



Mapa de isoperiodos sísmicos de la ciudad de Puebla.

Map of seismic isoperiods of the Puebla City.

Pablo PÉREZ¹, Nancy CUACHOCA², Margarita RODRÍGUEZ³ y Eddy LOZADA⁴

¹ Lozada y Rodríguez Compañía Ingeniería Geotécnica S de RL de CV, México

INFORMACIÓN

Palabras clave:

- Zonificación
- Isoperiodos
- Geofísica
- Vibración Ambiental
- SPAC

RESUMEN

Durante varios años, se han llevado a cabo estudios con propósito de zonificar el terreno de la Ciudad de Puebla, sin embargo, se han centrado solamente en el centro histórico, además de tener casi dos décadas. En este trabajo se realizaron lecturas sísmicas en puntos distribuidos en diferentes áreas, posteriormente se obtuvo un mapa de isoperiodos cubriendo el municipio de Puebla, así como los siguientes municipios colindantes: San Pedro Cholula, San Andrés Cholula, Cuautlancingo, Amozoc, Ocoyucan y San Gregorio Atzompa, municipios donde se centran las principales manchas urbanas. Para lograrlo, se usaron los métodos geofísicos: Vibración ambiental, para obtener los periodos fundamentales del suelo mediante la técnica de cocientes espectrales H/V (Nakamura, 1989); Método SPAC (Spatial autocorrelation method), para obtener valores de Vs. Esto con el objetivo de caracterizar el movimiento del suelo para que sirva como una herramienta para el uso previo en el diseño geotécnico y estructural de diferentes tipos de construcciones.

ABSTRACT

For several years, studies have been carried out with the purpose of zoning the terrain of the City of Puebla, however, they have focused only on the historic center, besides being almost two decades old. In this work, seismic readings were taken at points distributed in different areas, subsequently an isoperiod map was obtained covering the municipality of Puebla, as well as the following neighboring municipalities: San Pedro Cholula, San Andrés Cholula, Cuautlancingo, Amozoc, Ocoyucan and San Gregorio Atzompa, municipalities where the main urban spots are centered. To achieve this, the following geophysical methods were used: Environmental vibration, to obtain the fundamental periods of the soil using the technique of spectral ratios H/V (Nakamura, 1989); SPAC method (Spatial autocorrelation method), to obtain values of Vs. This with the objective of characterizing the soil movement to serve as a tool for the previous use in the geotechnical and structural design of different types of constructions.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, debido a la mejora en los reglamentos de construcción es necesario contar con mayor información del subsuelo en lugares donde se proyectan edificaciones urbanas y rurales. Para esto, es necesario contar con una caracterización integral y correcta del terreno para ofrecer una mejor visualización del sitio, la cual permitirá determinar si existen discontinuidades presentes en el subsuelo. Los estudios geofísicos son una herramienta complementaria de gran calidad que permite conocer

la distribución estratigráfica del subsuelo de manera indirecta.

Por otro lado, la Población del estado de Puebla ha ido en incremento concentrándose en las principales ciudades. Tan solo la Ciudad de Puebla es la cuarta metrópoli más grande del país y tiene una de las más grandes extensiones en comparación con la densidad. De acuerdo con la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), se estimó un crecimiento en el PIB de la industria de la construcción del 2.0 a 2.5 para el año 2019, del 2.8 para el año 2020 y del 19.5 en el 2023 (CMIC, 2024).

De lo último acontecido, eventos como el sismo de 1999 y el de 2017 que han tenido epicentro dentro del mismo estado, provocando daños a gran escala, sitúan a Puebla en una zona de sismicidad media; de ahí que surjan los mapas que sirvan de pauta para trabajos geotécnicos y civiles que buscan que las obras sean cada vez más resistentes a eventos sísmicos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estado de Puebla cuenta con una fisiografía constituida por diferentes formaciones geológicas, están representadas a nivel macro en diferentes mapas, con escalas muy grandes, por lo que no son adecuados para la realización de análisis detallados.

El estado se sitúa en una zona sísmica de mediana actividad (CFE, 2015), existen ríos, barrancas y lagos que se encuentran dentro y a la periferia de las poblaciones y ciudades. A través del tiempo, la ciudad de Puebla ha sido afectada por fenómenos naturales, desde sismos, caídas de ceniza, inundaciones, y deslizamientos de laderas, fenómenos con pérdidas económicas, afectaciones en infraestructura y pérdidas humanas. Según la Dra. Ana Conde Álvarez durante un panel de Cambio climático en Jalisco menciona que “En el país existe un mayor costo en reparar daños, hasta 38 veces más que en invertir en la prevención de desastres” esto fue en el 2015 sin haber contado los sismos del 2017. Los mapas de riesgos por sismo y deslaves que se pueden consultar en el CENAPRED son muy generales y no han sido actualizados desde el 2009 (Atlas Nacional de Riesgos, 2023).

A lo largo de los años se han realizado varios estudios con la intención de describir y zonificar el suelo de la Ciudad de Puebla, sin embargo, estos trabajos se han centrado solamente en el centro histórico, además de que tienen cierto tiempo de haberse realizado, se planea realizar estudios en la mancha urbana centrada en la capital abarcando al menos los municipios con mayor desarrollo urbano como son San Andrés Cholula, San Pedro Cholula, Puebla, Ocoyucan entre otros, se obtendrán datos sísmicos que ayuden a obtener periodos sísmicos y serán representados en mapas por medio de isolineas.

3. ANTECEDENTES

Según la zonificación sísmica de la República Mexicana representada en la figura 1, Puebla se encuentra en una zona de riesgo medio a estos eventos, pero, a lo largo de la historia, existen fuentes documentales de sismos fuertes con epicentros cercanos al estado, suscitados hace más de 100 años.



Figura 1. Peligrosidad Sísmica en México. Obtenido de SSN, 2002.

Aunado a lo anterior, en los últimos 25 años se han registrado dos sismos interplaca originados en el estado de Puebla con magnitudes superiores a los 7 grados. El primero fue el sismo de Tehuacán, ocurrido el 15 de junio de 1999, tuvo un hipocentro a 70 km de profundidad aproximadamente y una magnitud de 7.0, causando daños relevantes a edificaciones de la capital poblana, ya que, estructuras como iglesias y edificios icónicos del centro histórico resultaron dañados, además de esto, afectó a muchas poblaciones dentro del estado y algunas otras de estados aledaños como Hidalgo y Tlaxcala.

El sismo del 19 de septiembre de 2017 tuvo un epicentro en los límites entre Puebla y Morelos de 7,1; la principal diferencia con el de 1999 es que ocurrió a menos de 50 km de profundidad, por lo que se considera un sismo superficial. El sismo ocasionó una gran cantidad de afectaciones en las ciudades afectadas, principalmente en edificios antiguos como iglesias, hospitales, escuelas y viviendas; a nivel estatal concentró daños en más de 100 municipios de Puebla, entre los cuales destacan Cholula, Atlixco y los municipios que se encuentran dentro de la Mixteca poblana. Fuera del estado se presentaron una gran cantidad de daños en la Ciudad de México y en el estado de Morelos, siendo el sismo con mayor número de víctimas después del sismo de 1985.

Actualmente en la Ciudad de Puebla existen algunas zonificaciones tanto sísmicas como geotécnicas, pero estas son de forma muy general y solo cubren la parte central del municipio de Puebla.

La figura 2 es una de las diferentes propuestas de la zonificación sísmica de la Ciudad de Puebla (Juárez J. 2010), describe en tres zonas según la actividad sísmica generando solo tres grupos, Movimientos

frecuentes, movimientos menos frecuentes y movimientos escasos.

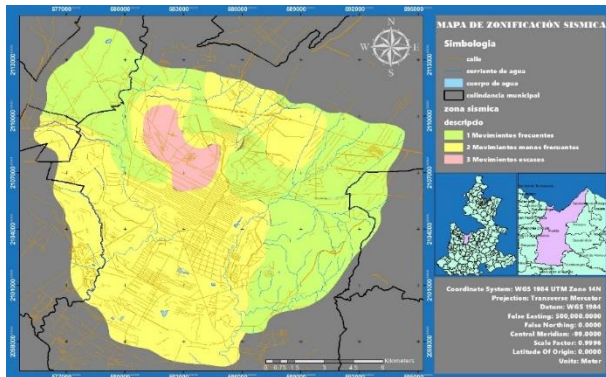


Figura 2. Zonificación sísmica de la Ciudad de Puebla (Juárez, 2010)

La Figura 3. muestra la zonificación geotécnica para el área urbana del Valle de Puebla (Periódico Oficial del Estado de Puebla, Normas 2017) según clasificadas conforme a su origen geológico.

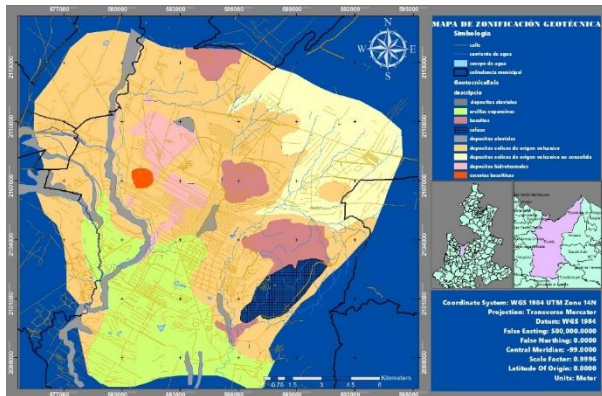


Figura 3. zonificación geotécnica para el área urbana del Valle de Puebla (POEP-NTCDC, 2017)

4. JUSTIFICACIÓN

Uno de los parámetros más importantes considerados en la actualidad a nivel mundial para la clasificación de los suelos es el llamado Vs30, que corresponde al promedio de las velocidades de ondas cortantes de las capas de suelo ubicadas desde la superficie hasta 30 metros debajo de ella.

Muchos códigos de construcción utilizan el promedio de la velocidad de onda de corte en los primeros 30 metros del perfil de suelo para discriminar tipos de suelos que tienen similares características de amplificación.

La función de definir la media de velocidades a 30 metros de profundidad como criterio para la clasificación de suelos, obedece a que el suelo dentro

de esa profundidad determina el comportamiento de las estructuras que se edifiquen sobre él. Dado que este parámetro requiere únicamente las propiedades del suelo en los primeros 30 metros, la Vs30 puede ser evaluada de forma eficiente con métodos de ondas de superficie, ya que no requiere de la elevada precisión que se puede obtener mediante métodos invasivos (Lesser et al., 2017).

Finalmente podrá ayudar a alcanzar diferentes objetivos de desarrollo sostenible Agenda 2030: Agua limpia y saneamiento (mapas para localizar suelos para la recarga natural y artificial de acuíferos). Trabajo decente y crecimiento económico, Industria Innovación e infraestructura, Ciudades comunidades sostenibles (Planificación de zona de vivienda e industria), Acción por el clima, vida de ecosistemas terrestres (Análisis de suelos, rehabilitación y rescate de zonas, ecología).

5. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar el movimiento del suelo mediante líneas de isoperiodos distribuidos en un mapa que sirva como una herramienta para el uso de la ingeniería civil.

Para el alcance de este objetivo se necesita realiza un banco de datos, ubicación de los puntos de estudio, estimar mediante las mediciones en campo el periodo fundamental de vibración y la distribución de la onda cortante Vs.

6. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto consistirá en la recopilación de fuentes con datos relevantes para la investigación realizada, que se acomodarán en una base de datos con diferente información, como su ubicación geográfica, valores de Vs, datos de litología (si existían) y una referencia interna para diferenciar los datos.

Posterior a la conformación de la base de datos de estudios existentes, se realizarán lecturas sísmicas distribuidas en la mancha urbana del Valle de Puebla, se realizará un mapa de isoperiodos cubriendo el municipio de Puebla, así como los siguientes municipios colindantes: San Pedro Cholula, San Andrés Cholula, Cuautlancingo, Amozoc, Ocoyucan y San Gregorio Atzompa.

Para lograrlo haremos uso de métodos geofísicos como vibración ambiental VA para obtener los periodos fundamentales del suelo mediante la técnica de cocientes espectrales H/V (Nakamura, 1989) además de realizar levantamiento con el metodo SPAC (Spatial autocorrelation method) para obtener valores de Vs, los estudios se realizaron en puntos distribuidos estratégicamente dentro de los municipios antes mencionados.

6.1 Vibración ambiental (H/V)

Se registrará en modo continuo el campo de ruido sísmico ambiental en tres componentes durante un periodo controlado, y se realizará el control de calidad de los datos durante su adquisición. Los datos que obtendremos en campo de los arreglos consistirán en registros continuos del movimiento del terreno observado en las tres componentes.

Para la estimación del periodo fundamental de vibrar del terreno, se instalaron sensores de velocidad en tres componentes, que registraron en cada sitio el movimiento del terreno en los componentes vertical (V), Longitudinal (L) y transversal (T). Se realizará el registro del campo de ruido sísmico ambiental de manera continua en un lapso de 30 minutos y cadencia de muestreo de 100 muestras por segundo.

Posteriormente ya en gabinete se realizará el acondicionamiento de la señal, consiste en sustraer el valor medio, la tendencia y filtrado. También se le aplicará un taper con la finalidad de eliminar los efectos laterales del filtrado. Finalmente se calculará el cociente espectral, siguiendo de cerca los principios propuestos por Nakamura, Y. (1989), Nogoshi M. and Igarashi T. (1971). El resultado es la gráfica del cociente espectral, cuyo máximo indica el valor de la frecuencia predominante de vibrar para el sitio de estudio.

6.2 Microtremores (MAM)

Se instalará un arreglo de sensores de baja frecuencia, para estimar la velocidad de cortante del punto central contra la profundidad, generando un modelo 1-D (Puntual) de velocidad de onda S contra profundidad. En el siguiente estudio se propone utilizar en campo una medición de tipo MAM que será procesada usando los conceptos de la sismica de dispersión de ondas superficiales, específicamente la técnica de Autocorrelación Espacial Modificada (Spatial Autocorrelation Technique (SPAC), definida por Aki en 1957).

Esta técnica consiste en primera instancia en medir en el sitio la dispersión de las ondas superficiales (con un arreglo de MAM) contenidas en el campo de ruido sísmico ambiental con objeto de estimar la distribución de la velocidad de cortante con la profundidad. Las mediciones de campo consistirán en instalar un arreglo de sensores con geometría lineal (MAM). La extensión del arreglo lineal fue de 33 m utilizando un sismógrafo de la marca PASI modelo GEA24 con un arreglo lineal de 12 geófonos con 4.5 Hz de frecuencia natural. Los datos que obtendremos en campo de los arreglos consistirán en registros continuos del movimiento del terreno observado en el componente vertical. La duración de los registros será de un minuto, todos se obtendrán a una tasa de muestreo 500 Hz. A partir de estos datos, se realiza

una transformación al dominio de la frecuencia para analizar los máximos espectrales obtenidos e identificar la tendencia descendente de la llamada curva de dispersión.

Finalmente, se identifica la curva de dispersión y a partir de ella se transforman de nueva cuenta al dominio del tiempo para realizar una inversión matemática que genera un modelo estimado en 1D (Puntual), que representa la variación de la velocidad de propagación de la Onda S en el punto central del arreglo con respecto a la profundidad.

6.3 Isoperiodos

Una vez obtenidos todos los datos deseados, se georreferenciarán los diferentes sondeos utilizando el software "QGIS", donde también se agregarán complementos para facilitar la localización espacial, como calles y nombres de colonias aledañas.

Se utilizaron los datos de periodo sísmico y Vs30 con sus respectivas coordenadas para localizarlos en el área que comprenden la zona de estudios, con los valores se generaron isolíneas mediante interpolación con el método kriging.

7. RESULTADOS

Debido a diferentes condiciones como: permisos, áreas abiertas, espacio público, áreas despejadas, solo se adquirieron datos en 23 sitios distribuidos en la zona urbana, en la Tabla 1 se muestra los puntos y resultados de los procesamientos antes mencionados.

Tabla 1. Puntos de adquisición de datos.

Sitios	X UTM	Y UTM	Ts	Vs30 (m/s)
1	585107.61	2101368.24	1.27	382.37
2	576309.29	2104665.99	1.28	592.17
3	568234.56	2102858.03	1.33	683.67
4	576254.42	2090523.65	0.91	576.43
5	593920.55	2108834.89	0.93	211.84
6	587167.00	2105175.00	0.94	514.07
7	579318.00	2100284.00	0.96	447.33
8	584154.00	2105460.00	-	415.60
9	572143.12	2106739.77	0.99	529.12
10	577939.11	2111502.58	1.03	492.42
11	576962.00	2101846.00	0.92	478.10
12	570145.06	2100973.99	1.69	413.50
13	583914.43	2106031.54	0.50	-
14	595811.98	2118527.45	0.10	370.80
15	582527.00	2107361.00	0.38	214.10
16	580719.51	2099339.49	0.74	434.40
17	582201.05	2105127.89	0.14	594.22
18	579797.02	2105032.59	0.13	427.00
19	579562.32	2102984.08	1.15	684.20
20	583747.00	2103469.00	0.68	397.80
21	586512.61	2098570.20	0.21	379.30
22	577497.96	2096420.78	0.20	689.90
23	586400.28	2106148.19	0.21	391.10

A partir de estos datos se generaron dos mapas de isoperiodos, uno con datos de los periodos sísmicos y otra de los valores de Vs30.

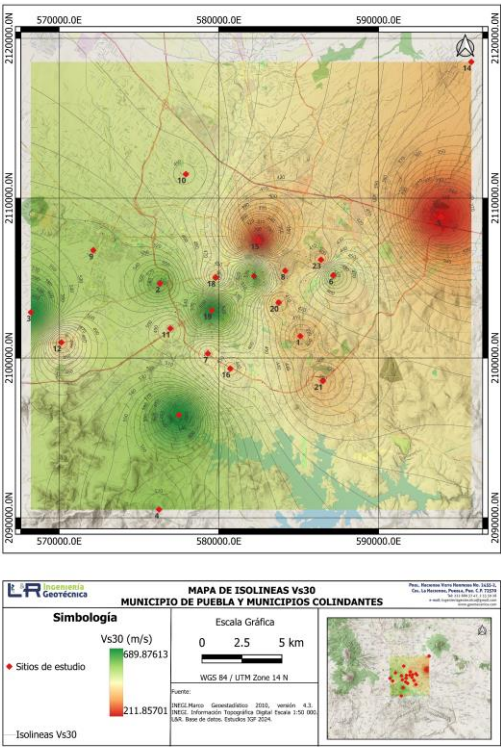


Figura 4. Mapa de Isolíneas de Vs30

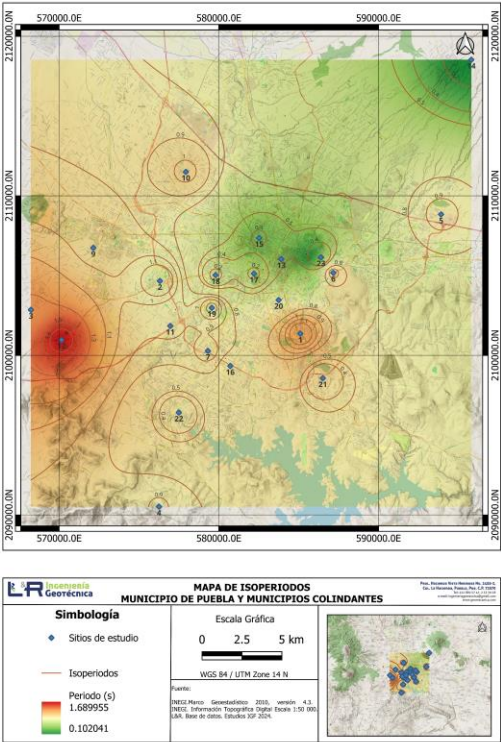


Figura 5. Mapa de Isoperiodos sísmicos.

En la Figura 4 se muestra la distribución de los valores de Vs30 resultado de lecturas del método SPAC, según esta distribución tienen un incremento hacia el centro del área de estudio y al oeste del área de estudio.

En la Figura 5 se muestra la distribución de los valores obtenidos de los periodos sísmicos a través de las lecturas obtenidas de VA y de su procesamiento, los valores más bajos se concentran en la parte central de la zona de estudio, mientras que los valores más altos se encuentran en la zona sureste y suroeste.

Estos resultados difieren en algunas zonas con respecto a su litología, esto puede ser debido a la baja densidad de punto muestreados, sin embargo se pueden identificar algunas tendencias en general en los mapas resultados, tal es el caso en el centro, valores que indican menores periodos de vibración y lecturas de Vs30 altas a comparación de las demás zonas lo cual podría ayudar a factores de riesgo por sismos, en comparación al oeste de la zona de estudio según los resultados se tiene periodos sísmicos poco más altos y lecturas de Vs30 medianamente bajos, estos resultados pueden ser debido a depósitos de suelos de origen volcánico situados superficialmente.

Este trabajo es el resultado de la primera etapa de adquisición y procesamiento de datos, claro está en los resultados la falta de toma de datos en más puntos distribuidos en toda la zona de estudio. Posteriormente y/o durante la publicación de este trabajo se está realizando la adquisición de más datos distribuidos en la zona de estudio y el procesamiento de los datos para la obtención de mejores resultados.

8. REFERENCIAS

- Aguilar A. et al. (2014). El down hole aplicado en la caracterización dinámica de suelos del centro histórico de la Ciudad de Puebla. Recuperado de: http://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/19_XXVII_Reunion_Nacional_de_Ingenieria_Geotecnica/36_Reunion_Nacional/79_INGENIERIA_GEOTECNICA_SISMICA/A6AGMA_1.docx
- Aguilar A. et al. (2015). Determinación de los periodos dominantes del suelo para algunos sitios de la Ciudad de Puebla. Sitio web: http://congresos.cio.mx/memorias_congreso_mujer/archivos/extensos/sesion4/S4-ING33.pdf
- Aguirre G. et al. (1998). El Cinturón Volcánico Mexicano: Un proyecto multidisciplinario. Unión Geofísica Mexicana. Recuperado de <https://ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos98-2/cinturon-18-2.pdf>
- Azomoza, G., Vera, A., & Reye, L. (S/A). Zonificación geotécnica para el área urbana del valle de Puebla. Puebla.
- CENAPRED, (2019) Atlas nacional de riesgos. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/>. México
- CFE, (2015) Manual de diseño de obras civiles, Diseño por sismo, PRODISIS. México.
- Ferrer, H. (2000) Revisión de las propuestas de microzonificación sísmica para la Ciudad de Puebla.
- INEGI. (2010). Compendio de información geográfica municipal 2010, Puebla, Puebla. Compendio de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, 2-12.
- Juarez, J. (2010) Vulnerabilidad estructural en la unidad habitacional villa frontera en la Ciudad de Puebla, Sociedad mexicana de ingeniera estructural. pag 3. Puebla, México.
- Lesser, Florencia & Astorga, & Sastre, & Molina, Germán & Orosco, Lia & Nievas, & Viramonte, José. (2017). Determinación del Parámetro VS30 para la Ciudad de Salta Aplicando el Método MAM.
- López, V. (11 de Julio de 2019). MILENIO. Obtenido de Puebla, en proceso de colapso urbano por crecimiento poblacional: <https://www.milenio.com/politica/comunidad/puebla-en-proceso-de-colapsourbano-por-crecimiento-poblacional>
- Murillo, D. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de mapas de ruido en entornos urbanos. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4694125.pdf>
- Periódico Oficial del Estado de Puebla (2017) Normas técnicas para diseño y construcción de cimentaciones, complementarias del libro tercero capítulo 17 del código reglamentario para el municipio de Puebla, Duodécima Sección, pag 32. Puebla, México.
- Ontiveros, M. A. (2017). Comportamiento dinámico de los suelos de Ciudad Universitaria Puebla, Pue. BUAP. Recuperado de: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/handle/20.500.12371/657>
- Rodríguez, R. (2013). Sismología y ondas sísmicas. Recuperado de <https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/geologia/sismica.htm>
- Torres, L. (2012). Efectos de sitio observados en estaciones acelerográficas de la ciudad de Puebla. Recuperado de <http://132.248.52.100:880/xmlui/handle/132.248.52.100/507>
- UNAM-SSN. (2002). Mapa de Peligrosidad Sísmica en México. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo: Peligrosidad_s%C3%ADsmica_en_M%C3%A9xico.jpg
- Zafra, D. (2017). ONDAS SÍSMICAS, su importancia para la geofísica y la humanidad. México.