas de 0.3 segundos en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

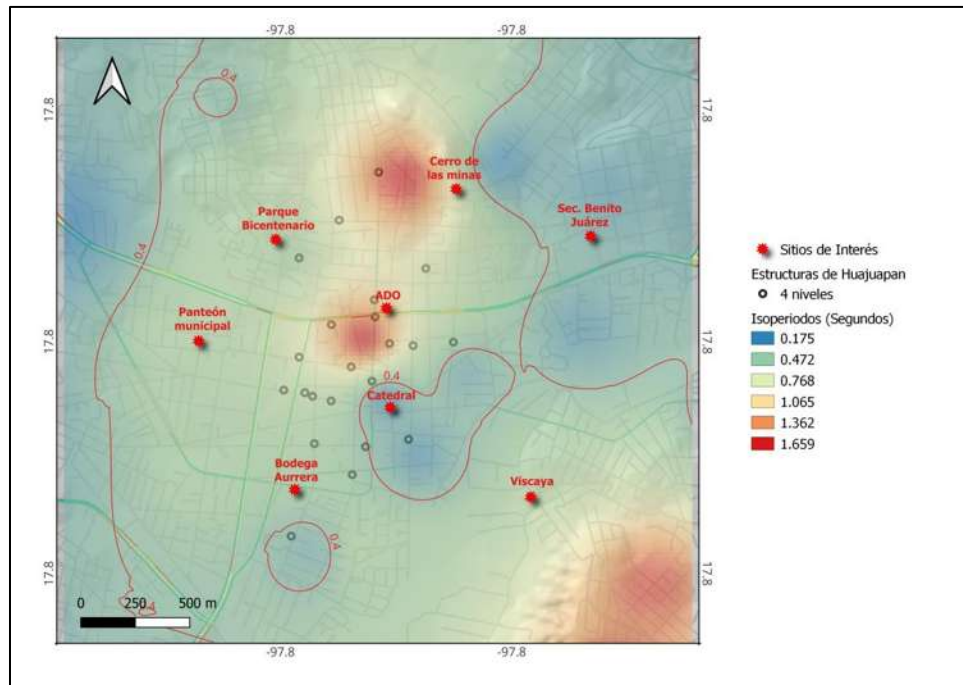


Figura 37. Mapa de isoperiodos para las estructuras de cuatro niveles con isolíneas de 0.4 segundos en la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca.

Con base en los mapas de escenarios, es posible identificar zonas vulnerables en función de los diferentes niveles de las estructuras. Por ejemplo, para los edificios de 2 niveles, la isolínea representativa de 0.2 segundos abarca la zona oeste de la ciudad; para los edificios de 3 niveles, la isolínea representativa de 0.3 segundos abarca las zonas del centro de la ciudad; y para los edificios de 4 niveles, la isolínea representativa de 0.4 segundos abarca el centro, el noreste y el oeste, cubriendo gran parte de la ciudad. Históricamente han existido daños en las zonas del centro de la ciudad, como hemos visto en los sismos de los últimos años (Yamamoto *et al.*, 1984; SSN, 2019), que afectaron edificaciones como la catedral y el edificio del municipio, cuyas alturas corresponden a los periodos teóricos de 0.2 y 0.3 segundos.

En la siguiente tabla se proporciona la información anterior organizada para visualizar mejor la relación entre los niveles de las estructuras, las isolíneas representativas, las zonas abarcadas y los daños históricos.

Tabla 5. Tabla con relación entre niveles, isolíneas, zonas y daños históricos.

NÚMERO DE NIVELES DE ESTRUCTURAS	ISOLÍNEA REPRESENTATIVA	ZONAS ABARCADAS	DAÑOS HISTÓRICOS
2	0.2 segundos	Zona oeste de la ciudad	Catedral y edificio del municipio (corresponden a periodos teóricos de 0.2s y 0.3s)
3	0.3 segundos	Zona centro de la ciudad	Sismos en los últimos años, afectando principalmente el centro
4	0.4 segundos	Centro, noreste y oeste de la ciudad	Afectaciones en edificaciones importantes del centro debido a los depósitos aluviales

En la figura 38 se presenta un mapa que integra los isoperiodos y la geología, en donde podemos reconocer que los periodos más altos se encuentran sobre el aluvión y la andesita y los más bajos se encuentran sobre la caliza y la arenisca-conglomerado.

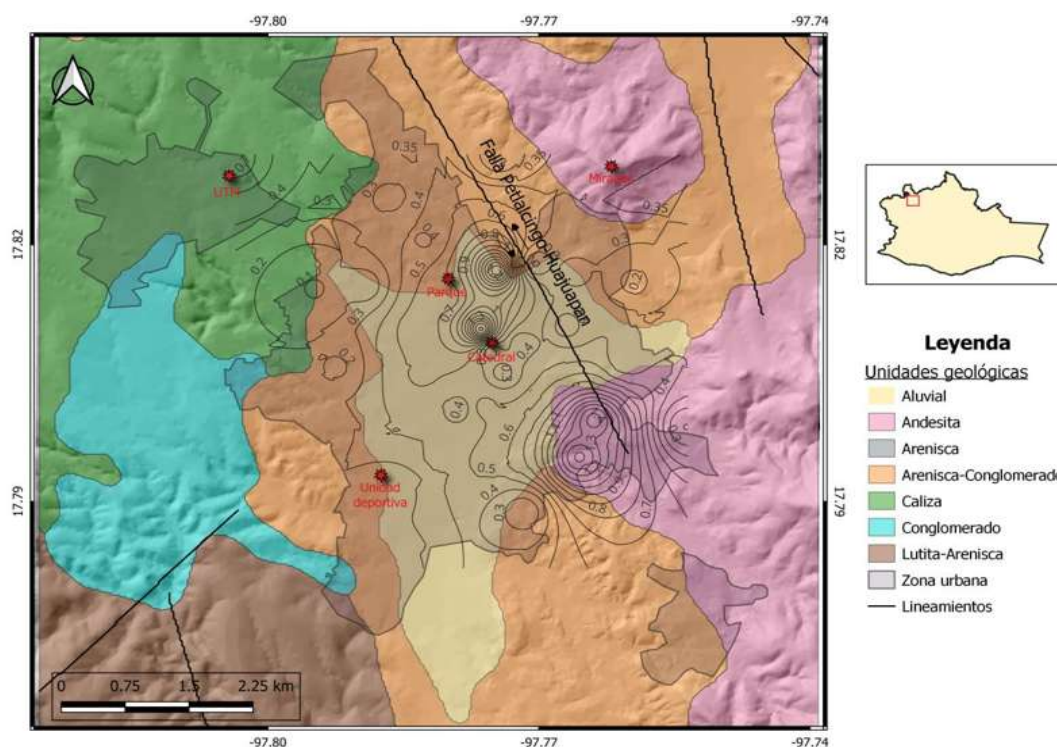


Figura 38. Mapa geológico de Huajuapán de León, Huajuapán mostrando los isoperiodos.

5.2 Conclusiones y Recomendaciones

A partir de los mapas obtenidos para el periodo fundamental de suelo en segundos (isoperiodos) para la Ciudad de Huajuapán de León (figura 38), se observa que las zonas con mayores periodos se encuentran en el noreste y sureste, afectando sitios importantes como la Catedral. Geológicamente, estas áreas están principalmente sobre depósitos aluviales con un espesor aproximado de 40 metros y, en menor medida, sobre unidades de areniscas y conglomerados.

En contraste, las zonas con menores periodos se localizan al este, donde se encuentran sitios de interés como la Unidad Deportiva, y geológicamente están sobre caliza, arenisca-conglomerado y parte del aluvial.

En cuanto a las amplificaciones, los mapas muestran que las mayores amplificaciones (de colores rojos) se encuentran al noroeste, afectando sitios de interés como el panteón municipal, y en cuanto a la geología se encuentra sobre los materiales aluviales. Las menores amplificaciones (colores azules) se localizan al suroeste, en sitios como Vizcaya, y geológicamente están sobre rocas andesitas.

Respecto a las estructuras, se observa que la mayoría de las edificaciones en la zona roja, es decir, donde se encuentra la mayor amplificación del suelo, son de 1 o 2 niveles. En esta zona, las estructuras de 3 niveles o más son muy escasas.

Con base en los mapas de escenarios, es posible identificar zonas vulnerables según los diferentes niveles de las estructuras, lo que representa una contribución a la mitigación del riesgo sísmico en la Ciudad de Huajuapán de León.

Se recomienda realizar una cartografía geológica para identificar fallas sismogénicas corticales como la Pletalcingo-Huajuapán que pudieran generar sismos locales.

Basado en los resultados, se recomienda que las nuevas construcciones en las zonas identificadas como de alto riesgo sigan estrictas normas de diseño sísmico.

Además, se sugiere la evaluación y reforzamiento de las estructuras existentes para mejorar su resistencia a los sismos.

Finalmente, se resalta la necesidad de estudios y monitoreo continuos. La dinámica tectónica de la región requiere estudios continuos y actualizados para comprender mejor los efectos de sitio y la respuesta sísmica del terreno. La implementación de campañas de monitoreo sísmico a largo plazo es esencial para mantener la seguridad estructural y la resiliencia urbana.

7. REFERENCIAS

Abdel-Rahman, K, Abd El-Aal AK, El-Hady SM, Mohamed AA, Abdel-Moniem E. 2012, "Fundamental site frequency estimation at new domiat city, Egypt", Arab J Geosci; 5:653–61. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0222-2>.

Acevedo-Martínez A. 1945. Apuntes histórico-geográficos de la ciudad de Huajuapán, s.p.i, México.

Arroyo, M., J. A. Arzate y J. Pacheco. 2012. Micro-zonación sísmica. Primera ed. Cordinadores científicos. ISBN 9789685435840 pp. 211-222.

Bard, P. Y. 1999. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation. The effects of surface geology on seismic motion, Irikura K Judo K, Okada H, Sasatani T, editors. Vo. 3.(Recent progress and New Horizon on ESG study.)

Bazán, E. y R. Meli. 2004. Diseño sísmico de edificios. Editorial Limusa. México D.F. pp 308.

Bustillos, P., J.M. 2005. Microzonificación sísmica del valle de Querétaro. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería. UAQ.

Bürgmann, R., G. Hilley, A. Ferretti y F. Novali. 2006. Resolving vertical tectonics in the San Francisco Bay Area from permanent scatterer InSAR and GPS analysis. Geology 34(3)doi: 10.1130/g22064.1.

Caballero-Miranda, C., 1990, Geología y Anisotropía del Jurásico Continental del área de Huajuapán de León-Petlalcingo Estados de Oaxaca y Puebla: Facultad de Ciencias, UNAM, Tesis de Maestría, 142 p.

Campos-Madrigal, Centeno-García, E., Mendoza-Rosales, E., Silva-Romo, G. 2013. Sedimentología, reconstrucción paleoambiental y significado tectónico de

las sucesiones clásticas del Jurásico Medio en el área de Texcalapa, Puebla - Huajuapán de León, Oaxaca: Revisión de las formaciones Ayuquila y Tecomazúchi. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 30, núm. 1, 2013, pp. 24-50. Universidad Nacional Autónoma de México. Querétaro, México.

Chávez-García, F. J. y J. Tejeda-Jácome. 2010. Site response in Tecoman, Colima, Mexico—I: Comparison of results from different instruments and analysis techniques. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 30(8):711-716. doi: 10.1016/j.soildyn.2010.03.001.

CENAPRED, 2017. Metodología para realizar estudios de microzonificación sísmica. Coordinación nacional de protección civil de México centro nacional de prevención de desastres. P. 35-40 Claerbout J. F (1968). Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response.

CENAPRED, 2019. El sismo de Huajuapán en 1980.. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/el-sismo-de-huajuapan-en-1980?idiom=es>

CENAPRED, 2021. A 93 años del sismo de Acatlán de Osorio, Puebla.

Clancey, G. 2012. Japanese Seismicity and the Limits of Prediction. *The Journal of Asian Studies* 71(02):333-344. doi: 10.1017/s0021911812000058.

Colectivo de autores, 2019. Crónicas de 6 siglos de sismos en México: lecciones aprendidas y perspectivas. (Asociación Mexicana de Instituciones de Seguro A. C, 2019). ISBN en proceso.

Despaigne-Longchamp, G. 2020. Estación Sismológica de la Universidad Tecnológica de la Mixteca. *Temas de Ciencia y Tecnología*. 24 (71). ISSN 2007-0977 pp 59 - 62.

Enescu, B., K. Shimojo, A. Opris y Y. Yagi. 2016. Remote triggering of seismicity at Japanese volcanoes following the 2016 M7.3 Kumamoto earthquake. *Earth, Planets and Space* 68(1):165. (journal article) doi: 10.1186/s40623-016- 0539-5.

Erben, H.K., 1956, El Jurásico Medio y el Calloviano de México: XX Congreso Geológico Internacional, México, 140 p.

Geller, R. J. 2011. Shake-up time for Japanese seismology. *Nature* 472:407. (Comment) doi: 10.1038/nature10105.

González, M. 2014. Replanteamiento de los periodos fundamentales de Querétaro. Tesis de maestría. Facultad de ingeniería. UAQ.

Gutiérrez Navarro, R. 2010. Cartografía geológico-estructural de la Formación Teposcolula entre Chila de las Flores Puebla y Huajuapán de León Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de México.

Hernández, A. 2023. Monografía de Huajuapán de León. Escuela Normal de la Huasteca Potosina.

Hernández Nieto, T. 2019. Análisis Cinemático y Cronología de la Falla Las Peñas al Sur de Huajuapán de León, Oaxaca. México. Tesis de Licenciatura. Ciudad Universitaria, México, D.F.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2004. Síntesis de información geográfica del Estado de Oaxaca pp 65.71 https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvini/egi/productos/historicos/2104/702825224394/702825224394_11.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010. Compendio de información geográfica municipal 2010 Heroica Ciudad de Huajuapán de León Oaxaca. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/20/20039.pdf

Konno y T. Ohmachi, "Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor," Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 88, no. 1, pp. 228–241, 1998.

Lacan, P., y Arango-Galván, C. 2021. Geophysical evidence of the 1912 earthquake rupture along the central fault system of the Acambay Graben, Central Mexico. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 73(2).

Lermo, J. y F. J. Chávez-García. 1994. Are microtremors useful in site response evaluation? Bulletin of Seismological Society of America. 84(8):1350-1364.

Lermo, J. y F. M. Limaymanta. 2007. Uso de las funciones de transferencia empíricas (HVN_R) obtenidas con microtremores para construir mapas con la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico. Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.

Lermo J, J Martínez, J Angulo, A Zúñiga, R Valle, L Espinoza, 2013. "Mapa de isoperiodos y clasificación de terrenos con fines de diseño por sismo para el municipio de Puebla, Puebla", vol Informe I de I-Nro.R901. Inst. Ing. UNAM, Puebla, Mex.

Leyton, F., S. Ruiz y M. Astroza. 2012. Correlation between seismic intensity for the Maule 2010 earthquake (M_w 8.8) and microtremors' HVSR. 15th World Conference on Earthquake Engineering. Lisboa, Portugal.

Lomas, E., A. Uribe y S. Fernández, 1999. "Localización del sismo (99-06-15) de Tehuacán, Puebla, mediante la red sismológica de la CFE", GEOS, 19(4): 299.

Lombardi, A. M. y W. Marzocchi. 2011. The double branching model for earthquake forecast applied to the Japanese seismicity. *Earth, Planets and Space* 63(3):187-195. doi: 10.5047/eps.2011.02.001.

López-Ramos, E., 1983-1987, *Geología General y de México*: Vols. 1, 11 Y 111. Ed Reséndiz.

Martínez, J. A. 2015. Validación del factor de amplificación de los cocientes espectrales a partir de microtemores, para fines de mapas sísmicos de intensidad. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

Márquez-Lopez, M., Figueroa-Soto, A., Lopez Granados, E., Mendoza-Ponce, A., Belmonte Jiménez, S. I., Ávila-Olivera, J. A., and Hernández-Sánchez, R. I. 2024. Mapping Seismic Site Classes in Oaxaca Metropolitan Area, Mexico based on microtremor records. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 41(3), 221–231. <https://doi.org/10.22201/igc.20072902e.2024.3.1829>

Martiny, B.M., Morán-Zenteno, D.J., Tolson, G., Silva-Romo, G., López-Martínez, M. 2010. The Salado River fault: reactivation of an Early Jurassic fault in a transfer zone during Laramide deformation in southern Mexico, *International Geology Review*, 54:2, 144-164p.

Márquez López, M. 2022. Análisis espacial para la determinación de peligros en la zona urbana de la Ciudad de Oaxaca. Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones de Ciencias de la Tierra.

Molnar, S., J. F. Cassidy, S. Castellaro, C. Cornou, H. Crow, J. A. Hunter, S. Matsushima, F. J. Sánchez-Sesma y A. Yong. 2018. Application of Microtremor Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio (MHVSR) Analysis for Site Characterization: State of the Art. *Surveys in Geophysics* 39(4):613-631. doi: 10.1007/s10712-018-9464-4.

Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of RTRI (Japan)*. 30.(1.):25-33.

Nakamura, Y. 2000. "Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications", 12th World Conf. Earthq. Eng. Auckland, New Zeal., p. page 2656.

Nath, S K, y K K S Thingbaijam, 2009. "Seismic hazard assessment – a holistic microzonation approach", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*,9, 1445–1459, doi:10.5194/nhess-9-1445-2009.

Nogoshi, M. y T. Igarashi. 1971. On the Amplitude Characteristics of Ambient noise (Part 2). *J. Seismol. Soc. Japan*. 24.:26-40.

Peñaloza, B. 2022. Análisis de registros de ruido sísmico y determinación de cocientes espectrales en la ciudad de Morelia. Tesis de licenciatura. Tecnológico Superior de Tacámbaro, Michoacán.

Quintanar, L, J. Yamamoto, C. J. Rebollar y Z. Jiménez, 1999. "El sismo de Tehuacán del 15 de junio de 1999, semejanzas y diferencias con el sismo ocurrido el 24 de octubre de 1980", *GEOS*, 19(4):299.

Ramírez-Herrera, Teresa y Lugo-Hubp, José, 2000. ´ Efectos del sismo ($7.0=M_w$) del 15 de junio de 1999 en Puebla y estados vecinos´. Ciudad de México.

Ramírez Soto, A. 2012. Estudios de prueba de equipo sísmico para realizar microzonificación sísmica: caso particular Huajuapán de León, Oaxaca. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional, México DF.

Ríos Llamas, C. y Durán Bedolla, I. 2021. Arquitectura comunitaria y recuperación de la vivienda: brigadas de reconstrucción post-sismo en Oaxaca, México.

Rivera, D., C. Arce y J. Zetina. 2013. Propuesta de microzonificación sísmica para el municipio de Naucalpan. Memoria de XIX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Boca del Río Veracruz.

Salas, G.P., 1949, Bosquejo geológico de la cuenca sedimentaria de Oaxaca: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 1, núm. 2, p. 79 156.

Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez M., Iturrarán-Viveros U., Luzón F., Campillo M., Margerin L., García-Jerez A., Suarez M., Santoyo M. A. y Rodríguez-Castellanos A. 2011. A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophysical Journal International*.

Sánchez-Sesma, F. J., Weaver, R. L., Kawase, H., Matsushima, S., Luzón, F. & Campillo, M. 2011. Energy partitions among elastic waves for dynamic surface loads in a semi-infinite solid, *Bull. seism. Soc. Am.*, doi:10.1785/0120100196.

Sánchez, F., R. M. . 2015. Evaluación del peligro sísmico en el municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México. Programa de maestría y doctorado en ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.

Sarlis, N. V., E. S. Skordas, P. A. Varotsos, T. Nagao, M. Kamogawa y S. Uyeda. 2015. Spatiotemporal variations of seismicity before major earthquakes in the

Japanese area and their relation with the epicentral locations. Proc Natl Acad Sci U S A 112(4):986-989. doi: 10.1073/pnas.1422893112.

Servicio Geológico Mexicano, 2022. Evolución de la tectónica en México. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Evolucion-tectonica-Mexico.html>

Servicio Sismológico Nacional (SSN) 2012. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Servicio Sismológico Nacional (SSN) 2016. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. URL: <http://www.ssn.unam.mx>

Servicio Sismológico Nacional (SSN) 2019. Reporte Especial 20170919 Puebla – Morelos. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. URL: [SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf](#)

Servicio Sismológico Nacional (SSN) 2020. Reporte Especial Sismo del 23 de Junio de 2020, Costa de Oaxaca (M7.4). Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México. URL: [SSNMX_rep_esp_20200623_Oaxaca-Costa_M75.pdf](#)

SESAME. 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. SESAME European Research Project WP12-Deliverable D23.12.

SESAME WP05, 2002. “Site effects assessment using ambient excitations. Optimum deployment strategy for array measurements,” European Commission - Research General Directorate EVG1 CT 2000-00026 SESAME, SESAME European research project WP05- Deliverable D07.05, Geopsy was developed by

Laboratoire de Geophysique Interne et Tectonophysique (LGIT) Grenoble, France and University of Potsdam, Germany, 2002.

Singh, S. K, M. Ordaz, J. F. Pacheco, R. Quass, L. Alcántara, S. Alcocer, C. Gutiérrez, R. Meli, E. Ovando, G. Aguilar, J. Aguirre, D. Almora, J. G. Anderson, M. Ayala, G. Castro, R. Durán, J. Estrada, L. Flores, G. González, E. Guevara, F.

SISPLADE. 2022. Capítulo 1. Peligros de Origen Geológico y Localización de zonas vulnerables. Instituto de Planeación para el Bienestar, Gobierno del Estado de Oaxaca. <http://sisplade.oaxaca.gob.mx/sisplade/>

Solano-Hernández, E. y Mendoza Ponce, A, 2021. Sismicidad en el estado de Oaxaca de 2015 a 2019. Temas de Ciencia y Tecnología, Vol 25, Num 75. ISSN 2007-0977. pp 25-35.

Suárez, G. (2021). Catálogo de Sismos Históricos de México, <http://www.sismoshistoricos.org/>

Talavera Cervantes, G y Mendoza-Ponce, A. 2024. Análisis estadístico de la sismicidad reportada por el Servicio Sismológico Nacional en el estado de Oaxaca.

Uribe Luna, J. 1999. Cartografía y estratigrafía mediante sensores remotos en un sistema de información geográfica: Área de Huajuapán de León, Oaxaca, México.

Watson, D. F., and G. M. Philip. 1985. A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation. *Geoprocessing* 2:315–327.

Yamamoto, J., Jiménez, Z., & Mota, R. 1984. El temblor de Huajuapán de León, Oaxaca, México, del 24 de octubre de 1980. *Geofísica Internacional*, 23(1), 83–110.

Zavala - Gutiérrez N. 2019. Intensidad sísmica en la ciudad de Querétaro, considerando sismos de falla inversa y normal, para acotar el riesgo de edificaciones. Tesis de maestría. Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Zúñiga, F. R., G. Suárez, Á. Figueroa-Soto y A. Mendoza. 2017. A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. *Journal of Seismology* 21(6):1295-1322. doi: 10.1007/s10950-017-9666-0

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio	
Título del trabajo	Aplicación de la técnica de cocientes espectrales en el análisis de efectos de sitio y construcción de escenarios en la ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca, México.	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Gildardo Talavera Cervantes	2330351h@umich.mx
Director	Ángel Gregorio Figueroa Soto	angel.figueroa@umich.mx
Codirector	Avith del Refugio Mendoza Ponce	avith.mendoza@unicach.mx
Coordinador del programa	Boris Chako Tchamabe	mae.geociencias.planificacion.territorio@umich.mx

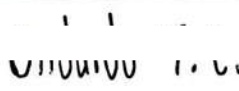
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Gildardo Talavera Cervantes 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán a 10 de marzo del 2025

Gildardo Talavera Cervantes

Aplicación de la técnica de cocientes espectrales en el análisis de efectos de sitio y construcción

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

tm:oid::3117:442193221

Fecha de entrega

24 mar 2025, 1:27 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

24 mar 2025, 1:41 p.m. GMT-6

Nombre de archivo

Aplicación de la técnica de cocientes espectrales en el análisis de efectos de sitio y construcción ...pdf

Tamaño de archivo

4.7 MB

74 Páginas

16.595 Palabras

91.181 Caracteres