

Ing. Paola Liliana
Sánchez López

Relaciones de atenuación por trayectorias para
la aceleración máxima de sismos interplaca en
la Ciudad de Querétaro

2026



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

**“RELACIONES DE ATENUACIÓN POR TRAYECTORIAS
PARA LA ACELERACIÓN MÁXIMA DE SISMOS
INTERPLACA EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO”**

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestra en Ciencias (Estructuras)

Presenta

Ing. Paola Liliana Sánchez López

Dirigido por:

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Co-Director:

Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto

Querétaro, Qro. Junio de 2026

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Relaciones de atenuación por trayectorias para la aceleración
máxima de sismos interplaca en la Ciudad de Querétaro

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestra en Ciencias (Estructuras)

Presenta
Ing. Paola Liliana Sánchez López

Dirigido por:
Dr. Luis Francisco Pérez Moreno

Co-dirigido por:
Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Presidente

Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto
Secretario

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Vocal

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Suplente

Dr. Iván Fermín Arjona Catzim
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Junio, 2026
México

DEDICATORIA

A mi pequeño César Antonio. Desde que llegaste a mi vida, has sido la razón que da sentido a cada uno de mis logros. Dedico esta tesis a ti, con la esperanza de que algún día te sientas orgulloso de saber que fuiste la inspiración más grande de este proyecto.

Recuerda que todas las metas son posibles cuando se trabaja con esfuerzo, disciplina y amor.

Con todo mi amor, hoy y siempre
Mamá

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro, así como a la Facultad de Ingeniería, por brindarme las herramientas necesarias para concluir este trabajo de investigación.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca recibida durante el programa de la Maestría.

Los registros sismológicos fueron suministrados por el Servicio Sismológico Nacional (México); se reconoce la labor de su personal en el mantenimiento de las estaciones y en la adquisición y distribución de los datos.

Al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra “Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), por el equipo proporcionado para la instalación de la estación sísmica temporal UAQ-CH para realizar este trabajo de tesis.

Al proyecto CONACYT-299766 y la Red de Monitoreo Acelerográfico de Querétaro del Instituto de Geociencias de la UNAM (RedMAQ).

A mi asesor de tesis, Dr. Luis Francisco Pérez Moreno, por su gran apoyo en el desarrollo y conclusión de este trabajo de investigación.

A mis sinodales: Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto, Dr. Miguel Ángel Pérez Lara, Dr. Jaime Moisés Horta Rangel y Dr. Iván Fermín Arjona Catzim por sus observaciones para lograr un mejor desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Alejandro Clemente Chávez, por su colaboración al inicio de este trabajo de investigación.

Al M. en C. Carlos Rivas por su apoyo con la instalación de la estación sísmica en el centro histórico de Querétaro.

A mi familia, por su amor incondicional, su paciencia y el acompañamiento que me brindaron en cada paso de mi desarrollo personal y profesional. Su confianza y palabras de aliento fueron una fuente constante de motivación para culminar este proyecto.

A Sebastián Fuentes, mi más sincero agradecimiento por el tiempo, la paciencia y generosidad con la que compartiste tus conocimientos conmigo a lo largo de este proceso. Gracias también por el libro de estadística que me obsequiaste, un detalle que siempre recordaré. Valoro enormemente tu amistad, el apoyo y la motivación que me brindaste durante esta etapa.

A mis compañeros y amigos Cristian Ramírez, Ranchy Dean, Francisco, Obed, Daniel, Adair y Ricardo gracias por las horas de estudio, experiencias compartidas y el compañerismo que hicieron de este camino una etapa de aprendizaje tanto académico como personal.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE GENERAL.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema	3
1.2. Justificación	4
2. ANTECEDENTES	7
2.1. Sismicidad en México	7
2.1.1. Regionalización Sismotectónica	7
2.1.2. Sismotectónica del centro de México	9
2.1.3. Sismos interplaca	10
2.2. Respuesta de sitio.....	11
2.2.1. Zona de estudio	11
2.2.2. Amplificación de la respuesta en la Faja Volcánica Transmexicana	12
2.3. Atenuación sísmica	14
2.3.1. Expansión geométrica del frente de onda	14
2.3.2. Absorción anelástica	15

2.3.3. Esparcimiento o scattering	17
2.3.4. Evaluación de la atenuación sísmica.....	18
2.4. Relaciones de atenuación en México	20
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	24
3.1. Hipótesis	24
3.2. Objetivo general.....	24
3.3. Objetivos específicos	24
4. METODOLOGÍA	25
4.1. Identificación de la dirección de las trayectorias	26
4.1.1. Identificación de estaciones sismológicas alineadas con la zona de estudio	26
4.1.2. Clasificación del emplazamiento de las estaciones sismológicas ...	29
4.2. Determinación de los valores de aceleración máxima	30
4.2.1. Obtención de una base de datos de sismos interplaca.....	30
4.2.2. Obtención de base de datos de registros instrumentales	32
4.2.3. Revisión y procesamiento de registros instrumentales	33
4.3. Obtención de las relaciones de atenuación	34
4.3.1. Elección de la forma funcional y método de regresión.....	34
4.3.2. Análisis de regresión	35
4.4. Evaluación de la bondad de ajuste	39
4.4.1. Observación de la discrepancia entre los valores predichos y observados.....	39
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
5.1. Identificación de la dirección de las trayectorias	42

5.2.	Determinación de los valores de aceleración máxima	44
5.3.	Obtención de las relaciones de atenuación.....	47
5.4.	Evaluación de la bondad de ajuste	48
5.4.1	Análisis de los residuos	50
5.5.	Comparación con otros modelos.....	53
5.5.1.	Trayectoria Jalisco/Colima – Querétaro	54
5.5.2.	Trayectoria Michoacán – Querétaro	57
5.5.3.	Trayectoria Guerrero – Querétaro	59
5.5.4.	Trayectoria Oaxaca – Querétaro.....	62
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
7.	BIBLIOGRAFÍA	66
ANEXO A. GRÁFICAS HVSR Y FRECUENCIAS FUNDAMENTALES		
	DE SITIO	73
ANEXO B. ACELERACIONES MÁXIMAS DEL TERRENO		76

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 4.1 ESTACIONES DEL ESTADO DE QUERÉTARO	29
TABLA 4.2. TIPOS DE FALLAS QUE CORRESPONDEN A LOS MECANISMOS FOCALES SEGÚN EL ÁNGULO DE DESLIZAMIENTO (MILLER, 2014)	31
TABLA 5.1 SISMOS EMPLEADOS PARA LA TRAYECTORIA JALISCO/COLIMA- QUERÉTARO	44
TABLA 5.2 SISMOS PARA LA TRAYECTORIA MICHOACÁN- QUERÉTARO	45
TABLA 5.3 SISMOS PARA LA TRAYECTORIA GUERRERO- QUERÉTARO	45
TABLA 5.4 SISMOS PARA LA TRAYECTORIA GUERRERO- QUERÉTARO (CONTINUACIÓN).....	46
TABLA 5.5 SISMOS PARA LA TRAYECTORIA OAXACA- QUERÉTARO	46
TABLA 5.6 COEFICIENTES PARA LA TRAYECTORIA JALISCO/COLIMA- QUERÉTARO	47
TABLA 5.7 COEFICIENTES PARA LA TRAYECTORIA MICHOACÁN- QUERÉTARO	47
TABLA 5.8 COEFICIENTES PARA LA TRAYECTORIA GUERRERO- QUERÉTARO.....	47
TABLA 5.9 COEFICIENTES PARA LA TRAYECTORIA OAXACA- QUERÉTARO	48
TABLA 5.10 RESULTADO DE LA PRUEBA Ji- CUADRADA	49
TABLA 5.11 RESULTADOS DE LA PRUEBA Ji- CUADRADA.	50
TABLA 5.12 ACELERACIONES MÁXIMAS, PGA, PARA LA TRAYECTORIA JALISCO/COLIMA – QUERÉTARO.	54
TABLA 5.13 COMPARACIÓN DE ACELERACIÓN MÁXIMA (PGA) PARA LA TRAYECTORIA MICHOACÁN – QUERÉTARO.	57
TABLA 5.14 COMPARACIÓN DE ACELERACIÓN MÁXIMA (PGA) PARA LA TRAYECTORIA GUERRERO – QUERÉTARO.....	59
TABLA 5.15 COMPARACIÓN DE ACELERACIÓN MÁXIMA (PGA) PARA LA TRAYECTORIA OAXACA – QUERÉTARO.	62
TABLA A.1 ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE SITIO DE LAS ESTACIONES SÍSMICAS..	75

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 LOCALIZACIÓN DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA (TOMADO DE GÓMEZ-TUENA ET AL., 2005).....	2
FIGURA 1.2. EPICENTROS DE SISMOS EN MÉXICO (SSN, 2026A).....	4
FIGURA 1.3. IMAGEN SATELITAL DE LA LUMINOSIDAD QUE INDICA LA DENSIDAD POBLACIONAL EN MÉXICO (EARTH, 2026).	5
FIGURA 2.1 REGIONES DE SISMICIDAD SUPERFICIAL ($H \leq 40$ KM) (ZÚÑIGA ET AL., 2017).	8
FIGURA 2.2 REGIONES DE SISMICIDAD CON PROFUNDIDAD INTERMEDIA ($H > 40$ KM) (ZÚÑIGA ET AL., 2017).....	8
FIGURA 2.3. TECTÓNICA DE LA REPÚBLICA MEXICANA (SSN, 2022B)	10
FIGURA 2.4. ZONAS DE RUPTURA DE GRANDES SISMOS EN MÉXICO (KOSTOGLODOV Y PACHECO, 1999)	11
FIGURA 2.5. UBICACIÓN LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA (IMAGEN MODIFICADA DE GÓMEZ-TUENA ET AL., 2005).	12
FIGURA 2.6. PARÁMETROS ASOCIADOS A UN SISMOGRAMA (TOMADO DE PÉREZ, 2000).	17
FIGURA 4.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA.	25
FIGURA 4.2. RED PERMANENTE DE BANDA ANCHA DEL SERVICIO SISMOLÓGICO NACIONAL (SSN, 2026C).....	27
FIGURA 4.3 ESTACIÓN UAQ- CH. A) UBICACIÓN GEOGRÁFICA, B) Y C) INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN.	28
FIGURA 4.4. A) ANTES Y DESPUÉS DEL DESPLAZAMIENTO DE BLOQUES DURANTE UN TERREMOTO; C) DEFINICIÓN DE ÁNGULOS DE CABECEO, BUZAMIENTO Y RUMBO (OKAL, 2021).	32
FIGURA 4.5. SEÑAL SÍSMICA CON RELACIÓN $S/R > 2$	33
FIGURA 5.1 TRAYECTORIA JALISCO- QUERÉTARO	42
FIGURA 5.2 TRAYECTORIA MICHOACÁN- QUERÉTARO	43

FIGURA 5.3 TRAYECTORIA GUERRERO- QUERÉTARO.....	43
FIGURA 5.4 TRAYECTORIA OAXACA- QUERÉTARO	44
FIGURA 5.5 EVALUACIÓN DE RESIDUOS PARA LA TRAYECTORIA JALISCO/COLIMA – QUERÉTARO.	51
FIGURA 5.6 EVALUACIÓN DE RESIDUOS PARA LA TRAYECTORIA MICHOACÁN – QUERÉTARO.	51
FIGURA 5.7 EVALUACIÓN DE RESIDUOS PARA LA TRAYECTORIA GUERRERO – QUERÉTARO.	52
FIGURA 5.8 EVALUACIÓN DE RESIDUOS PARA LA TRAYECTORIA OAXACA – QUERÉTARO.	52
FIGURA 5.9 COMPARACIÓN DE MODELOS PARA LA TRAYECTORIA JALISCO/COLIMA- QUERÉTARO.	56
FIGURA 5.10 COMPARACIÓN DE MODELOS PARA LA TRAYECTORIA MICHOACÁN- QUERÉTARO.	58
FIGURA 5.11 COMPARACIÓN DE MODELOS PARA LA TRAYECTORIA GUERRERO- QUERÉTARO.	61
FIGURA 5.12 COMPARACIÓN DE MODELOS PARA LA TRAYECTORIA OAXACA- QUERÉTARO.	63

RESUMEN

La mayoría de los epicentros de los sismos que ocurren en México se concentran principalmente en la zona de subducción del océano Pacífico, específicamente en los estados de Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Jalisco, Michoacán y Colima (SSN, 2024a). Por la forma en la que se originan, estos sismos son clasificados como interplaca e históricamente han producido cuantiosas pérdidas humanas y materiales en la vecindad del área epicentral y en la Faja Volcánica Transmexicana, FVTM, destacando los efectos observados en la Ciudad de México. A pesar de esto, la mayoría de los estados que se encuentran ubicados en la FVTM, como Querétaro, no cuentan con un reglamento de diseño sismorresistente propio, lo que trae como consecuencia que en el proceso de diseño estructural de las construcciones no se consideren adecuadamente algunas variables específicas asociadas a características regionales. Para el diseño sísmico de una estructura se adoptan máximos absolutos de aceleración del movimiento del terreno, los cuales se pueden estimar a través de relaciones de atenuación (García, 2001). El objetivo de esta investigación fue obtener relaciones de atenuación para la aceleración máxima del terreno en Querétaro a partir de registros instrumentales de sismos interplaca considerando cuatro trayectorias que tuvieron como origen los estados de Colima, Jalisco, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Las relaciones de atenuación obtenidas permiten estimar la aceleración máxima del terreno (PGA) en Querétaro, con factores de sobreestimación de 1.44 a 2.04, además conocer la atenuación que se presenta e intensidad con la que se percibe el sismo. Este tipo de información es básica para estudios futuros que tengan como objetivo delimitar el peligro sísmico en la FVTM.

(Palabras clave: Sismos interplaca, relaciones de atenuación, Faja Volcánica Transmexicana)

ABSTRACT

Most of the epicenters of the earthquakes that occur in Mexico are mainly concentrated in the subduction zone of the Pacific Ocean, specifically in the states of Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Jalisco, Michoacán and Colima (SSN, 2024a). Due to the way in which they originate, these earthquakes are classified as interplate and have historically produced considerable human and material losses in the vicinity of the epicentral area and in the Trans-Mexican Volcanic Belt, FVTM, highlighting the effects observed in Mexico City. Despite this, most of the states that are located in the FVTM, such as Querétaro, do not have their own earthquake-resistant design regulations, which has the consequence that they are not adequately considered in the structural design process of buildings some specific variables associated with regional characteristics. For the seismic design of a structure, absolute maximum acceleration of the ground movement is adopted, which can be estimated through attenuation relations (García, 2001). The objective of this research was to obtain attenuation relations for the maximum ground acceleration in Querétaro from instrumental records of interplate earthquakes considering four trajectories that originated in the states of Colima, Jalisco, Michoacán, Guerrero and Oaxaca. The attenuation relations obtained allow us to estimate the maximum ground acceleration, PGA, in Querétaro, with overestimation factors of 1.44 to 2.04, as well as knowing the attenuation that occurs and the intensity with which the earthquake is perceived. This type of information is basic for future studies that aim to delimit the seismic hazard in the FVTM.

(Keywords: interplate earthquakes, attenuation relations, seismic hazard, Trans-Mexican Volcanic Belt)

1. INTRODUCCIÓN

Las relaciones de atenuación sísmica son funciones empíricas que permiten estimar el movimiento del terreno en términos del desplazamiento, velocidad o aceleración, al representarlo matemáticamente en función de variables características de un evento sísmico asociadas a la fuente, el medio de propagación y la respuesta de sitio. Estas relaciones se obtienen a partir de registros instrumentales en una determinada zona y su análisis es un aspecto fundamental en los estudios de amenaza sísmica, tanto deterministas como probabilistas (CFE, 2015; Ordoñez Sacapi y Salazar Riera, 2023).

La aceleración máxima del terreno, *Peak Ground Acceleration*, PGA por sus siglas en inglés, es una de las variables dependientes comúnmente empleadas en estas ecuaciones y sus unidades suelen mostrarse en cm/s^2 . La variable PGA es utilizada para describir la intensidad y el daño provocado por un sismo en un lugar específico, dado que las fuerzas inerciales dependen directamente de la aceleración (de la Blanca et al., 2012).

Los epicentros de los eventos sísmicos examinados en esta investigación se concentran en la zona de subducción del océano Pacífico. Este tipo de sismos son conocidos como interplaca y en México están asociados directamente con el contacto de las placas oceánicas de Cocos y de Rivera con la Norteamericana y del Caribe (Servicio Geológico Mexicano, 2017). Históricamente estos eventos han producido cuantiosas pérdidas humanas y materiales en la vecindad del área epicentral y en la Faja Volcánica Transmexicana, FVTM, destacando los efectos observados en la Ciudad de México.

La Faja Volcánica Transmexicana, también denominada Eje Neovolcánico Mexicano o Cinturón Volcánico Mexicano, constituye una provincia geológica situada en el centro del país, cuya extensión abarca de Oeste a Este, desde Nayarit hasta Veracruz. En esta provincia geológica se ubican diversas ciudades que en años recientes han experimentado un notable desarrollo industrial y demográfico (INEGI, 2020) entre las cuales se encuentra la Ciudad de Querétaro (Figura 1.1).

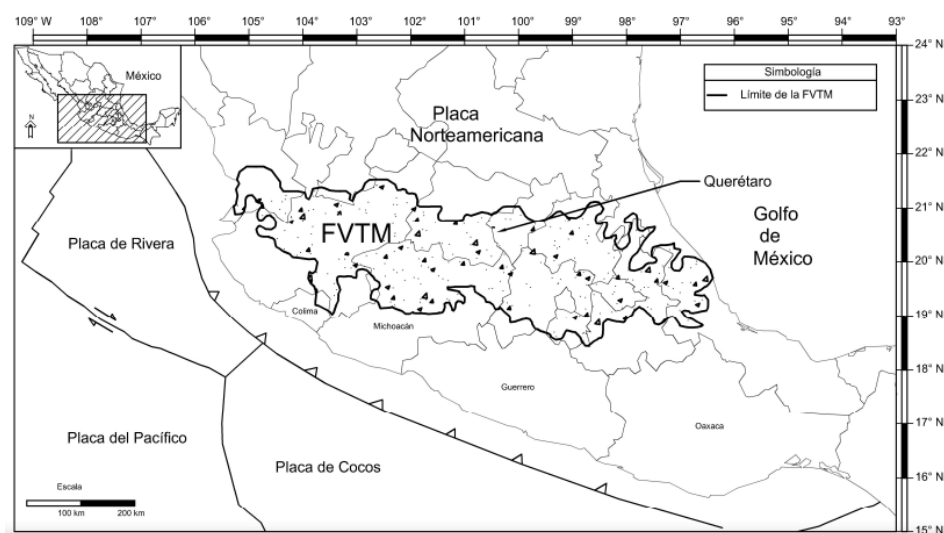


Figura 1.1 Localización de la Faja Volcánica Transmexicana (tomado de Gómez-Tuena et al., 2005).

En la literatura pueden encontrarse algunos trabajos que se han realizado en México para obtener relaciones de atenuación de la aceleración máxima para sismos interplaca a lo largo de la zona de subducción y hacia la parte central del país (por ejemplo: Ordaz et al., 1989; García, 2006; Arroyo et al., 2010, 2016; Clemente et al., 2012). Asimismo, hay investigaciones en las que se ha estudiado la amplificación en la FVTM de las ondas sísmicas provenientes de los estados de Guerrero, Colima y Oaxaca (Shapiro et al., 1997; Cruz-Jiménez et al., 2009; Clemente-Chávez y Figueroa-Soto, 2018).

En esta investigación se obtuvieron cuatro relaciones de atenuación para la aceleración máxima del terreno, las cuales fueron formuladas mediante el análisis de registros instrumentales en trayectorias desde la zona de subducción del Pacífico hacia la ciudad de Querétaro.

A continuación, se presentan la descripción del problema y la justificación. En el capítulo 2 se realiza una revisión del estado del arte y se abordan algunos fundamentos teóricos sobre la atenuación sísmica. Después, en el capítulo 3, se muestran la hipótesis y los objetivos de la investigación.

Posteriormente, en los capítulos 4 y 5, se describe la metodología planteada a partir de los objetivos específicos y se discuten los resultados obtenidos, respectivamente. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan algunas conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

1.1. Descripción del problema

Al emitir normas de edificación, el Estado Mexicano busca garantizar la seguridad y las condiciones de servicio de las edificaciones. Cada municipio es encargado de producir sus propios reglamentos de construcción, sin embargo, muchos no cuentan con ellos, por lo que emplean los criterios de las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México o del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad.

No obstante, la utilización de estas normas o manuales no está establecida como obligatoria, lo cual ha creado un vacío legal en gran parte del país (Pérez-Gavilán et al., 2018). Además, el haber adoptado criterios de normativas emitidas específicamente para otra zona, trae como consecuencia la construcción de obras civiles en cuyo diseño no se consideran adecuadamente las condiciones locales del sitio, lo cual podría traducirse en sub o sobredimensionamiento de las estructuras.

Actualmente, el estudio de la atenuación sísmica ha pasado a ser un tema de gran interés en la prevención de daños (Pérez-Moreno, et al., 2018; Jaimes y García-Soto, 2020; Samaniego et al., 2020; López-Castañeda y Reinoso, 2021; Ordaz et al., 2021). Comprender cómo la intensidad sísmica disminuye con la distancia desde el epicentro, a qué frecuencias disminuye y cómo se relaciona con la estructura del medio a través del cual se propagan las ondas, son aspectos fundamentales para los estudios de peligro sísmico destinados a minimizar los daños humanos y materiales causados por sismos (García, 2001).

Por lo mencionado anteriormente, en este trabajo se realizaron análisis de regresión para obtener relaciones de atenuación que permitan estimar las aceleraciones máximas del terreno en la ciudad de Querétaro por medio de trayectorias desde la zona de subducción del océano

Pacífico. Se espera que las ecuaciones obtenidas contribuyan a delimitar el peligro sísmico de las estructuras construidas en esta región.

1.2. Justificación

Garantizar viviendas adecuadas y seguras es una de las prioridades establecidas en los 10 ejes que integran los Programas Nacionales Estratégicos, PRONACES, impulsados por SECIHTI. Estos ejes a su vez se encuentran alineados con la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas, ONU. Las metas del objetivo 11 “Ciudades y Comunidades Sostenibles” de la Agenda 2030 justifican el aumento de asentamientos humanos resilientes ante desastres naturales, como los sismos, para reducir el número de muertes y pérdidas económicas derivadas de estos fenómenos.

Durante 2025, el Servicio Sismológico Nacional reportó 39 871 sismos en México, cuyos epicentros se concentraron principalmente en los estados de la región del Golfo de California, Oaxaca, Chiapas, Guerrero, Michoacán, Jalisco, Colima y Veracruz (Figura 1.2) (SSN, 2026a).

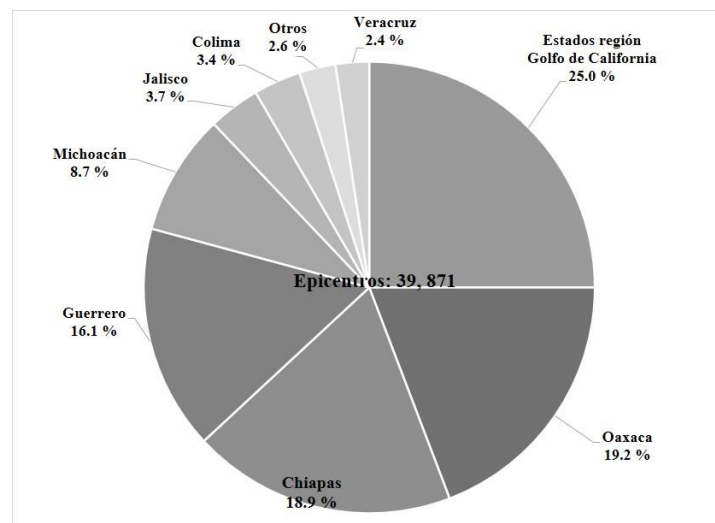


Figura 1.2. Epicentros de sismos en México (SSN, 2026a)

La Faja Volcánica Transmexicana es quizá la región de México que recibe mayor interés en los estudios geológicos y geofísicos. Esto se considera ampliamente justificado por ser una

región tectónicamente activa que también alberga a gran parte de la población e infraestructura de México (Gómez-Tuena et al., 2005), situación que puede ser apreciada con facilidad por la iluminación de las grandes ciudades (Figura 1.3).



Figura 1.3. Imagen satelital de la luminosidad que indica la densidad poblacional en México (Earth, 2026).

Existen algunos trabajos que exponen de forma general diferencias de atenuación hacia la zona central y a lo largo de la zona de subducción (Cruz-Jiménez et al., 2009; García, 2006). Sin embargo, se han omitido datos sísmicos dentro de la Faja Volcánica Transmexicana o bien, se han hecho simulaciones numéricas, así como estudios particulares de una sola trayectoria con una cantidad limitada de datos (Clemente et al., 2012), por lo que al momento se desconocen cuantitativamente las discrepancias que se pueden presentar entre los valores probables de aceleración máxima dentro de la FVTM y en particular para la Ciudad de Querétaro.

Contar con relaciones de atenuación para la aceleración máxima del terreno, actualizadas con datos locales, puede ser de gran utilidad en estudios de peligro sísmico y para la emisión de códigos de diseño sismorresistente. En conjunto con otros factores como la duración, amplitud y contenido de frecuencias, los valores de aceleración máxima obtenidos con las relaciones de atenuación pueden utilizarse para estimar el daño que podrían presentar las

construcciones ante estos eventos, debido a que las fuerzas inerciales se encuentran en función de la aceleración (Clemente et al., 2012). Además, esta variable se puede emplear como indicador de la intensidad sísmica y para escalar espectros de respuesta, para integrarlos en el reglamento de construcción local.

2. ANTECEDENTES

2.1. Sismicidad en México

2.1.1. Regionalización Sismotectónica

- **Regiones de la Zona de Subducción**

Comprenden zonas de acoplamiento sismogénico de eventos someros (profundidad focal < 40 km), debido al proceso de subducción de las placas Rivera (RIV) y Cocos (COC) bajo las placas Norteamericana (NOAM) y del Caribe (CAR). Se subdivide en las siguientes regiones (Figura 2.1) (Zúñiga et al., 2017):

- a) SUB1 (Jalisco- Colima): Subducción de la placa RIV bajo la NOAM, sismos poco frecuentes. Tiempo de recurrencia estimada para sismos con Mw mayor a 7.5 de 54 años.
- b) SUB2 (Colima- Guerrero): Subducción de la placa COC bajo la NOAM, alta frecuencia sísmica. Tiempo de recurrencia estimada para sismos con Mw igual o mayor a 7.5 de 47 años.
- c) SUB3 (Oaxaca): Subducción de la placa COC bajo la NOAM, transicional. Tiempo de recurrencia para sismos con Mw mayor o igual a 7.5 es de 37 años.
- d) SUB4 (Chiapas): Subducción de la placa COC bajo la CAR. Tiempo de recurrencia estimada para sismos con Mw mayor o igual a 7.5 es de 36 años.

- **Regiones de Profundidad Intermedia**

Corresponden a eventos intraplaca que ocurren dentro de la placa de Cocos subducida, a profundidades entre 40 y 460 km. Se subdividen en tres regiones (Figura 2.2) (Zúñiga et al., 2017):

- e) IN1 (Debajo de SUB1 y SUB2): Eventos sísmicos con profundidad entre 40 y 180 km. Tiempo de recurrencia estimada para sismos con Mw igual a 7 de 125

años.

- f) IN2 (Debajo de SUB3): Eventos sísmicos con profundidades entre 40 y 255 km.
Tiempo de recurrencia estimada de 109 años.
- g) IN3 (Debajo de SUB4): Eventos sísmicos con profundidades entre 40 y 460 km.
Tiempo de recurrencia estimada igual a 24 años.

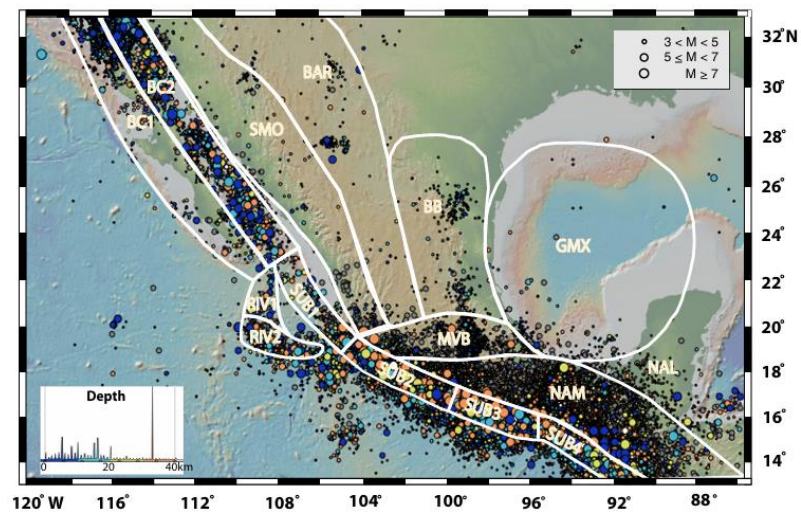


Figura 2.1 Regiones de sismicidad superficial ($h \leq 40$ km) (Zúñiga et al., 2017).

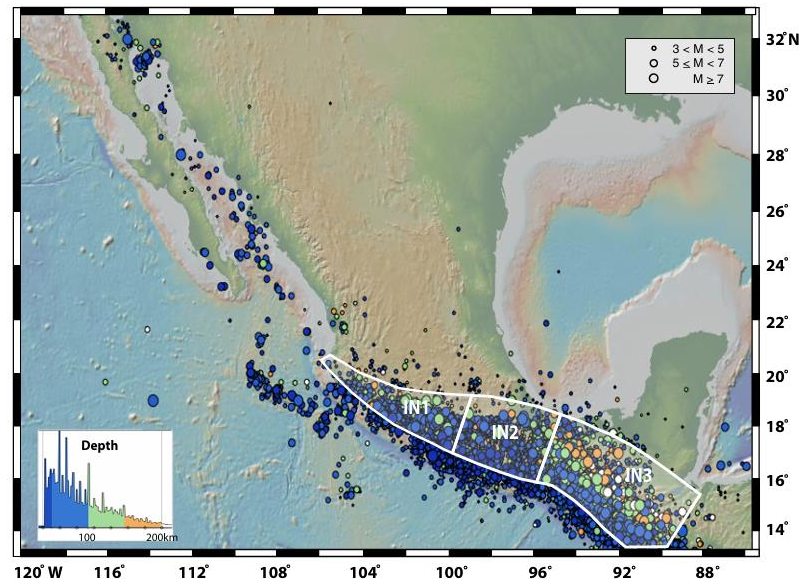


Figura 2.2 Regiones de sismicidad con profundidad intermedia ($h > 40$ km) (Zúñiga et al., 2017)

- Regiones Corticales

Corresponden a eventos superficiales que ocurren dentro de la corteza terrestre, (Zúñiga et al., 2017):

- h) Cinturón Volcánico Mexicano (MVB): Eventos sísmicos someros con profundidades menores a 20 km. Tiempo de recurrencia estimada de 60 años.
- i) Sureste de México (NAM): Sismos con profundidades menores a 20 km. Tiempo de recurrencia estimada de 6 años.
- j) Baja California Oeste (BC1): Mecanismo de fallamiento normal. Recurrencia estimada de 16 años. Sismos con profundidad somera, menor a 20 km.
- k) Golfo de California (BC2): Mecanismo de falla lateral y normal. Recurrencia estimada de 5 años. Sismos con profundidad somera, menor a 15 km.
- l) Sierra Madre Occidental y regiones del norte (SMO, BAR, BB): Eventos intraplaca de menor sismicidad. Profundidad somera, menor a 20 km.
- m) RIV1: Zona delimitada por sismos interplaca de profundidad somera, menor a 20 km, asociados a la interfaz entre las placas Pacífico y Rivera. Predomina un mecanismo de falla normal.
- n) RIV2: Zona delimitada por sismos de profundidad somera, menor a 20 km, localizados en la interfaz entre las placas Pacífico y Rivera, cuyo mecanismo focal corresponde mayoritariamente a fallas de rumbo.
- o) Golfo de México (GMX): Actividad sísmica poco frecuente. Sismos de profundidad somera, menor a 20 km.
- p) Península de Yucatán (NAL): Muy baja sismicidad. Sismos de profundidad somera, menor a 20 km.

2.1.2. Sismotectónica del centro de México

La geología estructural del centro de México se distingue por la subducción de las placas de Cocos y de Rivera bajo la placa Norteamericana (Figura 2.3). Los procesos de subducción

que ocurren en la costa occidental son responsables de la diversidad geológica de la región y de la presencia de un cinturón volcánico activo (Ferrari, 2000).

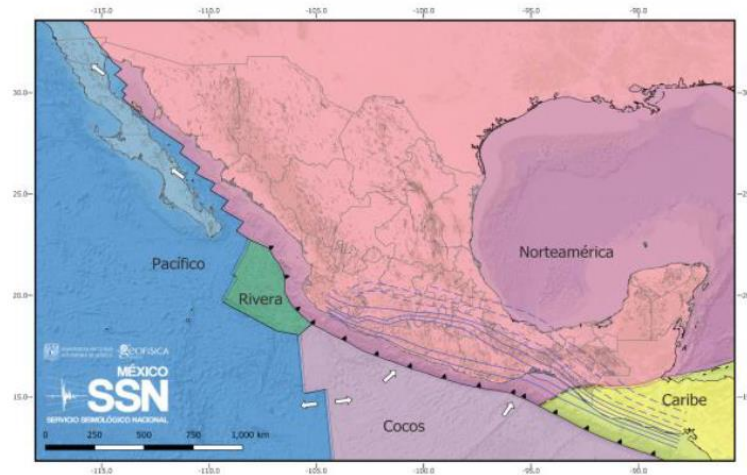


Figura 2.3. Tectónica de la República Mexicana (SSN, 2022b)

2.1.3. Sismos interplaca

Los eventos sísmicos de tipo interplaca son los más frecuentes y de mayor magnitud. Son causados por la fricción en las áreas de contacto de placas tectónicas, por lo que se generan próximos a la costa a profundidades entre 5 a 35 km (Zúñiga, Suárez, Figueroa-Soto, 2017). Su mecanismo de falla es de compresión (mecanismos focales inversos) con planos de buzamiento somero.

Las longitudes de ruptura de los grandes sismos reportados en la zona de subducción varían de 50 a 250 km a lo largo de la costa (Kostoglodov y Pacheco, 1999) (Figura 2.4). La poca profundidad de estos promueve la formación de ondas superficiales que viajan en la dirección de convergencia de las placas, causando daños catastróficos a las cuencas sedimentarias del interior del país, como lo sucedido en la Ciudad de México en 1985 (García, 2001).

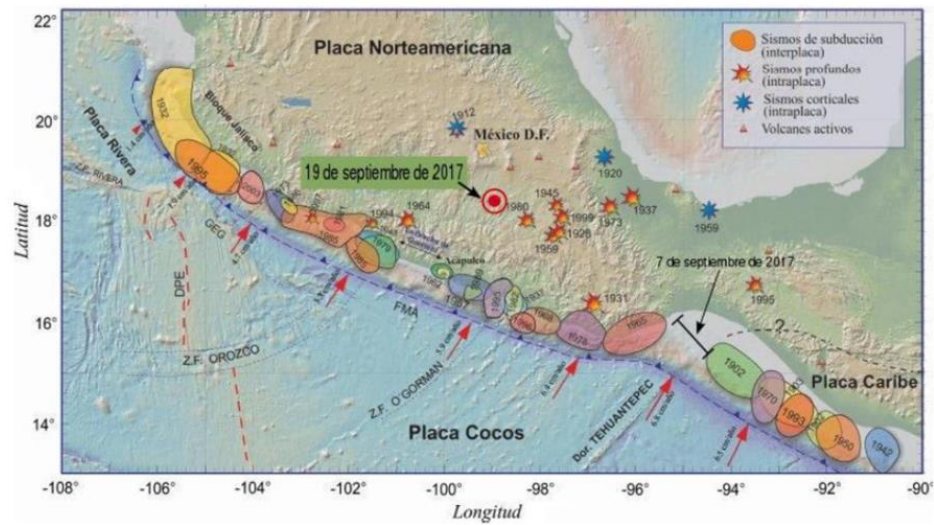


Figura 2.4. Zonas de ruptura de grandes sismos en México (Kostoglodov y Pacheco, 1999)

2.2. Respuesta de sitio

2.2.1. Zona de estudio

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), igualmente nombrada como Cinturón Volcánico Mexicano, Eje Volcánico Transversal, Sierra Volcánica Transversal o Cordillera Neovolcánica se distribuye por la región centro-sur de México, extendiéndose desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México (Figura 2.5), dando efecto a una de las geologías estructurales más complejas de la Tierra (Gómez-Tuena et al., 2005).

La FVTM se encuentra entre las latitudes 18°30' N y 21°30' N, tiene dimensiones aproximadas de 900 km de longitud y 130 km de anchura media, y una elevación promedio de 2500 m sobre el nivel del mar. Se extiende de oeste a este, desde Nayarit hasta Veracruz, e incluye a las entidades federativas de la Ciudad de México, Colima, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla, Querétaro y Tlaxcala. Limita al oeste con la Sierra Madre Occidental y con la Sierra Madre Sur y al este con el borde de la Sierra Madre Oriental (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

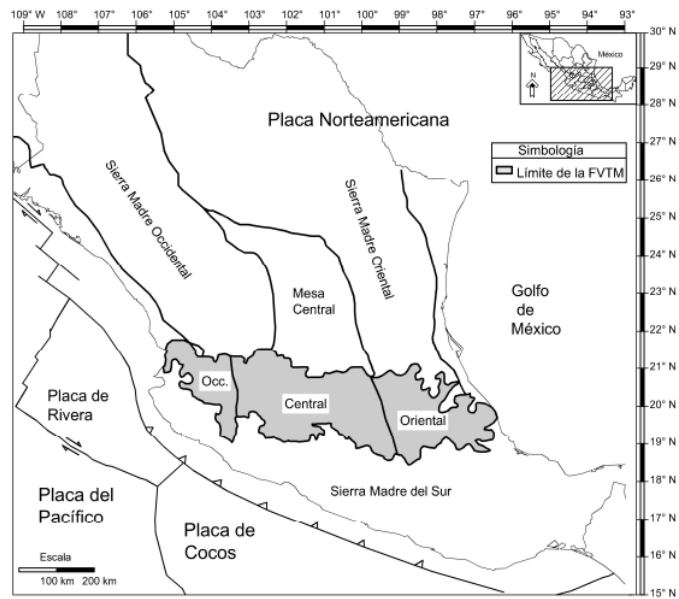


Figura 2.5. Ubicación la Faja Volcánica Transmexicana (Imagen modificada de Gómez-Tuena et al., 2005).

2.2.2. Amplificación de la respuesta en la Faja Volcánica Transmexicana

La amplificación de las ondas sísmicas provenientes de sismos costeros en la FVTM ha sido estudiada desde hace décadas, determinando que es causada por su estructura regional (Shapiro et al., 1997) y no por la geometría de la zona de subducción (Cruz-Jiménez et al., 2009).

Shapiro et al., (1997) se percataron de la existencia de una zona asociada con la región de vulcanismo activo de baja velocidad de onda S, 1.7 km/s, con una extensión N-S de 80 km y espesor de 2 km debajo de la parte sur del FVTM. La presencia de esta capa provoca una amplificación regional de las señales de periodo de 8 a 10 s, así como el aumento de la señal a causa de la distorsión de ondas superficiales.

Por otra parte, a través de simulaciones realizadas por Cruz-Jiménez et al., (2009), se explica que el efecto de la FVTM en Colima es visible a partir de los 50 km desde la fuente, las diferencias de amplitud relativa alcanzan un factor de 3 a una distancia epicentral de 125 km y decrecen a los 240 km. En cuanto al efecto de la FVTM en sismos provenientes de

Guerrero, se observa que para distancias epicentrales mayores a 240 km la amplitud aumenta, llegando a ser mayor que en Colima, sin embargo, no muestra una amplificación significativa en la FVTM.

Otros estudios han evaluado la respuesta de sitio dentro de la FVTM empleando la técnica HVSR, *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* (Havenith, 2004; Zavala et al., 2021), con datos de sismos regionales someros o ruido sísmico. Clemente-Chavez et al., (2014) emplearon esta metodología para clasificar en dos grupos las estaciones sismológicas ubicadas en esta zona, reportando como “factor de amplificación A_0 ” la ordenada correspondiente a la frecuencia fundamental de sitio. La respuesta de los sitios en los que $A_0 < 3$, se clasificó como “amplificación de sitio no significativa” y para aquellos en donde se observaron valores A_0 entre 4 y 6.5 como “amplificación de sitio significativa” (Clemente-Chavez et al., 2014). En el mismo estudio se reporta también que una cuarta parte del noreste de la FVTM presenta niveles bajos de amplificación.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que con la técnica HVSR solo es posible estimar la frecuencia fundamental de vibración f_0 y no es adecuada para evaluar la amplificación en el sitio, dado que las gráficas que se obtienen no pueden considerarse una aproximación precisa de la función de transferencia (Perron et al., 2018). Si bien es cierto que los picos en las gráficas proporcionan un indicio de la existencia de contrastes de impedancia, debido a la facilidad de aplicación de esta técnica algunos investigadores aceptan como cierta la suposición de que las gráficas HVSR son curvas de amplificación (Figueroa-Soto et al., 2025; Lermo y Chávez-García, 1993).

Pérez-Moreno et al., (2021) analizaron la respuesta de sitio en la FVTM a partir de registros de ruido ambiental y sismos regionales de 90 estaciones sísmicas permanentes y temporales ubicadas en la zona. Detectaron que el 46% de las estaciones presentó una respuesta plana, es decir, no se encontraron contrastes de impedancia significativos, por lo que fueron considerados sitios de roca dura. En el 36% de las estaciones analizadas, encontraron valores con frecuencia fundamental entre 1 y 10 Hz, incluso frecuencias inferiores a 1 Hz, lo cual es de gran interés dado la tendencia a construcciones altas.

Martínez-Rivera et al., (2022) estudiaron las variaciones de la respuesta de sitio en la Faja Volcánica Transmexicana con base en registros sísmicos y de ruido ambiental a través de mapas de contorno. De las 66 estaciones analizadas, detectaron que el 20% se encuentran sobre estrato rocoso mientras que el resto presenta contrastes de impedancia significativos. Estimaron que el periodo fundamental del suelo oscila en un rango de 0.06 y 3.87 s por lo que sugieren tener más precaución con el diseño de edificaciones cuyas alturas se encuentren entre 3 y 160 m.

2.3. Atenuación sísmica

La atenuación sísmica es la caída de la amplitud de las ondas sísmicas conforme aumenta la distancia hipocentral. Este fenómeno se origina, fundamentalmente, por la ocurrencia de tres mecanismos (Stein y Wyssession, 2003):

1. Expansión geométrica que sufre el frente de onda durante su propagación.
2. La absorción anelástica, conocida también como atenuación intrínseca.
3. Esparcimiento de la energía, denominado igualmente atenuación extrínseca.

La expansión geométrica y el esparcimiento son procesos elásticos, en los cuales se conserva la energía del campo de ondas de propagación. Mientras que la atenuación intrínseca implica la conversión de energía sísmica en calor. (Stein y Wyssession, 2003).

2.3.1. Expansión geométrica del frente de onda

Es el efecto más evidente que causa que las amplitudes de las ondas sísmicas varíen a medida que viajan por la tierra. Para una Tierra esférica, elástica y homogénea, se preserva la energía radiada por la fuente sísmica en forma de ondas. Por lo tanto, a medida que la onda sísmica se aleja de la fuente, la energía se distribuye sobre una superficie más grande y las amplitudes registradas disminuyen. De esta forma se establece que la expansión geométrica depende de la distancia y profundidad del hipocentro. (Stein y Wyssession., 2003).

Aki y Richards (1980) demostraron que para frentes de onda esféricos o planos, es decir,

ondas internas o de cuerpo, la dependencia de la amplitud de onda con la distancia hipocentral R es proporcional a $1/R$, en tanto que para un frente de onda esférico u ondas superficiales, la dependencia es proporcional a $1/\sqrt{R}$. Para medios heterogéneos, las conclusiones son más complejas, pero la idea básica es la misma.

2.3.2. Absorción anelástica

La Sismología se basa en la Mecánica de medios continuos, considerando que la Tierra es un medio elástico donde se propagan las ondas generadas por los sismos, los cuales se originan principalmente por los movimientos tectónicos relacionados con las fallas. (Tovar, 2019)

No obstante, como el comportamiento de la Tierra se parece más al de un medio viscoelástico, las ondas sísmicas experimentan una pérdida progresiva de amplitud conforme aumenta la distancia respecto a la fuente a causa de la inelasticidad del medio. En este contexto, una fracción de la energía elástica se convierte en calor a causa de la fricción entre partículas, mecanismo que recibe el nombre de absorción anelástica. Al tratarse de una característica intrínseca del medio de propagación, su magnitud depende directamente de las propiedades físicas del mismo, que a su vez se encuentran determinadas por las condiciones tectónicas y geológicas del lugar. (Anderson y Archambeau, 1964).

La absorción anelástica da como resultado amplitudes de ondas sísmicas más bajas que las predichas por la teoría de elasticidad, por lo que se introduce un término de atenuación $e^{-\gamma R}$ para incluir este efecto en el tratamiento teórico. El hecho de que este término tenga un exponente negativo se debe a la rápida redistribución de energía producida por la fricción interna (García, 2001).

Para representar matemáticamente el fenómeno de atenuación, se suelen emplear las siguientes variables dependientes de la frecuencia: Coeficiente de atenuación γ , decremento logarítmico δ y factor de calidad Q (Aki y Richards, 2002).

De acuerdo con Toksöz y Johnson (1981), el parámetro γ , denominado coeficiente de

atenuación, corresponde al decremento logarítmico, respecto a la distancia recorrida, que sufre la amplitud de una onda plana de tipo armónico durante su propagación en un medio homogéneo (Toksöz y Johnson, 1981).

$$\gamma = \frac{1}{R_1 R_2} * \left(\frac{A(R_1)}{A(R_2)} \right), \quad (1)$$

donde las variables R_1 y R_2 corresponden, respectivamente, a las distancias hipocentrales asociadas a dos puntos localizados sobre la trayectoria de propagación de las ondas generadas en la fuente, en tanto que $A(R_i)$ expresa la amplitud que la onda alcanza al recorrer la distancia R_i .

La dependencia de la amplitud de la onda con la distancia puede expresarse como:

$$A = A_0 e^{-\gamma R} \cos(\omega * t + \phi), \quad (2)$$

donde A_0 representa la amplitud máxima, ω la frecuencia, ϕ fase característica y $e^{-\gamma R}$ es la disminución con la distancia por efecto de los procesos anelásticos.

El decrecimiento logarítmico δ es definido por Toksöz y Johnson (1981) como:

$$\delta = \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right), \quad (3)$$

donde A_1 representa la amplitud que alcanza la onda en un tiempo dado t , mientras que A_2 se refiere a la amplitud del siguiente ciclo armónico, es decir, la correspondiente al instante $A_1 (t + T)$.

Por otra parte, el factor de calidad Q es una variable que expresa la correlación existente entre la energía elástica, E , y la fracción de energía redistribuida ΔE como consecuencia del fenómeno de absorción anelástica, considerando un ciclo de excitación armónica para la misma cantidad de material cuando es sometida a un esfuerzo elástico (García, 2001):

$$\frac{1}{Q(f)} = -\frac{\Delta E}{2\pi E}, \quad (4)$$

El factor Q , es el que representa menor dependencia de la frecuencia. Aunque Q tiene unidades más convenientes, Q^{-1} tiene la ventaja de que es directamente proporcional a la atenuación. (Stein S. y Wyssession M., 2003)

La relación entre estas tres variables, δ , γ y Q , teniendo en cuenta la hipótesis de disipación reducida, se determina por las subsecuentes ecuaciones (Knopoff, 1964):

$$\gamma = \frac{\omega}{2\nu Q} = \frac{\pi f}{\nu Q} = \frac{\delta f}{\nu} \quad (5)$$

$$\delta = \frac{\pi}{Q} = \frac{\gamma f}{\nu} = \gamma * \lambda \quad (6)$$

donde ω corresponde a la frecuencia angular asociada a la onda, f denota su frecuencia lineal y ν representa la velocidad con la que se propaga el tren de ondas; la cual abarca tanto la velocidad de fase como la de grupo, según se trate de ondas no dispersivas o dispersivas, respectivamente.

2.3.3. Esparcimiento o scattering

Este fenómeno ocurre debido a la anisotropía y heterogeneidad del medio. El principio de Huygens establece que la interrelación de las ondas con la falta de homogeneidad en el medio de propagación crea ondas secundarias que interfieren entre sí cuando estas se disipan (Scales, 1995).

Este fenómeno es un mecanismo de redistribución de energía que, a diferencia de la expansión geométrica, produce amplitudes superiores o inferiores a las supuestas. Esta energía dispersa causa una coda, una cola de energía incoherente que decae durante segundos o minutos (Figura 2.6) (Stein S. y Wysession M., 2003).

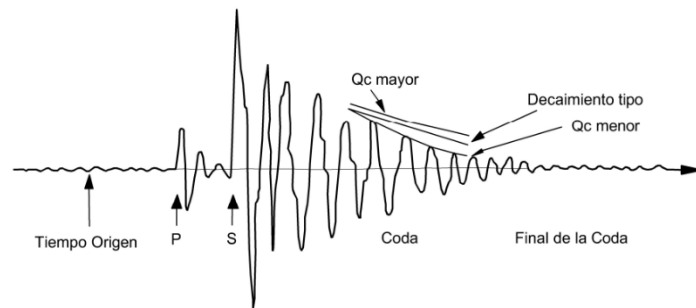


Figura 2.6. Parámetros asociados a un sismograma (Tomado de Pérez, 2000).

En el factor Q se suman los efectos de la absorción anelástica y del esparcimiento, es decir, se considera globalmente la atenuación. De esta forma el factor de calidad aparente, Q , se relaciona con la suma del factor de calidad intrínseco, Q_i y el factor de calidad Q_s , (García, 2001):

$$\frac{1}{Q(f)} = \frac{1}{Q_i(f)} + \frac{1}{Q_s(f)}, \quad (7)$$

Si bien, aunque resulta de gran interés hacer esta descomposición de los fenómenos que repercuten en el valor del factor de calidad Q , es común emplear solamente el valor de Q aparente, el cual engloba la absorción anelástica y scattering, por la dificultad de cuantificar las aportaciones individuales de la atenuación intrínseca y extrínseca (García, 2001).

2.3.4. Evaluación de la atenuación sísmica

Los principales métodos empíricos empleados para evaluar la atenuación sísmica pueden clasificarse en dos grandes grupos: por un lado, los procesos cuasiestáticos, que se enfocan en medir el desfase entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones resultantes, manifestación directa del comportamiento anelástico del medio; por otro lado, las técnicas dinámicas, fundamentadas en el análisis de diversos tipos de ondas sísmicas, entre ellas las ondas P, S, coda y Lg,

Las técnicas dinámicas son las más empleadas y se realizan partiendo de sismogramas o acelerogramas registrados por medio de instrumentos de banda ancha. El objetivo de estos análisis es observar cómo disminuye la amplitud con la distancia al foco de alguna o algunas de las siguientes variables (García, 2001):

1. Amplitud máxima ($A_{\text{máx}}$, $V_{\text{máx}}$, $D_{\text{máx}}$), mismas que aportan datos importantes sobre la caída del valor máximo con la distancia. Su interés es de tipo ingenieril porque los picos no representan de manera confiable las características de la fuente y tampoco de la trayectoria (García, 2001).

2. Amplitud espectral. Estos resultados son útiles para informar del comportamiento de la atenuación para cada frecuencia, proporcionando así información sobre las características de la fuente y que puede ser aplicada para análisis estructural. Con base en el cambio en la amplitud del espectro, se puede obtener el factor de calidad y su relación con la frecuencia (Ordaz y Singh, 1992).

Uno de los principales objetivos de una investigación de atenuación sísmica en el que se emplean técnicas dinámicas es encontrar una ecuación que relacione una variable característica del movimiento del terreno producido por un terremoto, ya sea la aceleración o la velocidad máxima, con variables como la distancia y magnitud

Para lograr este objetivo, a partir de datos que se obtienen a través de instrumentación sísmica, se realizan regresiones que permiten correlacionar tales variables. Es en este punto cuando se hace evidente la importancia del desarrollo de ecuaciones empíricas como medio para obtener una estimación fiable del movimiento del terreno, lo cual es clave para la evaluación y la prevención de daños

La ecuación general empleada para el cálculo de la regresión tiene la siguiente forma:

$$\ln SA(f, R) = C_1(f) + C_2(f) * M_w + C_3(f) * \ln R + C_4(f) * R, \quad (8)$$

o en su forma exponencial:

$$SA(f, R) = D_1(f) + D_2(f) * M_w + R^{C_3(f)} * e^{C_4(f)R}, \quad (9)$$

donde $SA(f)$ representa la variable empleada en la regresión, f es la frecuencia, M_w es la magnitud de momento sísmico, R es la distancia epicentral, $C_i(f)$ son coeficientes característicos de la relación existente entre el movimiento del terreno con la magnitud y la distancia. El término $C_1(f)$ es una constante que no presenta relación con la frecuencia. Se establece para adecuar la escala de la regresión y las constantes supuestas. $C_2(f)M_w$ determina la influencia de la magnitud del sismo referente a la amplitud del movimiento previsto. $C_3(f)\ln R$ representa el efecto de la expansión geométrica. $C_4(f)R$ simboliza la atenuación anelástica. $C_5(f)$ es el coeficiente asociado con las características del terreno.

A través de regresiones lineales se calcula el valor de los coeficientes $C_i(f)$, cada uno de ellos engloba información importante para entender la atenuación en el medio, así como el mecanismo de la fuente sísmica estudiada (Carrillo et al., 2015).

2.4. Relaciones de atenuación en México

En México se han llevado a cabo diversos estudios que incluyen la obtención de relaciones de atenuación para diferentes regiones. A continuación, se describen brevemente algunos de los trabajos realizados al respecto.

Castro et al., (1990) citado por García [4, p. 56], hicieron un análisis de atenuación sísmica a partir de acelerogramas en la región de Guerrero. La base de datos fue limitada, además de que el estudio abarcó 133 km a la redonda de la costa del océano Pacífico. Uno de los puntos más relevantes de este estudio fue que indicaron que existe una fuerte relación de Q con la frecuencia, además de que encontraron valores negativos para el factor de calidad entre las frecuencias de 0.8 y 2 Hz.

Más adelante, Youngs et al., (1997) presentaron una relación de atenuación para sismos inter e intraplaca desarrollada para aceleraciones máximas, PGA, mediante análisis de regresiones aleatorias. La base de datos que emplearon, en la cual se encuentran registros nacionales e internacionales, se hallan 23 sismos que ocurrieron en México entre los años 1962 y 1985.

Algunos años después, García (2006) propuso una relación de atenuación para sismos interplaca a partir de 418 registros correspondientes a 40 eventos de magnitud M_w entre 5.0 y 8.0 con distancias menores o iguales a 400 km. En su investigación mostró que existe una diferencia entre las amplitudes de onda para trayectorias al interior del continente y aquellas a lo largo de la costa, siendo las primeras mayores que las segundas. En su trabajo indica que es necesario refinar el modelo para eventos interplaca analizando las trayectorias costeras e interiores por separado, así como realizar estudios de sitio con el fin de determinar funciones de amplificación.

Por otra parte, Arroyo et al., (2010) desarrollaron una relación de atenuación para determinar la pseudoaceleración de sismos interplaca sobre lecho rocoso. Los datos que emplearon

corresponden a registros de sismos con magnitud M_w mayor o igual a 5.0 que se presentaron en los años de 1985 a 2004 a lo largo de la costa del océano Pacífico en los estados de Colima y Oaxaca. En sus resultados, notaron que la atenuación tiende a ser más fuerte en México cuando se presentan sismos de gran magnitud, en comparación con otros países.

Clemente et al., (2012) propusieron una relación de atenuación que permitiera estimar la aceleración máxima del terreno para el estado de Querétaro, mediante el análisis de la trayectoria Guerrero-Querétaro a partir de regresiones lineales múltiples. Lograron minimizar la desviación estándar de los residuos S_R al llevar a cabo el análisis de atenuación por medio de trayectorias particulares. En este estudio, el empleo de un ajuste lineal en lugar del ajuste cuadrático se justificó al ver que se presentaban grandes diferencias en los valores de PGA estimados para sismos de magnitud $M_w > 6$, respecto a los estimados a partir de las relaciones de atenuación obtenidas por Ordaz et al., (1989) y García (2006). En la FVTM, observaron que se presenta una disminución de la atenuación asociadas con las frecuencias de 0.3, 0.5 y 2.0 Hz. Esta relación de atenuación tiene entre sus limitaciones que solo es aplicable a la trayectoria Guerrero-Querétaro, además de que por la limitada cantidad de información que se utilizó y por el rango de frecuencias que registran los equipos de medición empleados, solo es válida para sismos interplaca con profundidades entre 5 y 30 km.

Posteriormente, Jeronimo-Garcia et al., (2016) presentaron parámetros de diseño sísmico para los estados de Michoacán, Guerrero y Oaxaca, empleando siete relaciones de atenuación. No obstante, solo algunas de ellas consideran información de Michoacán y Oaxaca, mientras que todas incluyen datos del estado de Guerrero. Esto deja claro que se requiere tener relaciones de atenuación sísmica que incluyan datos correspondientes a las zonas de estudio para que sea posible establecer de forma más apropiada el potencial sísmico de las regiones analizadas.

Asimismo, Samaniego et al., (2020) propusieron una relación de atenuación a partir de 86 eventos sísmicos con magnitudes M_w entre 5 y 8.2 y distancias epicentrales de 52 a 618 km, registrados en los estados de Chiapas, Oaxaca, Tabasco y Veracruz. Las aceleraciones máximas empleadas en este modelo fueron obtenidas a partir de registros corregidos por

efecto de sitio, dando a conocer la importancia de eliminar este efecto para evitar obtener intensidades sísmicas sobreestimadas.

Ordaz et al., (2021) recientemente presentaron la última actualización del programa CRISIS, R-CRISIS v20, empleado para análisis probabilísticos de peligro sísmico en que han estado trabajando durante 35 años. En este programa se puede introducir cualquier modelo de estimación del movimiento del terreno y de igual forma cuenta con algunos modelos incorporados. R-CRISIS v20 ha resultado ser útil en el proceso de enseñanza para análisis probabilísticos de peligro sísmico, sin embargo, para garantizar la idoneidad para su empleo por profesionales e investigadores, estará sujeto a constantes actualizaciones.

Entre las relaciones de atenuación desarrolladas para sismos intraplaca se pueden mencionar las siguientes:

Pérez-Moreno et al., (2018) presentaron ecuaciones para estimar la aceleración espectral, SA, y la aceleración máxima del terreno, PGA, a partir de una metodología propuesta con análisis bayesiano. La base de datos empleada se basó en acelerogramas registrados en la FVTM para sismos corticales. A partir de los resultados obtenidos proponen investigar la atenuación sísmica considerando una subdivisión de la región.

Más adelante, Jaimes y García-Soto (2020) desarrollaron un modelo actualizado de predicción del movimiento del terreno para sismos intraplaca, con fuente en la costa del océano Pacífico, de profundidad intermedia de hasta 75 km en sitios rocosos para las componentes horizontal y vertical incluyendo las relaciones V/H. En este estudio fueron empleados 366 registros con distancias epicentrales de aproximadamente 400 km y magnitud M_w de 5 a 8.2. Los autores puntualizan que su ecuación puede ser empleada para evaluar la amenaza sísmica de estructuras vulnerables a intensidades verticales generadas por sismos intraplaca.

Durante el mismo año, Rivas-Nieto, (2020) obtuvieron relaciones de atenuación de la aceleración máxima del terreno para sismos corticales en la FVTM por medio del método de máxima verosimilitud de una etapa. Dividieron la región en cuatro zonas de acuerdo con las características de los sectores descritos en Ferrari et al., (2012). Para las zonas Oeste, Central

y Este presentaron modelos con buen ajuste además de que incluyeron la variable del efecto de sitio en sus ecuaciones. Como ejercicio adicional se intentó deducir una relación de atenuación general para toda la zona de estudio, sin embargo, debido a la dispersión de los datos el grado de aproximación obtenido fue bajo.

Con base en la información disponible hasta la fecha en la literatura, se observa una tendencia en considerar los efectos de sitio en la deducción de relaciones de atenuación sísmica y, sobre todo, que estas incluyan bases de datos particulares de las zonas de estudio para que sea posible establecer de forma más confiable y precisa el potencial sísmico de las regiones analizadas.

Hasta este momento se ha desarrollado una relación de atenuación para el estado de Querétaro, que describe el comportamiento de la señal de sismos de subducción con origen en el estado de Guerrero. Clemente-Chávez y Figueroa-Soto (2018) analizaron la señal sísmica proveniente de los estados de Colima, Guerrero y Oaxaca sin incluir el estado de Michoacán.

Por lo mencionado anteriormente, en este trabajo de investigación se desarrolló una relación de atenuación para cada una de las trayectorias considerando la profundidad hipocentral, la magnitud del sismo, la distancia y los efectos de sitio.

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. Hipótesis

A partir de registros de sismos interplaca originados en la zona de subducción del océano Pacífico será posible obtener relaciones de atenuación de la PGA en la ciudad de Querétaro para múltiples trayectorias.

3.2. Objetivo general

Obtener relaciones de atenuación para la aceleración máxima del terreno, PGA, de sismos interplaca en la ciudad de Querétaro por medio de cuatro trayectorias desde la zona de subducción del océano Pacífico.

3.3. Objetivos específicos

- Identificar la dirección de las trayectorias considerando como fuente la zona de subducción del océano Pacífico y como punto de llegada el estado de Querétaro.
- Determinar los valores de aceleración máxima registrados en Querétaro durante la ocurrencia de sismos interplaca en la costa del océano Pacífico, considerando las trayectorias establecidas.
- Obtener relaciones de atenuación de la aceleración máxima del terreno, PGA, para cada una de las trayectorias analizadas.
- Evaluar la bondad de ajuste de los modelos propuestos.

4. METODOLOGÍA

La metodología fue estructurada en cuatro etapas establecidas a partir de los objetivos específicos. Asimismo, cada etapa consistió en un conjunto de actividades, como se muestra en la Figura 4.1.

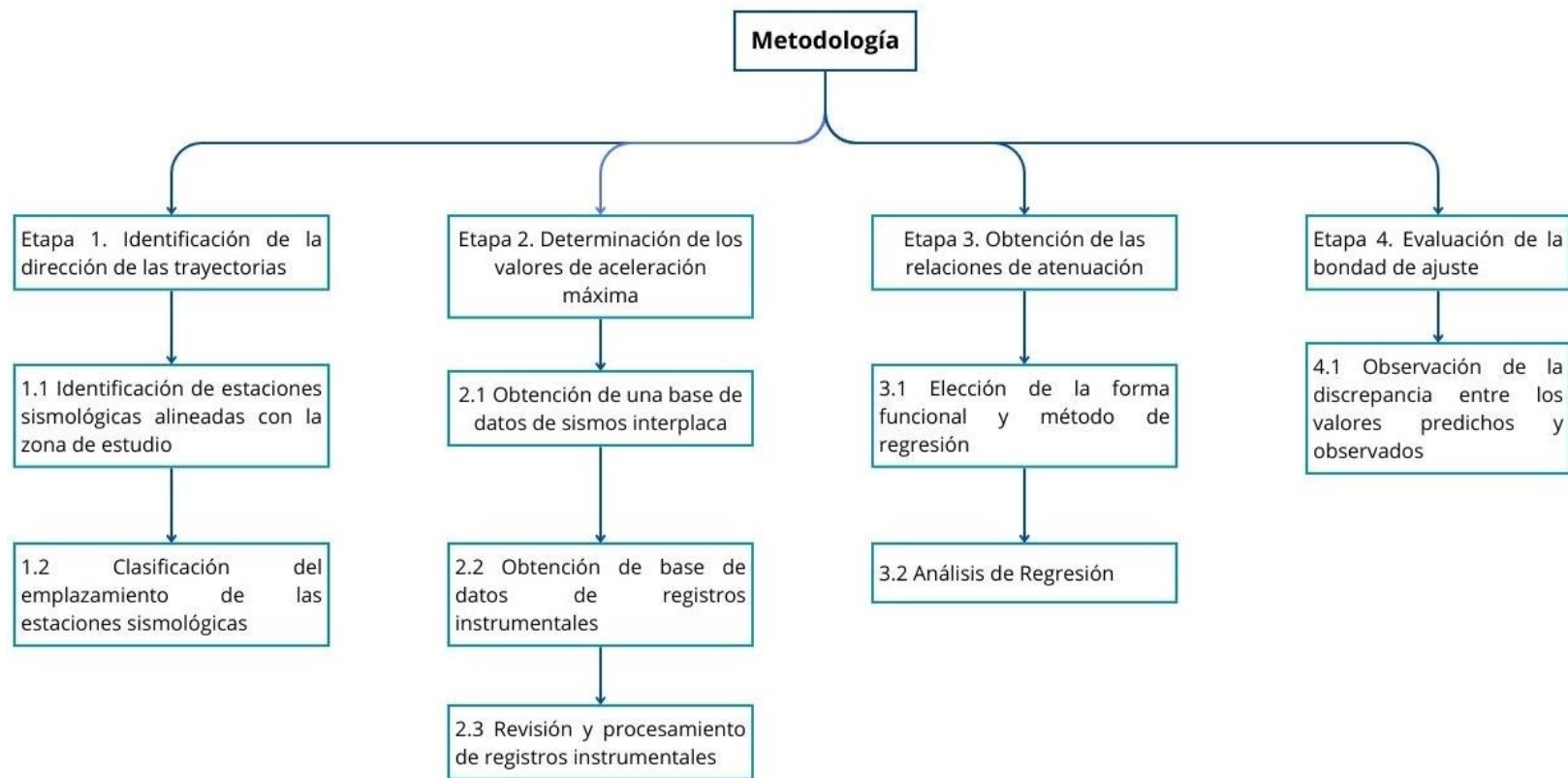


Figura 4.1. Diagrama de flujo de la metodología.

4.1. Identificación de la dirección de las trayectorias

En esta etapa se ubicaron las estaciones sismológicas alineadas con la zona de estudio partiendo de los estados en la costa del océano Pacífico. En función de las estaciones cuyo emplazamiento pudiera ser clasificado como roca mediante la técnica HVSR, se trazaron los rumbos al estado de Querétaro.

Siguiendo la metodología propuesta por Clemente et al., (2012) y Clemente-Chávez y Figueroa-Soto (2018), se definieron trayectorias individuales desde el origen sísmico hasta el sitio de interés. Este enfoque permite especificar tanto la dirección de la fuente como la influencia de la estratigrafía local, logrando una reducción en la desviación estándar de los residuos en comparación con los modelos de atenuación que promedian múltiples trayectorias. Por lo tanto, el análisis de trayectorias permite caracterizar la atenuación del movimiento del suelo como una función específica de la distancia fuente-sitio.

4.1.1. Identificación de estaciones sismológicas alineadas con la zona de estudio

Se consideraron las estaciones que conforman las redes permanentes de banda ancha operadas por el Servicio Sismológico Nacional, SSN, el observatorio GEOSCOPE y las estaciones JRQG y TXMV pertenecientes al Instituto de Geociencias, CGEO de la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Asimismo, se analizó la información disponible en la red desplegada en Querétaro por el Centro de Geociencias de la UNAM y de la estación temporal de banda ancha UAQ-CH, que se instaló para la realización de este estudio.

4.1.1.1. Red de banda ancha del Servicio Sismológico Nacional, SSN

La red de banda ancha del SSN está integrada por 62 observatorios sismológicos (Figura 4.2), los cuales cuentan con sismómetros de tres componentes cuya respuesta plana abarca desde 120 o 240 s hasta 50 Hz y digitalizadores de 24 o 26 bits (SSN, 2026c).

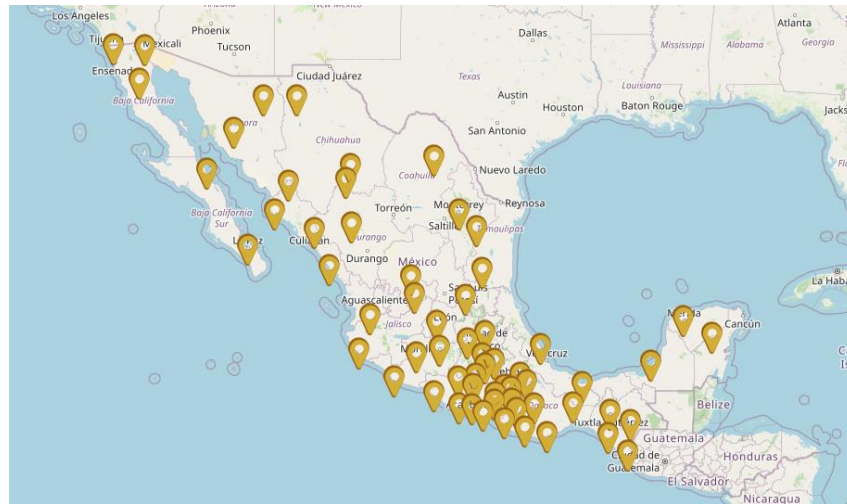


Figura 4.2. Red permanente de banda ancha del Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2026c)

4.1.1.2. Observatorio GEOSCOPE

El observatorio GEOSCOPE es una red global de 35 estaciones sismológicas de banda ancha distribuidas en 18 países. La estación sismológica de la cual se obtuvieron datos para esta investigación es la denominada UNM.

La estación UNM se encuentra ubicada en la Ciudad de México, está equipada con un sismómetro STS-1, un digitalizador Metrozet E-300 Electronics y con un acelerómetro Kinematics FBA-ES-T.

4.1.1.3. Estaciones JRQG y TXMV del Instituto de Geociencias, CGEO, de la Universidad Autónoma de México, UNAM.

La estación JRQG estuvo instalada en el campus Juriquilla de la UNAM hasta 2020, cuando fue trasladada al municipio de Tequisquiapan su clave fue cambiada a TXMV. Esta estación se encuentra equipada con un sismómetro de banda ancha marca Nanometrics, modelo Trillium 120, y un digitalizador Taurus. Las señales del sensor de velocidad se adquieren con una tasa de muestreo de 100 muestras por segundo.

4.1.1.4. Estación sismológica UAQ-CH

Se instaló de forma provisional en el campus Centro Histórico de la Universidad Autónoma de Querétaro (Figura 4.3), como parte de la colaboración para realizar este trabajo de tesis, con el Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra “Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Dicha estación se encuentra integrada por un sensor de banda ancha Trillium 120 y un digitalizador Reftek; las señales captadas por el sensor de velocidad fueron registradas de manera continua con una frecuencia de muestreo de 200 muestras por segundo.

Coordenadas Geográficas: Latitud $20^{\circ}35'46.81''$ N; Longitud $100^{\circ}23'19.62''$ O y declinación magnética de 4.61° E (NGDC, 2022).

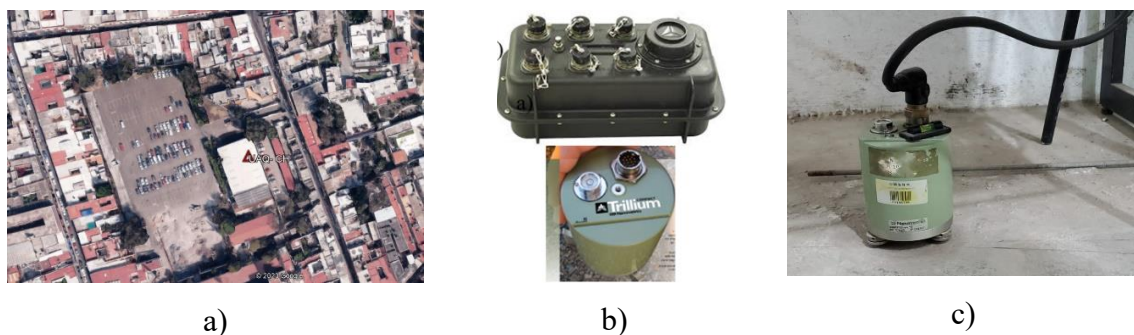


Figura 4.3 Estación UAQ- CH. a) Ubicación geográfica, b) y c) Instrumentos de medición.

4.1.1.5. Estaciones R2E0F, RB158, R8296, R03C7

Adicionalmente, se incluyeron datos de estaciones sismológicas instaladas en el estado de Querétaro por el Instituto de Geociencias de la UNAM. Las coordenadas de las estaciones consideradas se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Estaciones del Estado de Querétaro

Estación	Latitud	Longitud
R2E0F	20.68°	-100.47°
RB158	20.64°	-100.42°
R8296	20.59°	-100.44°
R03C7	20.59°	-100.40

4.1.2. Clasificación del emplazamiento de las estaciones sismológicas

En este estudio se emplearon algunos resultados reportados por Clemente-Chávez et al., (2014), Pérez-Moreno et al., (2021) y Martínez-Rivera et al., (2022), específicamente la frecuencia fundamental de vibración y las gráficas HVSR.

En las estaciones para las que no fue posible encontrar esta información se aplicó la técnica HVSR con al menos tres registros de velocidad utilizando el software Geopsy (Wathelet et al., 2020), obteniendo la media para cada una de ellas. Para realizar este procedimiento, se corrigieron los registros por línea base y tendencia. Asimismo, se empleó la función de suavizado de Konno y Ohmachi, (1998) con $b = 40$ y una disminución de coseno de 5%. El rango de frecuencias se definió de 0.1 a 30 Hz y se tomaron longitudes de ventana a partir de la llegada de las ondas S, procurando la existencia de al menos 10 ciclos significativos por ventana.

Una vez configuradas estas variables, se obtuvieron las gráficas HVSR y se revisaron los criterios especificados por Havenith et al., (2004) para verificar su confiabilidad:

1. $Longitud\ de\ ventana > \frac{10}{f_0}$

Es decir, para la frecuencia de interés f_0 deben existir al menos 10 ciclos significativos por ventana.

2. $n_c(f_0) > 200$

El número total de ciclos significativos $n_c(f_0) = Longitud\ de\ ventana * número\ de\ ventanas\ seleccionadas\ para\ la\ curva\ H/V * frecuencia\ pico\ HVSR$ debe ser mayor

que 200. Es decir, que para una frecuencia pico de 1 Hz debe haberse seleccionado por lo menos 20 ventanas de 10 segundos.

3. $\sigma_A(f) < 2$ para $0.5f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 > 0.5 \text{ Hz}$

$\sigma_A(f) < 3$ para $0.5f_0 < f < 2f_0$ si $f_0 < 0.5 \text{ Hz}$

Los valores de desviación estándar en las curvas deben ser bajos y cumplir con estas condiciones.

Después de haber revisado el cumplimiento de las tres condiciones de confiabilidad con respecto a las gráficas HVSR y f_0 de las estaciones sísmicas, se tomaron los criterios propuestos por Havenith et al., (2004) para su clasificación.

4.2. Determinación de los valores de aceleración máxima

En esta etapa se hizo una búsqueda preliminar de los sismos interplaca ocurridos en la zona de subducción mexicana en el catálogo del SSN (SSN, 2026d), para luego ingresar a su servidor y descargar los registros sísmicos de las estaciones previamente seleccionadas. Posteriormente se realizó el procesamiento de los registros para obtener las aceleraciones máximas del terreno.

4.2.1. Obtención de una base de datos de sismos interplaca

Se realizó una búsqueda inicial en el catálogo del SSN para identificar los sismos interplaca que ocurrieron en los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca desde el 01 de enero de 2001 hasta el 31 de diciembre de 2022. Este intervalo de tiempo abarca los eventos sísmicos para los cuales se encontró información pública disponible en el catálogo del SSN, hasta el año en que se realizó esta investigación.

Las características de los sismos interplaca empleados en este estudio son las siguientes:

- Magnitud de momento sísmico $M_w \geq 5.0$
- Mecanismo de falla: Inverso

- Profundidad ≤ 30 km

El SSN emplea la magnitud de energía M_E para sismos mayores a 4.5 con epicentros en Guerrero y para sismos con magnitud mayor a 4.5, en los otros estados, reporta la magnitud de momento sísmico M_W (SSN, 2026e). En este caso se tuvo que realizar una conversión de magnitudes para el estado de Guerrero empleando la relación $\log E_s - M_W$ de (Singh, 1994).

Las características de los sismos fueron comprobadas con la página web del Instituto de Ingeniería de la UNAM (Franco et al., 2020), con la base de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2017) y con el Catálogo Global de CTM desarrollado por la Universidad de Harvard (Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012).

Para conocer el mecanismo focal de los eventos, se revisó el ángulo rake o slip (Tabla 4.2), el cual describe el movimiento relativo entre un lado de la falla con respecto a otro (Figura 4.4). El ángulo es positivo para fallas inversas y negativo para fallas normales (Suetsugu, 1997).

Tabla 4.2. Tipos de fallas que corresponden a los mecanismos focales según el ángulo de deslizamiento (Miller, 2014)

Rake	Tipo de falla
0° o 180°	<i>Transcurrente</i>
90°	<i>Inversa pura</i>
-90°	<i>Normal pura</i>
-20° a 20°	<i>Transcurrente siniestral</i>
20° a 70°	<i>Oblicua- inversa- sinistral</i>
70° a 110°	<i>Inversa</i>
110° a 160°	<i>Oblicua- inversa- dextral</i>
-160° a 160°	<i>Transcurrente dextral</i>
-110° a -160°	<i>Oblicua- normal- dextral</i>
-70° a -110°	<i>Normal</i>
-20° a 70°	<i>Oblicua- normal- sinistral</i>

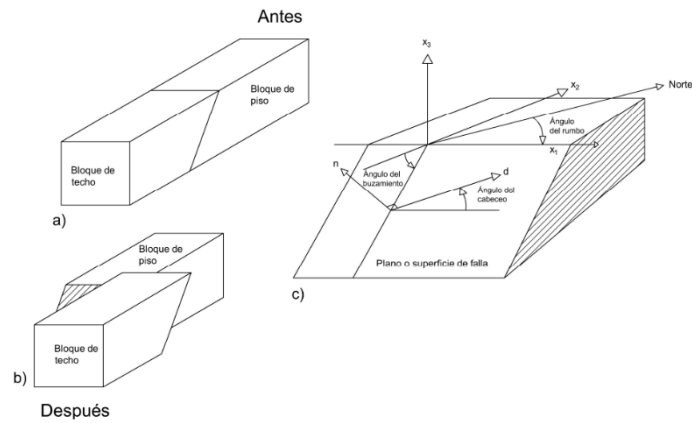


Figura 4.4. a) Antes y Después del desplazamiento de bloques durante un terremoto; c) Definición de ángulos de cabeceo, buzamiento y rumbo (Okal, 2021).

4.2.2. Obtención de base de datos de registros instrumentales

Las trazas sísmicas de los datos identificados provienen de la base de datos del SSN (SSN, 2026d). Se tomaron en cuenta solo las estaciones donde no se presentaron contrastes de impedancia significativos, previamente seleccionadas de acuerdo con lo mencionado en la sección 4.1. En cuanto a las trazas sísmicas provenientes de la estación UAQ-CH, ubicada en la Facultad de Filosofía de la UAQ, fue necesario realizar el pre-procesamiento de los datos para trabajar en formato SAC.

Se obtuvieron las trazas sísmicas, primeramente, de las estaciones ubicadas en Querétaro, debido a que es el principal sitio de interés en esta investigación. Después, tomando como referencia los eventos registrados en las estaciones JRQG y UAQ-CH se procedió con la búsqueda en cada una de las estaciones de las trayectorias. Para tomar en cuenta un evento sísmico, este debería tener por lo menos las tres trazas sísmicas (Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical) en tres estaciones por cada trayectoria, los eventos sísmicos que no cumplieron con esta característica fueron descartados.

4.2.3. Revisión y procesamiento de registros instrumentales

De cada evento se obtuvieron tres trazas sísmicas de velocidad: Este- Oeste, Norte- Sur y Vertical. Se tomaron en cuenta aquellos registros donde se apreciaba el arribo de las ondas P y S, así como aquellas que tuvieran relación Señal/Ruido >2 (Figura 4.5). El procesamiento de cada una de estas se realizó con ayuda del programa Seismic Analysis Code, SAC (Goldstein y Snoke, 2005).

Primeramente se recortaron las trazas sísmicas de los eventos a ventanas de 10 minutos y se les aplicó una corrección de línea base (Boore, 2005). Después se deconvolucionaron para remover la respuesta instrumental mediante el archivo de polos y ceros correspondiente (Bravo, 2019; Figueroa-Soto et al., 2010) y se derivaron para pasar de velocidad a aceleración. Al realizar el procedimiento descrito los registros pasan de tener unidades de cuentas por segundo a magnitudes de aceleración (cm/s^2).

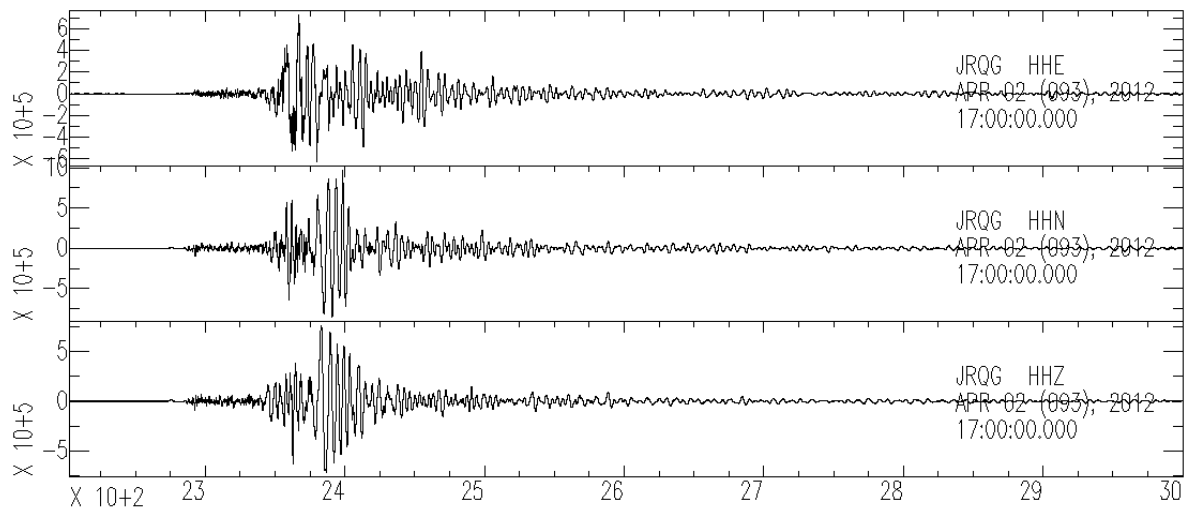


Figura 4.5. Señal sísmica con relación S/R >2 .

Las aceleraciones máximas del movimiento del terreno, PGA, se obtuvieron a partir de las medias cuadráticas de la aceleración máxima de las componentes ortogonales, ecuación 10, debido a que es el proceso más racional desde el punto de vista físico (Boore et al., 2006).

$$PGA = \sqrt{\frac{A_E^2 + A_N^2}{2}}, \quad (10)$$

siendo PGA es la aceleración máxima del terreno expresada en cm/s^2 , A_E la aceleración pico correspondiente a la componente Este-Oeste, A_N la aceleración pico asociada a la componente Norte-Sur.

En el capítulo de resultados y discusión se muestran las tablas con las aceleraciones obtenidas para cada trayectoria.

4.3. Obtención de las relaciones de atenuación

En esta sección se muestra la elección del modelo funcional y adaptación realizada en este estudio. Se aplicó el método de máxima verosimilitud de una etapa para calcular los coeficientes de las relaciones de atenuación descrito por (Boore et al., 1993).

4.3.1. Elección de la forma funcional y método de regresión

El método de mínimos cuadrados es ampliamente utilizado para encontrar los coeficientes de un modelo seleccionado. Campbell (1981) empleó esta técnica para compensar la distribución desigual de los datos sobre la distancia. Por otro lado, Boore et al., (1993) desarrollaron métodos de una y dos etapas basadas en la máxima verosimilitud.

La estructura general de la relación de atenuación está descrita por la ecuación 11 en su forma lineal, con lo que se satisfacen las condiciones físicas para escalar el movimiento del terreno con la distancia y magnitud. En este estudio, se empleó la forma funcional, ligeramente modificada, propuesta por Boore et al., (2003):

$$\log_{10} PGA = C_1 + C_2 M + C_3 H + C_4 R - g \log_{10}(R) + \epsilon_e + \epsilon_r, \quad (11)$$

En la cual PGA representa el valor pico de aceleración del movimiento del terreno, en gal

(cm/s²), C_i corresponde a los coeficientes ajustados mediante el modelo de regresión, M denota la magnitud de momento sísmico (M_w), H se refiere a la profundidad hipocentral, expresada en km; mientras que $\epsilon_e + \epsilon_r$ constituyen variables aleatorias cuyo valor se asigna de manera específica para cada registro y evento sísmico.

- Consideraciones particulares

Debido a que las estaciones sismológicas empleadas en este estudio se ubicaron en sitios sin contrastes de impedancia significativos, se optó por no incluir una variable asociada al tipo de suelo.

La definición de distancia propuesta por Boore et al., (2003) está dada por $R = \sqrt{D_{ruptura}^2 + \Delta^2}$, donde $D_{ruptura}$ es la distancia más cercana a la falla y Δ representa la saturación que ocurre para los registros cerca de la superficie de ruptura dado por $\Delta = 0.00724 * 10^{0.507 * M_w}$. En este estudio, para hacer más sencillo el empleo de las fórmulas de atenuación, se optó por definir la distancia como la medición de la posición de la estación sísmica hasta el hipocentro.

El coeficiente g , que está en función de la magnitud M_w en el modelo propuesto por Boore et al. (2003), se contempló como un coeficiente más por determinar en el análisis de regresión de una etapa debido a la falta de datos que permitieran correlacionar el coeficiente con la magnitud.

4.3.2. Análisis de regresión

Como se señaló en la sección anterior, se optó por el método de una etapa de máxima verosimilitud descrito por Boore et al., (1993) debido a que proporciona aproximaciones más confiables en comparación con el método de mínimos cuadrados (Contreras Luarte, 2009).

Si se considera:

$$Y = \begin{bmatrix} \log_{10}(A_1) \\ \log_{10}(A_2) \\ \vdots \\ \log_{10}(A_N) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ g \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & H_1 & R_1 & \log_{10}(R_1) \\ 1 & M_2 & H_2 & R_2 & \log_{10}(R_2) \\ 1 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & M_N & H_N & R_N & \log_N(R_3) \end{bmatrix} \quad (14)$$

donde N es el número total de registros correspondiente a cada sismo, la ecuación 11 ahora puede ser escrita como:

$$Y = XB + e, \quad (15)$$

donde e es el vector de desviaciones compuesto por ε_r y ε_e .

La ecuación 15 es lineal y los parámetros se obtienen a partir de proceso iterativo, suponiendo que los componentes de e se distribuyen normalmente con media cero y matriz de varianza-covarianza V .

Puesto que la matriz V no es diagonal ni cuenta con elementos uniformes, ya que los registros provenientes de un mismo sismo no son estadísticamente independientes entre sí, no puede recurrirse a la técnica de mínimos cuadrados para la resolución de la ecuación. Adicionalmente, dado que V depende de los parámetros σ_r y σ_e , se utiliza el método de máxima verosimilitud. (Boore et al., 1993).

La verosimilitud de la muestra de observaciones es (Searle, 1997):

$$L = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} |V|^{-\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (Y - XB)^T V^{-1} (Y - XB) \right], \quad (16)$$

donde T indica transposición de matriz y $||$ denota el determinante. Así, para un V dado, maximizar la función de verosimilitud L con respecto a la matriz B es equivalente a minimizar:

$$(Y - XB)^T V^{-1} (Y - XB) \quad (17)$$

La solución Searle; (1997) es:

$$\hat{B} = (X^T V^{-1} X)^{-1} X^T V^{-1} Y \quad (18)$$

Para derivar la expresión de la matriz de varianza-covarianza V (ecuación 11), debe considerarse que el componente “e” expresa la suma de los términos $(\varepsilon_r + \varepsilon_e)$: el primero adopta un valor distinto para cada registro, mientras que el segundo lo hace para cada evento sísmico. Como consecuencia, la covarianza entre dos componentes de “e” provenientes de eventos diferentes es igual a cero, en tanto que la covarianza entre dos componentes del mismo evento equivale a σ_e^2 (es decir, a la varianza de ε_e). De igual manera, la varianza de un componente individual está dada por $\sigma_r^2 + \sigma_e^2$, lo cual corresponde a la varianza de la suma $\varepsilon_r + \varepsilon_e$. Dado que los registros fueron enumerados de modo que los de un mismo terremoto resultaran consecutivos, la matriz V presenta una estructura diagonal por bloques, en donde cada bloque representa un evento. Sobre esta base, la matriz normalizada v queda definida como sigue:

$$\sigma^2 v = V, \quad (19)$$

donde $\sigma^2 = \sigma_r^2 + \sigma_e^2$ y la matriz v también es una diagonal por bloques:

$$v = \begin{bmatrix} v_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & v_2 & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & v_{Ne} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

donde N_e es el número de sismos. La matriz v_i correspondiente a cada sismo, está dada por:

$$v_i = \begin{bmatrix} 1 & \gamma & \cdot & \gamma \\ \gamma & 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \gamma & \gamma & \cdot & 1 \end{bmatrix}, \quad (21)$$

donde $\gamma = \sigma_e^2 / (\sigma_r^2 + \sigma_e^2)$. El rango de la matriz v_i es Ri , el número de registros para el sismo

i. Sustituyendo la ecuación 19 en 18, se obtiene:

$$\hat{B} = (X^T v^{-1} X)^{-1} X^T v^{-1} Y, \quad (22)$$

Reemplazando la ecuación 19 en 16, se obtiene la probabilidad:

$$L = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} |\sigma^2 v|^{-\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (Y - XB)^T (\sigma^2 v)^{-1} (Y - XB) \right], \quad (23)$$

Empleando el logaritmo natural en la expresión 23 se obtiene:

$$\ln(L) = -\frac{N}{2} \ln(2\pi) - \frac{N}{2} \ln(\sigma^2) - \frac{1}{2} \ln|v| - \frac{1}{2} (Y - XB)^T v^{-1} (Y - XB) / \sigma^2, \quad (24)$$

La ecuación de verosimilitud L tiene que ser maximizada para con relación a γ , B y σ^2 . Como $\hat{B}$ no depende de σ^2 se procede a maximizar L en referencia a σ^2 diferenciando la función 24 con relación a σ^2 , igualando a cero, la solución para σ^2 es:

$$\sigma^2 = (Y - X\hat{B})^T v^{-1} (Y - X\hat{B}) / N \quad (25)$$

Para obtener el valor de γ se calculan los valores de $\hat{B}$, σ^2 y la probabilidad L maximizando con respecto a $\hat{B}$ y σ^2 . La solución equivale al número de γ para el cual el logaritmo de la verosimilitud (ecuación 24), es máximo.

El valor de σ^2 que se obtiene a partir de la ecuación 25 da valores sesgados. Una estimación insesgada es:

$$\sigma^2 = (Y - X\hat{B})^T v^{-1} (Y - X\hat{B}) / (N - 5), \quad (26)$$

donde $N-5$ indica los grados de libertad. En este caso, 5 expresa el rango de la matriz X.

4.4. Evaluación de la bondad de ajuste

Las pruebas de bondad de ajuste corresponden a un conjunto de contrastes de hipótesis empleados para verificar, considerando un determinado nivel de significancia (típicamente $\alpha = 0.05$), la procedencia de los datos muestrales respecto a una distribución o modelo de probabilidad propuesto. (Infante-Gil y de Lara, 2012).

En esta sección se describen las dos pruebas de bondad de ajuste que se aplicaron en este estudio para verificar si los datos observados se ajustaban significativamente a los modelos propuestos. Debido a que las muestras PGA observado " X_i " y PGA predicho " Y_i " son dependientes, se utilizaron técnicas de bondad de ajuste para muestras pareadas.

4.4.1. Observación de la discrepancia entre los valores predichos y observados

Según Infante-Gil y de Lara; (2012), en un diseño en bloques con dos tratamientos se tienen n pares de observaciones $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$. La idea de parear observaciones para reducir el error experimental se traduce en el análisis de las diferencias dentro de los pares, o sea las variables aleatorias $D_i = Y_i - X_i$ ($i = 1, \dots, n$).

La primera prueba empleada, conocida como T de Wilcoxon (Infante-Gil y de Lara, 2012)

es útil cuando las muestras son pequeñas ($n < 30$) y no se cumplen los supuestos de la estadística paramétrica. Las suposiciones para esta prueba son las siguientes:

- a) Las D_i son variables aleatorias simétricas
- b) Las D_i pueden ordenarse

Sea M_D la mediana de la distribución teórica de D_i . La hipótesis bilateral de interés es la siguiente:

- a) $H_0: M_D = 0$ en oposición a $H_a: M_D \neq 0$.

Donde H_0 es la hipótesis nula, que asume que la mediana de la distribución teórica de las diferencias de las aceleraciones observadas y predichas es igual a 0 contra la hipótesis alternativa, H_a , en donde la mediana es diferente de 0.

El procedimiento consiste en calcular las n diferencias $D_i = Y_i - X_i$. Cuando las diferencias son 0, estas se desechan. Después se asignan rangos, 1 a n , a los valores absolutos de las diferencias. Cuando se presente un empate entre los valores $|D_i|$ se les asigna un rango promedio. Sean $R_1, R_2, \dots, R_n$ los valores asignados a $|D_1|, |D_2|, \dots, |D_n|$, se define (Infante-Gil y de Lara, 2012):

$$R_i^* = \begin{cases} 0 & \text{si } Y_i < X_i \text{ } (D_i < 0) \\ R_i & \text{si } Y_i > X_i \text{ } (D_i > 0) \end{cases}$$

La estadística de prueba es (Infante-Gil y de Lara, 2012):

$$T = \sum_{i=1}^n R_i^* \quad (27)$$

Donde R_i son los rangos asignados a $|D_i|$. Se obtuvo el valor crítico $T_{\alpha(n)}$ para un $\alpha = 0.05$. El valor $T_{1-\alpha(n)}$, se obtiene mediante la ecuación 28 (Infante-Gil y de Lara, 2012):

$$T_{1-\alpha(n)} = \frac{n(n+1)}{2} - T_{\alpha(n)} \quad (28)$$

La regla de decisión es la siguiente (Infante-Gil y de Lara, 2012):

a) Rechazar H_0 si $T > T_{\alpha/2(n)}$ o $T < T_{1-\alpha/2(n)}$

La segunda prueba de bondad de ajuste, empleada en esta investigación es la Ji- cuadrada. La estadística de prueba se basa en las frecuencias observadas n_{ij} y las esperadas np_{ij} (ecuación 29). Las cuales se agrupan por clases, cuando hay valores $np_{ij} < 5$, la aproximación no es buena (Infante-Gil y de Lara, 2012):

$$X_0^2 = \sum_{ij=1}^k \frac{(n_{ij} - np_{ij})^2}{np_{ij}} \quad (29)$$

donde k es igual al número de categorías

La regla de decisión para la prueba es:

$$\text{Rechazar } H_0 \text{ si } X_0^2 \geq X_{\alpha, k-1}^2$$

donde α es el nivel de significancia, igual a 0.05.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Identificación de la dirección de las trayectorias

Como se mencionó en el capítulo anterior, fue necesario establecer la dirección de las trayectorias de acuerdo con las estaciones sísmicas existentes en la zona, descartando aquellas con respuesta de sitio significativa.

Para evaluar la respuesta de sitio de las estaciones, se emplearon gráficas obtenidas con la técnica HVSR, algunas de las cuales fueron tomadas de las investigaciones realizadas por Clemente-Chavez et al., (2014), Pérez-Moreno et al., (2021) y Martínez-Rivera et al., (2022), los datos correspondientes a la frecuencia fundamental y la respuesta de sitio se encuentran en la Tabla A.1 del Anexo A.

Las trayectorias definidas para Jalisco- Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca se presentan en la Figura 5.1, Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4.

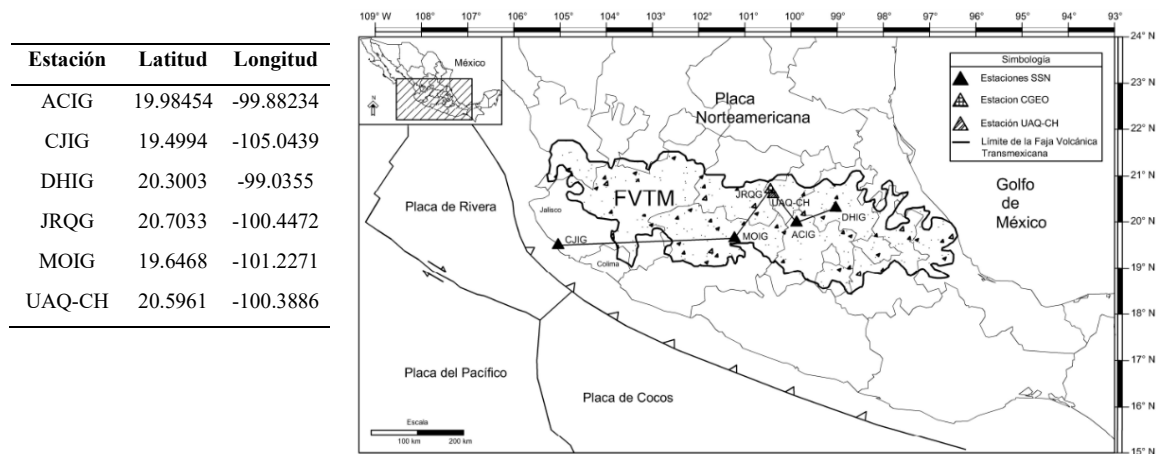


Figura 5.1 Trayectoria Jalisco- Querétaro

Estación	Latitud	Longitud
ACIG	19.98454	-99.88234
DHIG	20.3003	-99.0355
JRQG	20.7033	-100.4472
MMIG	18.2885	-103.3455
MOIG	19.6468	-101.2271
R2E0F	20.68	-100.43
RB158	20.64	-100.42
R8296	20.59	-100.44
R03C7	20.59	-100.40
UAQ-CH	20.5961	-100.3886

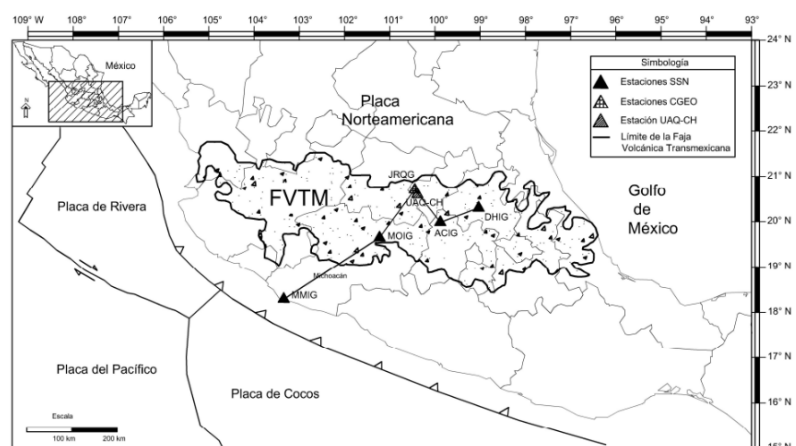


Figura 5.2 Trayectoria Michoacán- Querétaro

Estación	Latitud	Longitud
ACIG	19.98454	-99.88234
ARIG	18.2804	-100.3479
CAIG	17.0485	-100.2672
DAIG	17.0213	-99.6506
DHIG	20.3003	-99.0355
JRQG	20.7033	-100.4472
MEIG	17.9251	-99.6197
PLIG	18.3921	-99.5023
UAQ-CH	20.5961	-100.3886
UNM	19.33	-99.18
YAIG	18.8625	-99.0669

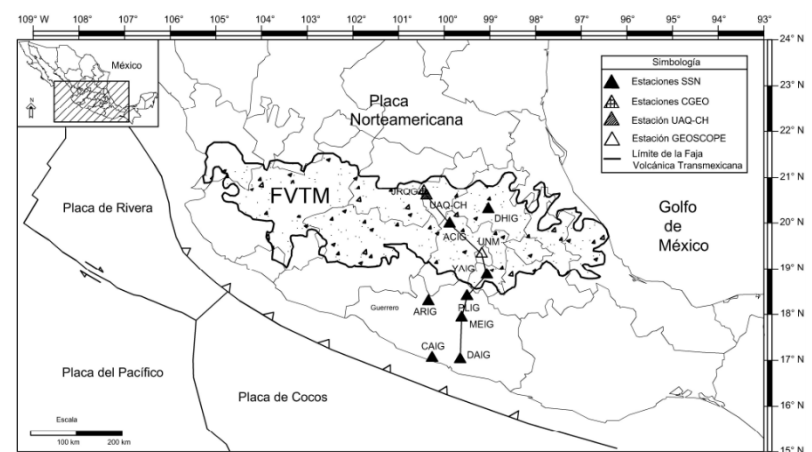


Figura 5.3 Trayectoria Guerrero- Querétaro

Estación	Latitud	Longitud
ACIG	19.98454	-99.88234
DHIG	20.3003	-99.0355
FTIG	17.9079	-98.1326
HLIG	17.8299	-97.8035
HUIG	15.7692	-96.1083
JRQG	20.7033	-100.4472
OXIG	17.0725	-96.7329
TOIG	18.0956	-97.0646
TPIG	18.4202	-97.3619
TXIG	17.2532	-97.7676
UAQ- CH	20.5961	-100.3886
UNM	19.33	-99.18
YAIG	18.8625	-99.0669
YOIG	16.8565	-97.5456

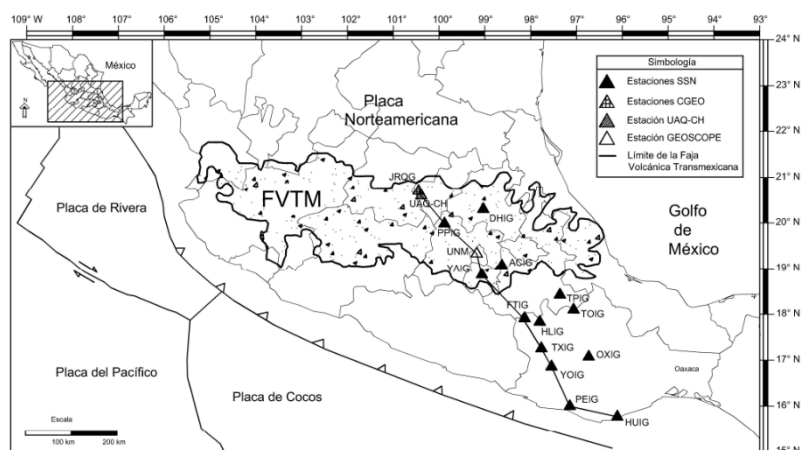


Figura 5.4 Trayectoria Oaxaca- Querétaro

5.2. Determinación de los valores de aceleración máxima

En la Tabla 5.1, Tabla 5.2, Tabla 5.3, Tabla 5.4 y Tabla 5.5 se presentan los 51 eventos seleccionados de acuerdo con los criterios indicados en el capítulo anterior, para cada una de las trayectorias. Los eventos elegidos comprenden un periodo de tiempo que va desde el año 2011 hasta el 2022, con magnitudes entre 5.0 y 7.7 y profundidades desde 3.2 hasta 24.1 km.

Tabla 5.1 Sismos empleados para la trayectoria Jalisco/Colima- Querétaro

Fecha local	Hora local	Magnitud Mw	Latitud N°	Longitud W°	Profundidad km	Día Juliano	Fecha UTC	Hora UTC
20/02/2013	15:23:09	5.6	18.5043	-103.989	3.2	51	20/02/2013	21:23:09
23/10/2016	17:59:29	5.6	18.821	-104.742	13.5	297	23/10/2016	22:59:29
09/02/2018	08:05:48	5.9	18.9507	-104.809	3.5	40	09/02/2018	14:05:48
29/06/2018	22:56:49	5.9	18.879	-105.271	15.7	181	30/06/2018	03:56:49
19/09/2022	14:30:42	5.3	18.45	-103.88	6	262	19/09/2022	19:30:42

Nota: UTC (Tiempo Universal Coordinado)

Fuente: SSN (2026d)

Tabla 5.2 Sismos para la trayectoria Michoacán- Querétaro

Fecha local	Hora local	Magnitud	Latitud	Longitud	Profundidad	Día	Fecha UTC	Hora UTC
		Mw	Nº	Wº	km	Juliano		
11/04/2012	17:55:10	6.4	17.9217	-103.068	20	102	11/04/2012	22:55:10
29/09/2015	10:02:15	5	17.8678	-102.504	23.3	272	29/09/2015	15:02:15
17/07/2018	03:54:37	5.1	18.140	-103.52	5	198	17/07/2018	08:54:37
19/04/2022	07:44:10	5.0	17.770	-101.90	5	109	19/04/2022	12:44:10
19/09/2022	13:05:09	7.7	18.220	-103.29	15	262	19/09/2022	18:05:09
20/09/2022	14:04:29	5.4	18.140	-103.25	16	263	20/09/2022	19:04:29
22/09/2022	01:16:09	6.9	18.010	-103.18	12	265	22/09/2022	06:16:09

Nota: UTC (Tiempo Universal Coordinado)

Fuente: SSN (2026d)

Tabla 5.3 Sismos para la trayectoria Guerrero- Querétaro

Fecha local	Hora local	Magnitud	Latitud	Longitud	Profundidad	Día	Fecha UTC	Hora UTC
		Mw	Nº	Wº	km	Juliano		
26/04/2011	06:07:28	5.2	16.71	-99.68	8	116	26/04/2011	11:07:28
05/05/2011	08:24:07	5.6	16.61	-98.91	12	125	05/05/2011	13:24:07
20/03/2012	12:02:48	7.5	16.264	-98.457	18	80	20/03/2012	18:02:48
01/04/2012	17:23:48	5.3	16.4648	-98.5445	20	92	01/04/2012	22:23:48
15/01/2013	13:20:27	5	16.4907	-98.491	12.1	15	15/01/2013	19:20:27
04/04/2013	19:58:48	5.2	17.1092	-100.808	15.2	95	05/04/2013	01:58:48
06/08/2013	15:17:30	5	16.5127	-98.607	20	218	06/08/2013	20:17:30
16/08/2013	10:33:00	5.1	16.5087	-98.5793	17.4	228	16/08/2013	15:33:00
06/10/2013	10:10:56	5.1	16.8263	-100.109	5	279	06/10/2013	15:10:56
18/04/2014	09:27:21	7.1	17.011	-101.46	18	108	18/04/2014	14:27:21
19/04/2014	09:58:15	5.0	17.348	-101.31	18	109	19/04/2014	14:58:15
08/05/2014	12:00:14	6.5	16.986	-100.916	10	128	08/05/2014	17:00:14
10/05/2014	02:36:00	5.9	17.036	-100.893	10	130	10/05/2014	07:36:00
22/07/2014	19:28:14	5.1	16.5248	-100.471	10	204	23/07/2014	00:28:14
03/08/2014	19:21:50	5.1	17.1147	-100.823	16.2	216	04/08/2014	00:21:50
13/02/2017	01:29:30	5	16.9978	-99.7322	8.5	44	13/02/2017	07:29:30
18/08/2017	00:15:12	5.0	16.8533	-100.451	5.7	230	18/08/2017	05:15:12
25/12/2017	14:23:11	5	16.9863	-99.8452	21.7	359	25/12/2017	20:23:11

Tabla 5.4 Sismos para la trayectoria Guerrero- Querétaro (continuación)

Fecha local	Hora local	Magnitud M _w	Latitud N°	Longitud W°	Profundidad km	Día Juliano	Fecha UTC	Hora UTC
22/08/2018	13:03:08	5.3	16.5337	-98.7447	8.1	234	22/08/2018	18:03:08
30/01/2020	00:47:22	5.0	16.8308	-100.1	17.5	30	30/01/2020	06:47:22
14/10/2022	18:28:02	5	16.51	-98.53	16	287	14/10/2022	23:28:02

Nota: UTC (Tiempo Universal Coordinado)

Fuente: SSN (2026d)

Tabla 5.5 Sismos para la trayectoria Oaxaca- Querétaro

Fecha local	Hora local	Magnitud M _w	Latitud N°	Longitud W°	Profundidad km	Día Juliano	Fecha UTC	Hora UTC
17/02/2012	19:37:58	5.1	15.2295	-95.6503	16.3	49	18/02/2012	01:37:58
20/03/2012	12:35:38	5.3	16.182	-98.5382	12.6	63	20/03/2012	18:35:38
20/03/2012	14:14:40	5.2	16.3608	-98.2907	5.6	63	20/03/2012	20:14:40
22/03/2012	10:46:42	5	15.8748	-98.5797	14.2	65	22/03/2012	16:46:42
13/04/2012	05:10:03	5.2	16.1453	-98.352	5	103	13/04/2012	10:10:03
22/09/2012	07:29:57	5.4	16.2553	-98.2823	4.6	266	22/09/2012	12:29:57
29/09/2012	02:11:10	5.5	15.8823	-98.6685	16.9	273	29/09/2012	07:11:10
09/03/2014	18:37:57	5.8	15.8347	-98.477	4.8	69	10/03/2014	00:37:57
08/05/2016	02:33:59	6	16.323	-97.8773	7.4	129	08/05/2016	07:33:59
27/06/2016	15:50:31	5.7	16.208	-98.003	4.4	179	27/06/2016	20:50:31
20/12/2017	21:23:32	5.2	15.9293	-98.3788	15	355	21/12/2017	03:23:32
16/02/2018	17:39:39	7.2	16.218	-98.0135	16	47	16/02/2018	23:39:39
20/03/2018	10:43:55	5	15.948	-98.7318	14.6	79	20/03/2018	16:43:55
20/03/2018	11:46:54	5.3	16.0222	-98.7022	12	79	20/03/2018	17:46:54
29/06/2018	04:16:39	5.1	15.4002	-94.6472	24.1	180	29/06/2018	09:16:39
22/04/2019	15:15:23	5.5	15.958	-98.6733	15.8	112	22/04/2019	20:15:23
11/01/2020	08:22:02	5.1	16.2503	-98.3182	6.9	11	11/01/2020	14:22:02
15/01/2020	02:15:23	5.1	16.2073	-98.0713	6.7	15	15/01/2020	08:15:23

Nota: UTC (Tiempo Universal Coordinado)

Fuente: SSN (2026d)

En el Anexo B se muestran las aceleraciones máximas del terreno en cm/s^2 correspondientes a las cuatro trayectorias. En total, se obtuvieron 18, 32, 145 y 156 datos de aceleración para las trayectorias con origen en Jalisco/Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca,

respectivamente.

5.3. Obtención de las relaciones de atenuación

Con el propósito de obtener relaciones de atenuación sísmica para estimar los valores de aceleración máxima del movimiento del terreno producida por sismos interplaca provenientes de la zona de subducción, se optó por desarrollar una relación de atenuación para cada trayectoria.

Se tomaron los datos de la Tabla B-1 a la Tabla B-14 del Anexo B para las trayectorias provenientes de Jalisco/Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca, respectivamente. Después de realizar las iteraciones correspondientes que lograron maximizar el valor de la ecuación 24, se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 5.6, Tabla 5.7, Tabla 5.8 y Tabla 5.9.

Tabla 5.6 Coeficientes para la trayectoria Jalisco/Colima- Querétaro

C_1	C_2	C_3	C_4	g	ϵ_r	ϵ_e
-2.9755	0.9060	0.0012	-0.0041	-0.5421	0.1818	0.0606

Tabla 5.7 Coeficientes para la trayectoria Michoacán- Querétaro

C_1	C_2	C_3	C_4	g	ϵ_r	ϵ_e
-1.5751	0.7164	-0.0001	-0.0051	-0.5179	0.2616	0.0872

Tabla 5.8 Coeficientes para la trayectoria Guerrero- Querétaro

C_1	C_2	C_3	C_4	g	ϵ_r	ϵ_e
-1.7595	0.8007	-0.0026	-0.0040	-0.7480	0.2964	0.0988

Tabla 5.9 Coeficientes para la trayectoria Oaxaca- Querétaro

C_1	C_2	C_3	C_4	g	ϵ_r	ϵ_e
0.7622	0.4132	-0.0032	-0.0025	-1.0816	0.2577	0.0859

Las regresiones se realizaron incluyendo el valor del coeficiente correspondiente a la profundidad hipocentral. Sin embargo, algunos autores comentan que no es de gran relevancia en los modelos de atenuación (Arroyo et al., 2010; García-Soto y Jaimes, 2017).

5.4. Evaluación de la bondad de ajuste

Como se mencionó en el capítulo 4, para determinar el grado de aproximación de los valores observados respecto a los valores predichos se realizaron dos pruebas, la primera conocida como T de Wilcoxon y la segunda, Ji- cuadrada. A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada una de las relaciones de atenuación.

a) Relación de atenuación para la trayectoria Jalisco/Colima – Querétaro

Para el análisis T de Wilcoxon se consideraron los 15 datos de registros sísmicos que se emplearon para obtener la relación de atenuación para la trayectoria con origen en Jalisco y Colima. Por una parte, se tienen los datos observados X_i contra los datos predichos con la ecuación obtenida Y_i .

Después de realizar el procedimiento descrito en la sección anterior, se obtiene un valor de T igual a 57. Se emplearon las tablas de valores críticos de T para la prueba de Wilcoxon, con 15 grados de libertad y un nivel de significancia del 5% bilateral, obteniéndose $T_{crit}= 20$. Como $T > T_{crit}$ no se puede rechazar la hipótesis nula, esto indica que no hay diferencias significativas entre las medianas de los valores observados y predichos.

b) Relación de atenuación para la trayectoria Michoacán – Querétaro

Para obtener esta ecuación se emplearon 29 datos de registros sísmicos, con los que se

determinó un valor T igual a 222 y un $T_{crit} = 114$. Como $T > T_{crit}$ se acepta la hipótesis nula, es decir, no existe diferencia significativa entre las medianas de los valores observados y predichos.

c) Relación de atenuación para la trayectoria Guerrero – Querétaro

En el caso de esta relación de atenuación, fue posible usar la prueba de bondad de ajuste de Ji- Cuadrada, dado que se emplearon 142 registros sísmicos.

Los datos se agruparon en cinco categorías en su forma logarítmica, cuidando que cada categoría tuviera al menos cinco datos. En la Tabla 5.10 se muestra la tabla de Ji- cuadrada para el conjunto de datos agrupados, donde n_i son los valores de PGA observados y n_{pi} los valores de PGA predichos:

Tabla 5.10 Resultado de la prueba Ji- cuadrada

		n_i	n_{pi}	X^2
$-\infty$	-1.11	24	18	2.00
-1.11	-0.40	35	38	0.24
-0.40	0.31	44	51	0.96
0.31	1.02	25	23	0.17
1.02	$+\infty$	14	12	0.33
$\sum X^2$				3.70

Con un valor de significancia igual al 5% y 4 grados de libertad, se obtuvo un valor crítico de X^2 igual a 9.49, que al ser comparado con el valor X^2 de la prueba, 3.70, indica que puede aceptarse la hipótesis nula, es decir, la relación de atenuación deducida se ajusta adecuadamente a los datos.

d) Relación de atenuación para la trayectoria Oaxaca – Querétaro

Para este modelo también fue empleada la prueba Ji- cuadrada para evaluar la bondad de

ajuste. En la Tabla 5.11 se muestran los resultados de la prueba, donde se obtiene un valor X^2 igual a 4.96 que sigue siendo menor al crítico, por lo que se acepta la hipótesis nula.

Tabla 5.11 Resultados de la prueba Ji- cuadrada.

		n_i	n_{pi}	X^2
$-\infty$	-0.52	40	43	0.21
-0.52	-0.12	44	43	0.02
-0.12	0.28	39	38	0.03
0.28	0.68	13	17	0.94
0.68	$+\infty$	13	8	3.13
$\sum X^2$				4.33

5.4.1 Análisis de los residuos

Los errores de la estimación se miden en escala logarítmica, es decir: $\log_{10}(error) = \log_{10}(PGA \text{ observado}) - \log_{10}(PGA \text{ predicho})$. Al graficar los residuos con respecto a la distancia, se puede determinar si el modelo es estable cuando los residuos parecen aleatorios, es decir, cuando no existe relación con la distancia (Villalobos-Escobar et al., 2023). Además, la desviación estándar de los residuos puede ser asociada con valores de sub o sobre estimación de los PGA predichos (Contreras Luarte, 2009).

En la Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7 y Figura 5.8 se muestran las gráficas del análisis de residuos para las relaciones de atenuación de Jalisco/Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. En todas ellas se aprecia que los residuales no presentan dependencia con la distancia hipocentral, lo que se traduce en una buena estabilidad de los modelos propuestos.

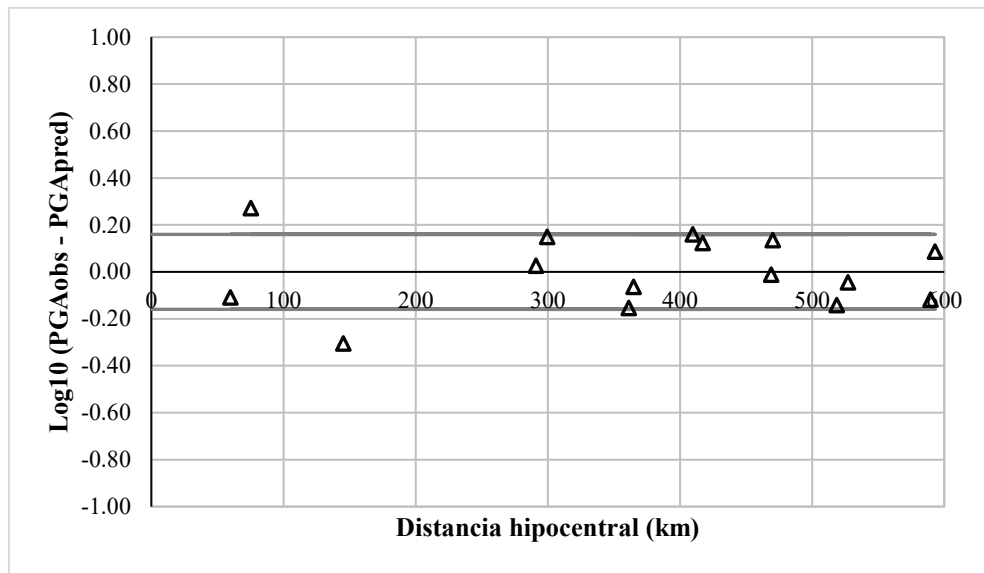


Figura 5.5 Evaluación de residuos para la trayectoria Jalisco/Colima – Querétaro.

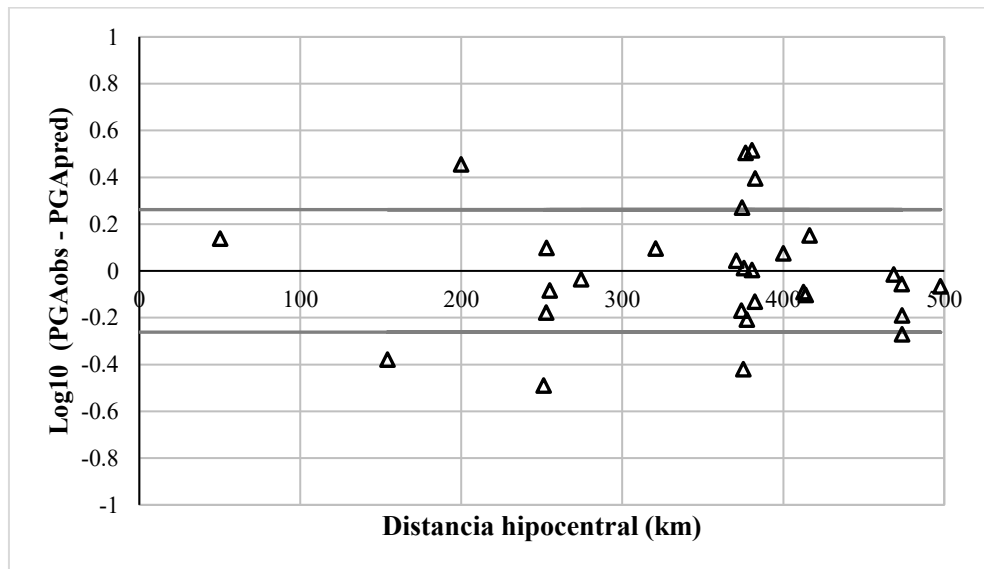


Figura 5.6 Evaluación de residuos para la trayectoria Michoacán – Querétaro.

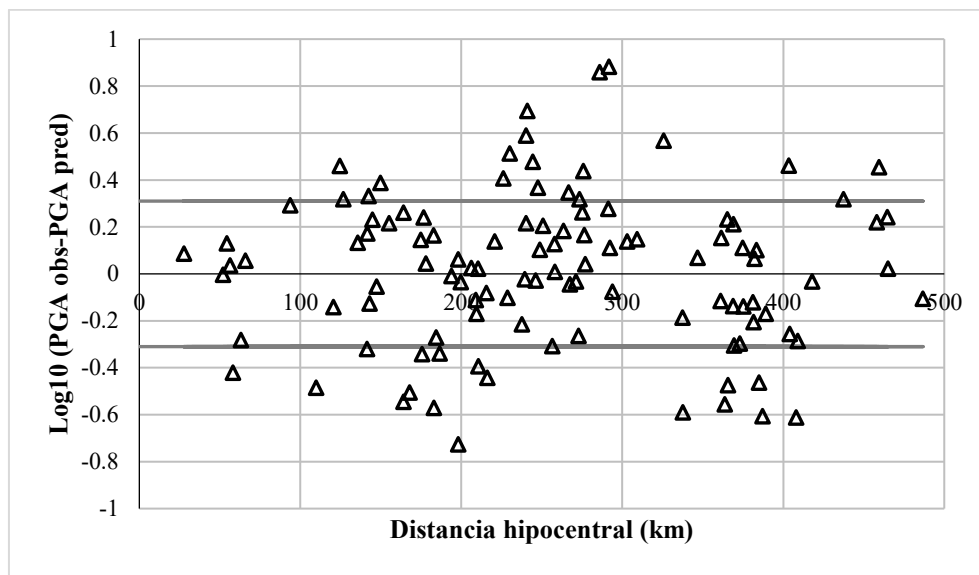


Figura 5.7 Evaluación de residuos para la trayectoria Guerrero – Querétaro.

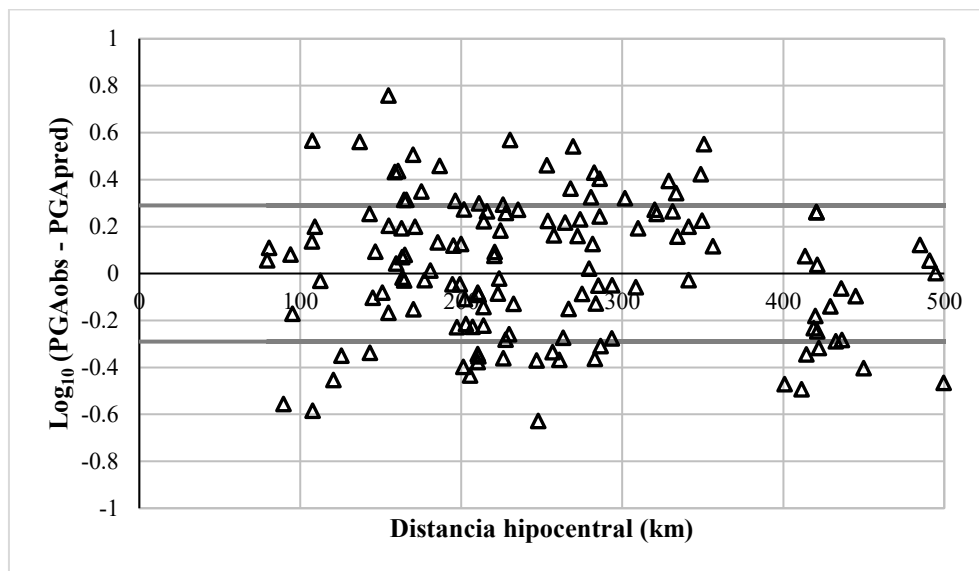


Figura 5.8 Evaluación de residuos para la trayectoria Oaxaca – Querétaro.

En cuanto a los valores de desviación estándar, se estimó para la trayectoria de Colima un valor igual a 0.16, para la de Michoacán 0.26, para la de Guerrero 0.31 y para la de Oaxaca 0.29, lo que se traduce en sub o sobre estimaciones de la aceleración con factores de 1.44, 1.81, 2.04 y 1.94, respectivamente.

5.5. Comparación con otros modelos

En México se han desarrollado una serie de modelos para determinar los valores de aceleración máxima del terreno, PGA, durante sismos interplaca. En esta investigación, las relaciones de atenuación obtenidas se compararon con tres modelos, dos de los cuales Ordaz et al., (1989) y García (2006) han sido empleados por la normativa mexicana para determinar el peligro sísmico en el país.

El modelo propuesto por Ordaz et al., (1989), elaborado a partir de un conjunto de 64 sismos registrados por la Red Acelerográfica de Guerrero, con magnitudes comprendidas entre $5.0 \leq M_w \leq 8.0$ y distancias menores a 350 km, presenta una desviación estándar de 0.25, lo que se traduce en un factor de dispersión de 1.78 con respecto a los valores observados (ecuación 30).

$$\log_{10} PGA = 1.76 + 0.300 M_w - \log R - 0.0031 R, \quad (30)$$

donde $\log_{10} PGA$ es la aceleración máxima del terreno (cm/s^2), M_w es la magnitud de momento sísmico, R es la distancia hipocentral.

El modelo desarrollado por García (2006) a partir de sismos interplaca, con distancia hipocentral menor a 400 km y magnitudes $5.0 \leq M_w \leq 8.0$, con epicentros entre los estados de Colima y Oaxaca, reporta una desviación estándar de 0.33, es decir, factores de sobreestimación de 2.13 respecto a los valores observados (ecuación 31).

$$\log_{10} PGA = 2.5 + 0.12 M_w - 0.0037R - (1.82 - 0.16M_w) \log (R + 0.0075 * 10^{0.474M_w}) - 0.003 H \quad (31)$$

donde $\log_{10} PGA$ es la aceleración máxima del terreno (cm/s^2), M_w es la magnitud de momento sísmico, R es la distancia y H es la profundidad.

El modelo desarrollado por Clemente et al., (2012), a partir de tres sismos interplaca con

epicentros en la zona de subducción de Guerrero, magnitudes $5.2 \leq M_w \leq 6.6$ y distancias hipocentrales menores a 380 Km, reporta una desviación estándar de 0.21, es decir, factores de sobreestimación de 1.62 respecto a los valores observados (ecuación 32).

$$\log_{10} PGA = (-0.25 + 0.325M_w - 0.00608H) + (-0.0125 + 0.00126M_w - 0.00005H)R + (-0.00429 - 0.00672M_w + 0.00135H)\log R, \quad (32)$$

donde $\log_{10} PGA$ es la aceleración máxima del terreno (cm/s^2), M_w es la magnitud de momento sísmico, R es la distancia hipocentral y H es la profundidad.

Las predicciones de aceleración máxima de estos modelos se compararon con las predicciones de las ecuaciones obtenidas en esta investigación empleando un sismo para cada trayectoria, adicional a los usados para la obtención de las relaciones de atenuación.

Los criterios seleccionados para evaluar el ajuste de los modelos fue el promedio de la diferencia entre los valores observados y predichos del modelo, donde un valor cercano a cero indica un mejor ajuste y la desviación estándar como medida de dispersión, a menor desviación, menor dispersión de los datos (Villalobos-Escobar et al., 2023).

5.5.1. Trayectoria Jalisco/Colima – Querétaro

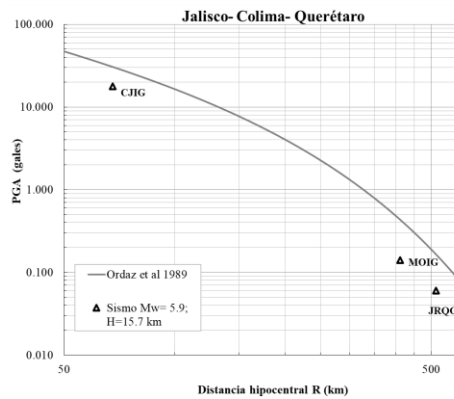
En la Tabla 5.12 se indican los valores de aceleración en cm/s^2 observados y predichos para cada uno de los modelos empleados en la comparación.

Tabla 5.12 Aceleraciones máximas, PGA, para la trayectoria Jalisco/Colima – Querétaro.

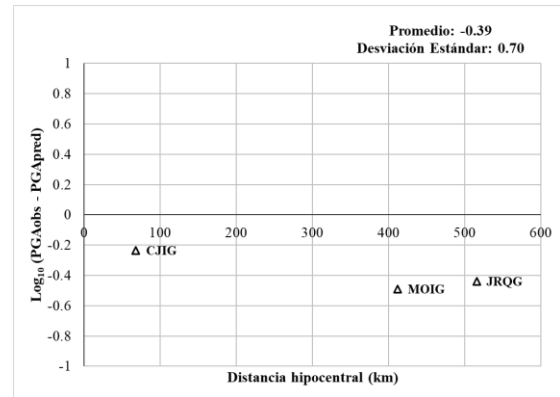
H (km)	M_w	R (km)	Estaciones	PGA_{obs}	Ordaz et al., (1989)	García (2006)	Esta investigación
15.7	5.9	67.91	CJIG	17.91	30.73	19.03	12.01
		411.91	MOIG	0.14	0.43	0.22	0.18
		515.96	JRQG	0.06	0.17	0.07	0.06

Nota: H indica la profundidad del sismo; M_w la magnitud de momento sísmico; R la distancia hipocentral.

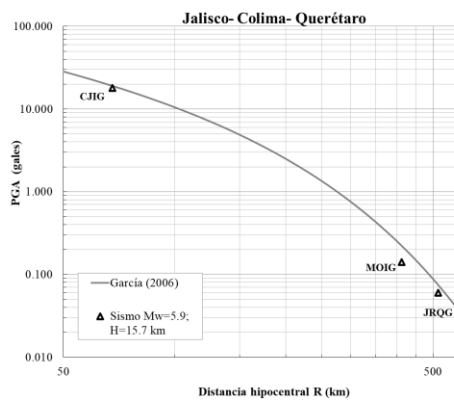
En la Figura 5.9 se presenta en la parte izquierda las gráficas de atenuación con los PGA observados, triángulos y PGA predichos, líneas, en función de la distancia hipocentral. En la parte derecha se muestran las gráficas de los residuales correspondientes a los modelos en comparación.



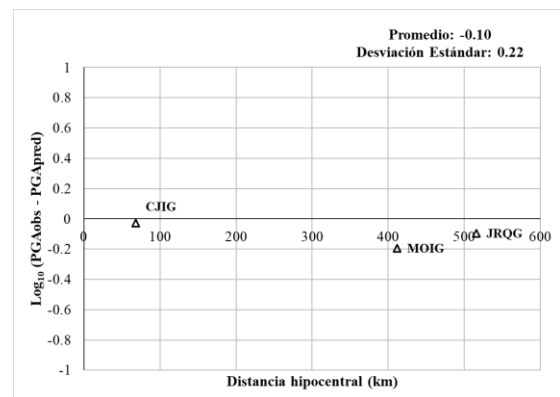
a) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo de Ordaz et al., (1989)



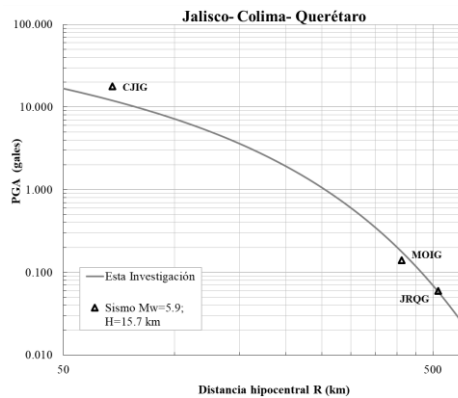
b) Análisis de residuos con respecto al modelo de Ordaz et al., (1989)



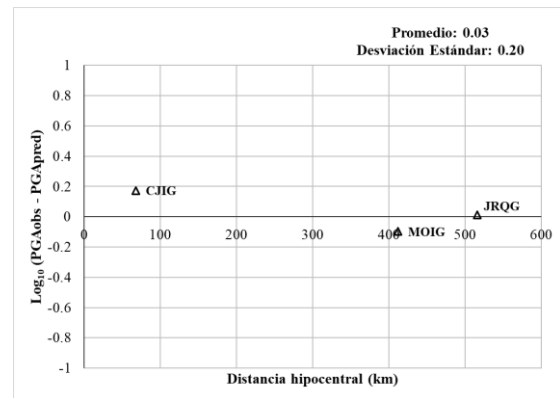
c) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo de García (2006)



d) Análisis de residuos con respecto al modelo de García (2006)



e) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo desarrollado en esta investigación.



f) Análisis de residuos con respecto al modelo desarrollado en esta investigación.

Figura 5.9 Comparación de modelos para la trayectoria Jalisco/Colima- Querétaro.

Evaluando el comportamiento de los modelos de atenuación bajo las condiciones de este estudio, se observa que el modelo de Ordaz et al., (1989) tiende a sobrestimar las aceleraciones a lo largo de las distancias hipocentrales consideradas, mostrando además una atenuación más pronunciada a partir de los 400 km. Este comportamiento se refleja en el análisis de residuos donde se observa una disminución progresiva con la distancia, lo que sugiere que las premisas del modelo presentan limitaciones para capturar adecuadamente la disipación de energía a grandes distancias para los eventos específicos de esta región.

Por otro lado, las estimaciones de PGA del modelo de García (2006) muestran una convergencia cercana con los valores observados en el rango de 100 km o menos; sin embargo, a partir de esa distancia se observa un decaimiento más acelerado de lo previsto. Esta tendencia podría estar vinculada a que el ajuste original del modelo priorizó registros de corta distancia, lo que condicionaría su representatividad en zonas más alejadas de la fuente sísmica.

En contraste, el modelo propuesto en esta investigación subestima ligeramente las aceleraciones para distancias menores a 100 km, pero muestra coherencia notable con las observaciones entre 100 y 500 km, es decir, representa adecuadamente el decaimiento de la aceleración del movimiento del terreno a distancias intermedias. Asimismo, este modelo

presenta menor desviación estándar y un promedio de residuos cercano a cero, lo que sugiere un mejor ajuste global y una mayor capacidad predictiva bajo el escenario evaluado.

5.5.2. Trayectoria Michoacán – Querétaro

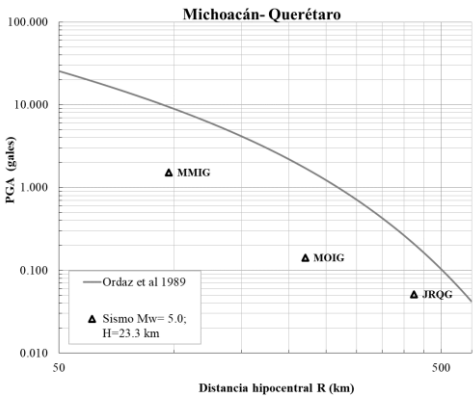
En la Tabla 5.13 se presentan los valores de aceleración en cm/s^2 observados y predichos para cada uno de los modelos.

Tabla 5.13 Comparación de aceleración máxima (PGA) para la trayectoria Michoacán – Querétaro.

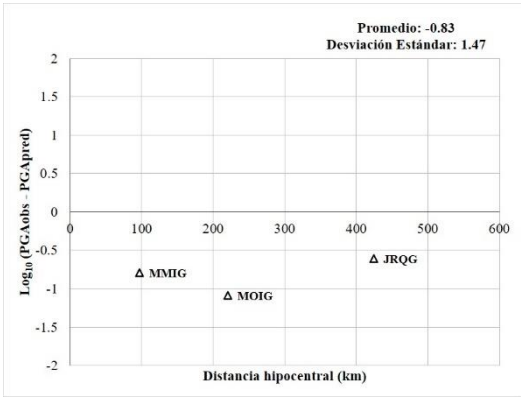
H (km)	Mw	R (km)	Estaciones	PGA _{obs}	Ordaz et al. (1989)	García (2006)	Esta investigación
23.3	5.0	96.93	MMIG	1.53	9.40	4.34	3.02
		220.22	MOIG	0.14	1.72	0.66	0.46
		424.29	JRQG	0.05	0.21	0.06	0.03

Nota: H indica la profundidad del sismo; Mw la magnitud de momento sísmico; R la distancia hipocentral.

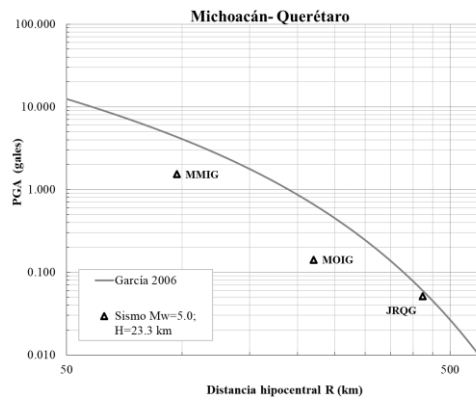
En la Figura 5.10 se presentan las gráficas de atenuación con los PGA observados, así como los estadísticos de prueba empleados para su comparación.



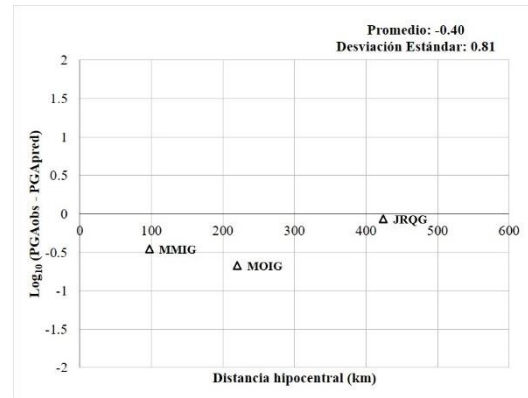
a) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo de Ordaz et al., (1989)



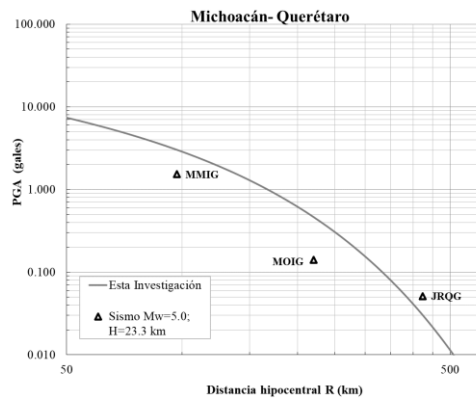
b) Análisis de residuos con respecto al modelo de Ordaz et al., (1989)



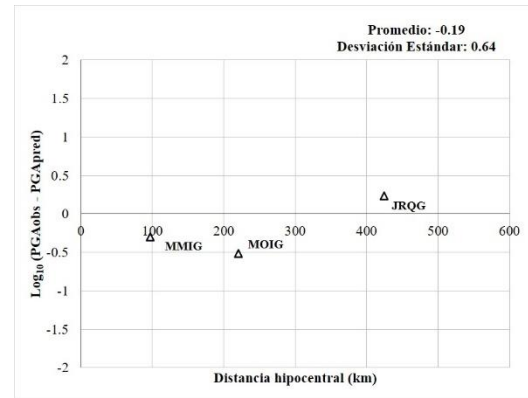
c) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo de García (2006)



d) Análisis de residuos con respecto al modelo de García (2006)



e) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo desarrollado en esta investigación



f) Análisis de residuos con respecto al modelo desarrollado en esta investigación

Figura 5.10 Comparación de modelos para la trayectoria Michoacán- Querétaro.

Del análisis de las gráficas de atenuación, se observa que las aceleraciones predichas por los tres modelos tienden a sobrestimar el PGA observado en los primeros 400 km de distancia. Es necesario considerar que estas discrepancias pueden estar influenciadas por las diferencias en las metodologías y conjuntos de datos empleados en la formulación de cada modelo. Bajo este contexto, el modelo de Ordaz et al., (1989) muestra una tendencia a la sobrestimación a lo largo de la distancia hipocentral analizada, sugiriendo una atenuación

menos pronunciada respecto a la observada. Por su parte, el modelo de García (2006) presenta estimaciones superiores a las observadas hasta los 400 km aproximadamente, para luego mostrar una convergencia más clara con los datos.

El modelo desarrollado en esta investigación sobrestima las aceleraciones antes de los 400 km y las subestima a distancias mayores, como se parecía en la estación JRQG. No obstante, dentro de los marcos comparativos establecidos, este modelo muestra la menor desviación estándar y un promedio de residuales más cercano a cero.

Si bien, con el modelo desarrollado en esta investigación se pueden obtener estimaciones de PGA con una mejor aproximación con respecto a los modelos antes mencionados, es necesario abundar más sobre la discrepancia que existe en la sobre estimación de los resultados. Al incluir directamente el factor de la frecuencia en el modelo se podría buscar corregir las estimaciones de PGA, tomando como referencia el estudio realizado por Cruz-Jiménez et al., (2009), donde a frecuencias mayores la atenuación es menor a diferencia de frecuencias menores.

5.5.3. Trayectoria Guerrero – Querétaro

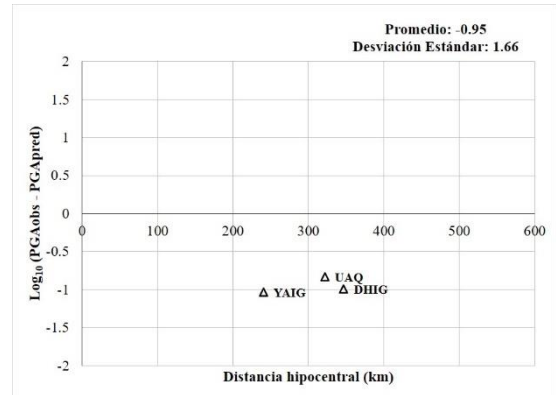
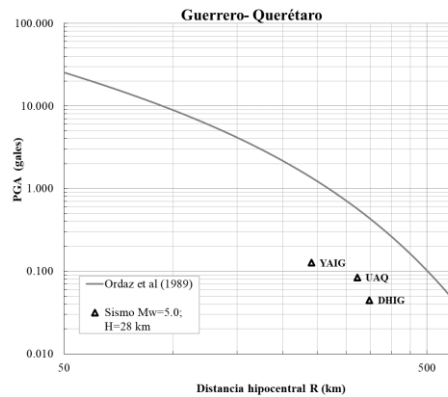
En la Tabla 5.14 se presentan los valores de aceleración en cm/s^2 observados y predichos para cada uno de los modelos.

Tabla 5.14 Comparación de aceleración máxima (PGA) para la trayectoria Guerrero – Querétaro.

H (km)	Mw	R (km)	Estaciones	PGA _{obs}	Ordaz et al., (1989)	García (2006)	Clemente et al., (2012)	Esta investigación
28.0	5.0	240.24	YAIG	0.13	1.36	0.50	0.41	0.27
		321.53	UAQ- CH	0.08	0.57	0.18	0.12	0.10
		346.74	DHIG	0.04	0.44	0.14	0.08	0.08

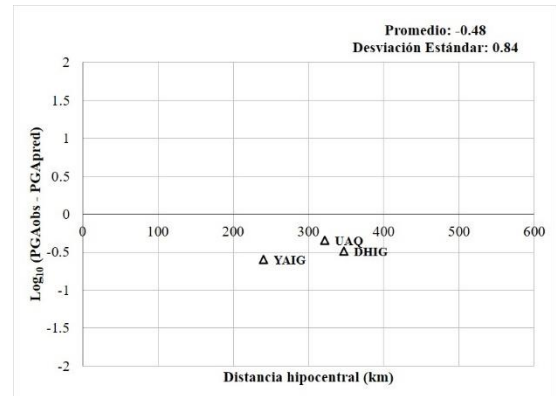
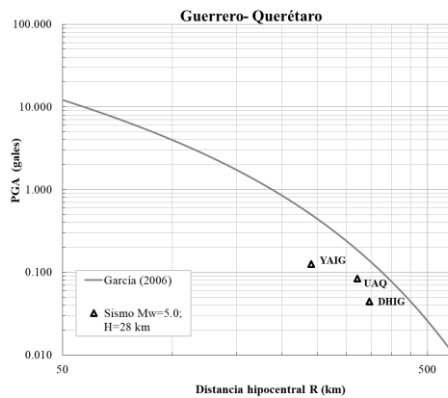
Nota: H indica la profundidad del sismo; Mw la magnitud de momento sísmico; R la distancia hipocentral.

En la Figura 5.11 se presentan las gráficas de atenuación con los PGA observados, así como los estadísticos de prueba empleados para su comparación.



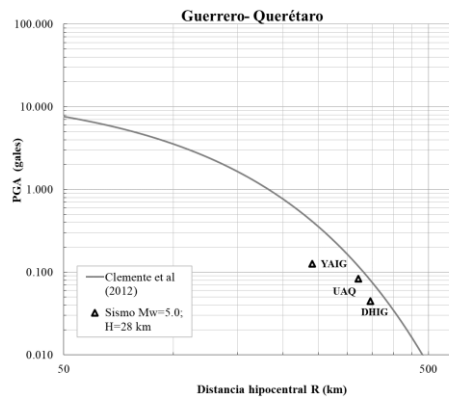
a) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo de Ordaz et al., (1989)

b) Análisis de residuos con respecto al modelo de Ordaz et al., (1989)

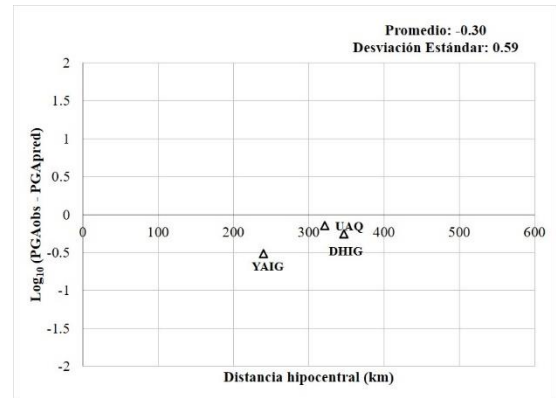


c) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo de García (2006)

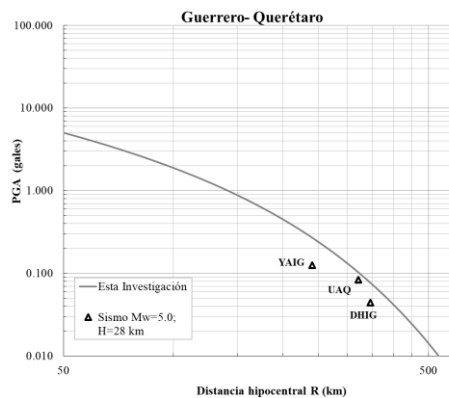
d) Análisis de residuos con respecto al modelo de García (2006)



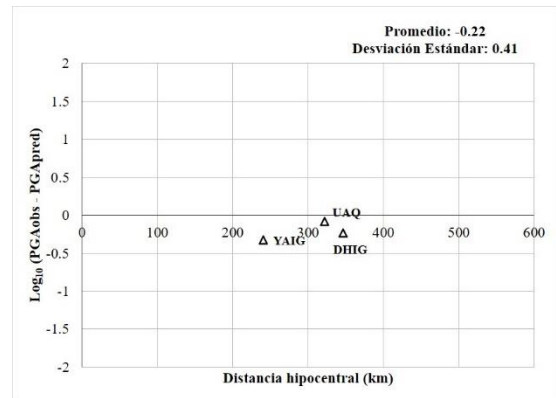
e) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo de Clemente et al., (2012)



f) Análisis de residuos con respecto al modelo de Clemente et al., (2012)



g) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo desarrollado en esta investigación



h) Análisis de residuos con respecto al modelo desarrollado en esta investigación.

Figura 5.11 Comparación de modelos para la trayectoria Guerrero- Querétaro.

Al comparar los valores de PGA estimados con los observados, se observa que los modelos de Ordaz et al., (1989) y García (2006) muestran una tendencia a sobrestimar la aceleración en el rango de distancias analizado. Este comportamiento se refleja en el análisis de residuos de PGA, en el cual se presenta una disminución de los residuales con el incremento de la distancia. Por su parte, los modelos de Clemente et al., (2012) y el propuesto en esta investigación también sobrestiman las aceleraciones, aunque muestran una menor dispersión de los datos dentro del marco del análisis residual realizado.

5.5.4. Trayectoria Oaxaca – Querétaro

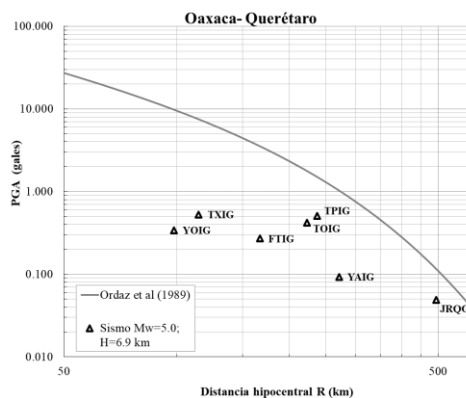
Por último, en la Tabla 5.15 se presentan los valores de aceleración en cm/s^2 observados y predichos para cada uno de los modelos.

En la Figura 5.12 se muestran las gráficas de atenuación con los PGA observados, así como los estadísticos de prueba empleados para su comparación.

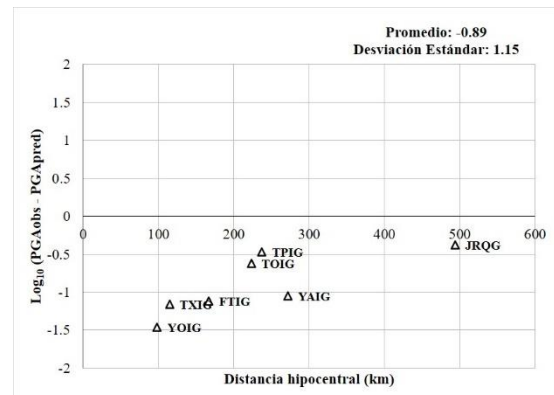
Tabla 5.15 Comparación de aceleración máxima (PGA) para la trayectoria Oaxaca – Querétaro.

H (km)	Mw	R (km)	Estaciones	PGA _{obs}	Ordaz et al. (1989)	García (2006)	Clemente et al. (2012)	Esta investigación
6.9	5.1	98.44	YOIG	0.34	9.81	5.22	5.18	2.79
		114.62	TXIG	0.53	7.51	3.91	4.10	2.16
		166.94	FTIG	0.27	3.55	1.73	1.93	1.06
		223.20	TOIG	0.42	1.78	0.80	0.86	0.56
		237.23	TPIG	0.51	1.51	0.67	0.70	0.48
		271.83	YAIG	0.09	1.03	0.43	0.43	0.34
		493.63	JRQG	0.05	0.12	0.04	0.02	0.05

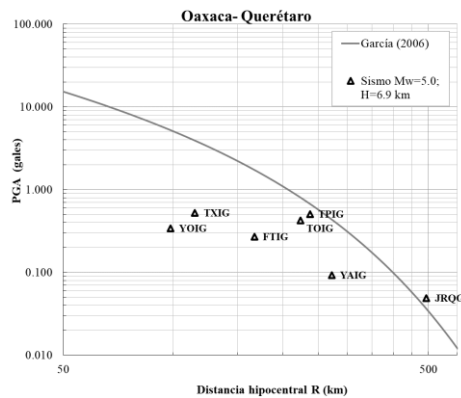
Nota: H indica la profundidad del sismo; Mw la magnitud de momento sísmico; R la distancia hipocentral.



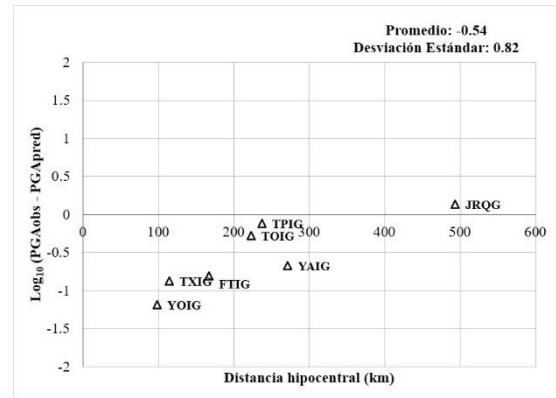
a) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo de Ordaz et al., (1989)



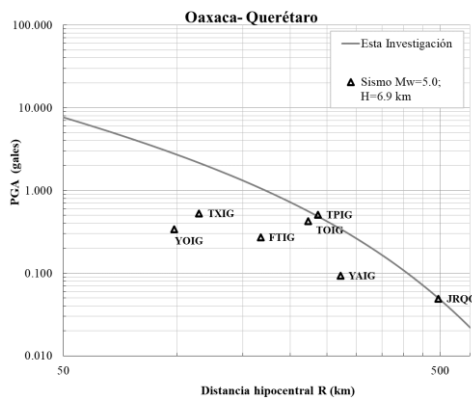
b) Análisis de residuos con respecto al modelo de Ordaz et al., (1989)



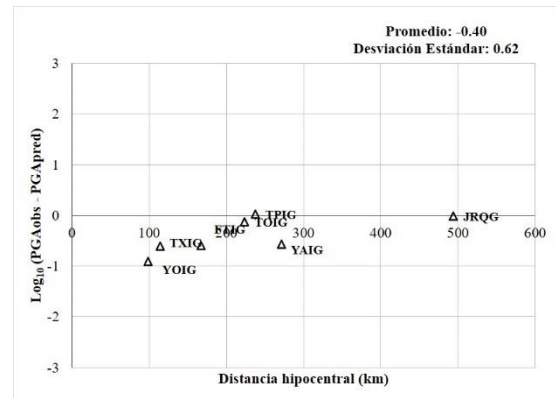
c) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo de García (2006)



d) Análisis de residuos con respecto al modelo de García (2006)



e) Atenuación de ondas sísmicas comparadas con el modelo desarrollado en esta investigación.



f) Análisis de residuos con respecto al modelo desarrollado en esta investigación.

Figura 5.12 Comparación de modelos para la trayectoria Oaxaca- Querétaro.

Al analizar el comportamiento de cada modelo de forma individual frente a los datos observados, se aprecia que la curva de atenuación correspondiente al modelo de Ordaz et al., (1989) tiende a sobrestimar la aceleración en distancias menores a 500 km. El modelo de García (2006) muestra una tendencia a la sobrestimación en distancias menores a 450 km y tiende a subestimarla a mayores distancias. Finalmente, bajo las condiciones de este análisis, el modelo desarrollado en esta investigación muestra la menor desviación estándar y un promedio de residuos cercano a cero, lo que sugiere un mejor ajuste respecto a los datos observados.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con los resultados obtenidos en esta investigación se puede comprobar que se cumplió la hipótesis establecida, así como los objetivos generales y particulares planteados inicialmente.

Esto debido a que se desarrollaron cuatro relaciones de atenuación que permiten estimar la aceleración máxima del movimiento del terreno en roca, PGA, en la Ciudad de Querétaro a partir de sismos con epicentros en la zona de subducción mexicana que se presentaron desde el año 2011 hasta 2022. Estas permiten estimar el PGA con sobre y subestimaciones de ± 1.44 , ± 1.81 , ± 2.01 , ± 1.91 para eventos con epicentros en Jalisco-Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca.

Al momento de validar los modelos obtenidos en esta investigación a partir de las gráficas de atenuación presentadas en el apartado de resultados, se logra observar que las aceleraciones máximas del movimiento del terreno se encuentran sobreestimadas en las distancias graficadas. Esto puede ser causado por la complejidad del terreno existente en la FVTM debido a que en ella interactúan múltiples procesos tectónicos, volcánicos y estructurales (Gómez-Tuena, et al., 2005). Otra causa puede ser la cantidad de datos empleados en esta investigación.

La complejidad del terreno puede ser abordada, en futuras investigaciones, a partir de variables no consideradas directamente en los modelos presentados en este trabajo; como puede ser la frecuencia en la cual se registraron las amplitudes máximas de los sismos, debido a que esta afecta directamente en la atenuación sísmica.

Los modelos empleados para comparar los propuestos en esta investigación fueron desarrollados a partir de una cantidad diferente de datos. La relación de atenuación sísmica propuesta por Ordaz et al., (1989) se basa en datos de 16 sismos con magnitudes entre 5.2 y 7.4 Mw; la de García (2006) a partir de datos de 40 sismos con un rango de magnitudes entre 5 y 8 Mw; la de Clemente et al., (2012) a partir de 3 eventos sísmicos con magnitudes entre 5.2 y 6.6 Mw. Mientras que en este trabajo se emplearon 5 eventos sísmicos con magnitudes

entre 5.3 y 5.9 Mw para la relación de atenuación sísmica de Jalisco- Colima; 7 sismos con magnitudes entre 5 y 7.7 Mw para la relación de atenuación sísmica de Michoacán; 21 sismos con magnitudes entre 5 y 7.5 Mw para la relación de atenuación sísmica de Guerrero y 18 eventos sísmicos con magnitudes entre 5 y 7.2 Mw para la relación de atenuación de Oaxaca.

A pesar de la diferencia de datos presentada en esta investigación, en comparación relativa con los modelos de atenuación antes mencionados, la desviación estándar de los residuos en las relaciones de atenuación de esta investigación es menor. No obstante, como se mencionó anteriormente, al incluir variables adicionales se pueden obtener modelos que puedan representar valores de aceleración más aproximados.

Al realizar el análisis por trayectorias particulares, además de reducir la desviación estándar de los residuos, se determinó cuál es la aceleración máxima promedio esperada en la Ciudad de Querétaro, la cual resultó ser de 0.09 cm/s^2 para sismos en Colima, 0.67 cm/s^2 para sismos de Michoacán, 0.37 cm/s^2 para sismos en Guerrero y 0.13 cm/s^2 para sismos en Oaxaca en contraste con las estimadas que eran de 0.25 cm/s^2 y 0.11 cm/s^2 para sismos en Colima con los modelos de Ordaz et al., (1989) y García (2006); 0.80 y 0.71 cm/s^2 para sismos en Michoacán con los modelos de Ordaz et al., (1989) y García (2006); 0.42 , 0.23 y 0.35 cm/s^2 para sismos en Guerrero con los modelos de Ordaz et al., (1989), García (2006) y Clemente et al., (2012) y finalmente 0.11 y 0.06 cm/s^2 para sismos en Oaxaca con los modelos de Ordaz et al., (1989) y García (2006).

A partir de estos resultados de aceleración máxima del suelo en Querétaro, en comparación con la escala de Mercalli modificada, se puede intuir por qué los sismos presentados en Michoacán pueden ser perceptibles para las personas, sobre todo cuando se encuentran en pisos superiores de los edificios.

Este trabajo puede ser empleado en conjunto con otras disciplinas para evaluar el peligro sísmico en la zona de estudio. En futuras investigaciones se podrían realizar relaciones de atenuación para zonas con estratos diferentes al rocoso además de incluir de manera directa la variable de frecuencia en los modelos, para lograr tener estimaciones de aceleración máxima del suelo más aproximadas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Aki, K. y Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology*.
- Anderson, D. L., y Archambeau, C. B. (1964). The anelasticity of the earth. *Journal of Geophysical Research*, 69(10), 2071–2084.
- Arroyo, D., García, D., Ordaz, M., Mora, M. A., y Singh, S. K. (2010). Strong ground-motion relations for Mexican interplate earthquakes. In *Journal of Seismology* (Vol. 14, Issue 4, pp. 769–785). <https://doi.org/10.1007/s10950-010-9200-0>
- Arroyo, D., Ordaz, M., y Singh, S. K. (2016). Prediction of Fourier Amplitude Spectrum of Ground Motion in Mexico City from Subduction Thrust Earthquakes. *Geofísica Internacional*, 63(1).
- Boore, D. M. (2005). On pads and filters: Processing strong-motion data. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 95, Issue 2, pp. 745–750). <https://doi.org/10.1785/0120040160>
- Boore, D. M., Gibbs, J. F., Joyner, W. B., Tinsley, J. C., y Ponti, D. J. (2003). Estimated ground motion from the 1994 Northridge, California, earthquake at the site of the Interstate 10 and La Cienega Boulevard bridge collapse, West Los Angeles, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6), 2737–2751.
- Boore, D. M., Joyner, W. B., Fumal, T. E., Report, U. S. G. S. O., y Park, M. (1993). Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: an Interim Report Part 2. In *USGS Open-File Report*.
- Boore, D. M., Watson-Lamprey, J., y Abrahamson, N. A. (2006). Orientation-independent measures of ground motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4A), 1502–1511.
- Bravo, S. F. J. (2019). *Procesamiento de Datos en SAC*. https://www.ucursos.cl/ingenieria/2019/1/GF7666/1/material_docente/bajar?id=2637746&bajar=1
- Campbell, K. (1981). Near-source attenuation of peak horizontal acceleration. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 71, Issue 6, pp. 2039–2070). <http://www.bssaonline.org/content/71/6/2039.short>
- Carrillo, E., Pérez, J. y Martínez, R. (2015). Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos. *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica*, 18–20.

- CFE. (2015). *Manual de Diseño de obras civiles. Diseño por sismo* (I. de I. Eléctricas (ed.)).
- Clemente-Chávez, A., Figueroa-Soto, A. (2018). Diferencias de Atenuación Sísmica sobre el Cinturón Volcánico Mexicano (MVB); un estudio de la Sismicidad de Subducción por Trayectorias hacia la Zona del MVB. *Memorias de Reunión Anual Unión Geofísica Mexicana, RAUGM*, 38, 145.
- Clemente-Chavez, A., Zúñiga, F. R., Lermo, J., Figueroa-Soto, A., Valdés, C., Montiel, M., Chavez, O., y Arroyo, M. (2014). On the behavior of site effects in central Mexico (the Mexican volcanic belt--MVB), based on records of shallow earthquakes that occurred in the zone between 1998 and 2011. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(6), 1391–1406.
- Clemente Chávez, A., Moisés Arroyo, G., Zúñiga, R., Figueroa, Á., Pérez, M. A., y López, C. S. (2012). Relación de atenuación del movimiento del suelo para la aceleración máxima (PGA) sobre el Cinturón Volcánico Mexicano (MVB); análisis por trayectoria: Guerrero-Querétaro. *Ingeniería Sísmica*, 87, 67–93.
- Contreras Luarte, V. A. (2009). *Curvas de atenuación espectrales para sismos chilenos*.
- Cruz-Jiménez, H., Chávez-García, F. J., y Furumura, T. (2009). Differences in attenuation of ground motion perpendicular to the Mexican subduction zone between Colima and Guerrero: An explanation based on numerical modeling. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 99, Issue 1, pp. 400–406).
<https://doi.org/10.1785/0120080167>
- de la Blanca, G. A., Sánchez, F. V., Stich, D., Pérez, F. de L. M., Comino, J. A. L., Soto, J. M., y Bernal, M. N. (2012). Parámetros de la fuente y del movimiento del suelo del terremoto de Lorca de 2011/Source and ground-motion parameters of the 2011 Lorca earthquake. *Física de La Tierra*, 24, 41.
- Dziewonski, A. M., Chou, T. A., y Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity. In *Journal of Geophysical Research* (Vol. 86, Issue B4, pp. 2825–2852).
<https://doi.org/10.1029/JB086iB04p02825>
- Earth, G. (2026). *Versión Nocturna [Mapa online]*.

<https://earth.google.com/web/@24.72504406,99.71514145,414.86258967a,4089587.03356326d,35y,0h,0t,0r/data=CiQSIhIgMGY3ZTJkYzdIOGExMTFINjk5MGQ2ZjgxOGQ2OWE2ZTc?hl=es>

- Ekström, G., Nettles, M., y Dziewoński, A. M. (2012). The global CMT project 2004--2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 200, 1–9.
- Ferrari, L. (2000). Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 53(1), 84–92. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2000v53n1a5>
- Figueroa-Soto, A., Pertón, M., Gómez-Vasconcelos, M.G., Mendoza-Ponce, A., Jara, J.M., Ávila-Olivera, J.A., Belmonte-Jiménez, S.I., and Sawires, R. (2025). Seismic Site Response using Microtremor Observations in Morelia, Michoacán, México. *Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00024-025-03776-1>
- Figueroa, A., Clemente-Chávez, A., y Zúñiga, R. (2010). Deconvolución de sismogramas digitales y determinación del ruido sísmico para el sismógrafo Trillium 120 instalado en el campus Juriquilla de la UNAM, Bol-e Órgano de comunicación electrónica del Centro de Geociencias de la UNAM, 6. *Bol-e Órgano de Comunicación Electrónica Del Centro de Geociencias de La UNAM*, 6(1).
- Franco, S. I., Iglesias, A., y Fukuyama, E. (2020). Moment tensor catalog for Mexican earthquakes: almost two decades of seismicity. *Geofísica Internacional*, 59(2), 54–80.
- García-Soto, A. D., y Jaimes, M. A. (2017). Ground-motion prediction model for vertical response spectra from Mexican interplate earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(2), 887–900.
- García, J. D. (2001). Atenuación sísmica. Aplicación a terremotos intraplaca en México Central. *Trabajo de Investigación Para Obtener El Grado de Doctorado*.
- García Jiménez, D. (2006). *Estimación de parámetros del movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en México Central*.
- Goldstein, P., y Snoke, A. (2005). SAC availability for the IRIS community. *Incorporated Research Institutions for Seismology Newsletter*, 7(UCRL-JRNL-211140).
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T., y Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la

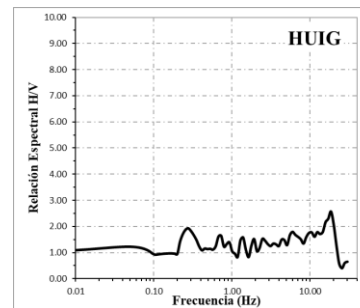
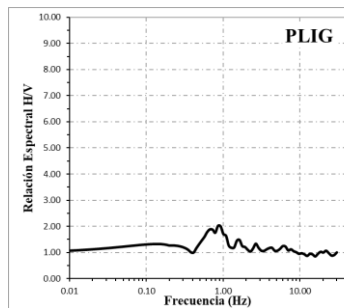
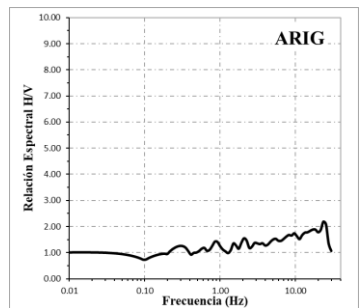
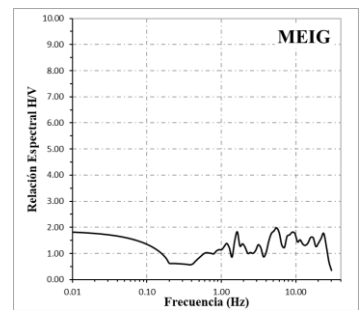
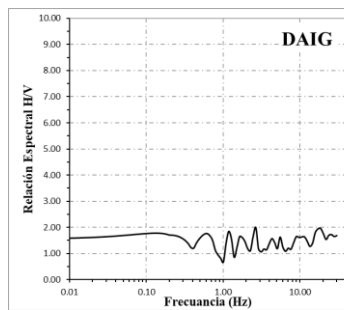
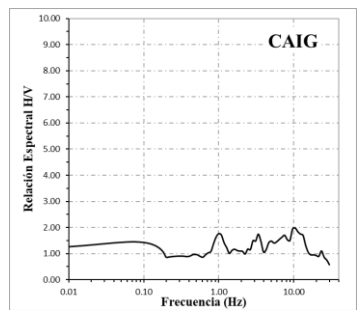
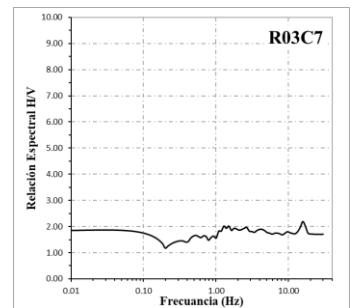
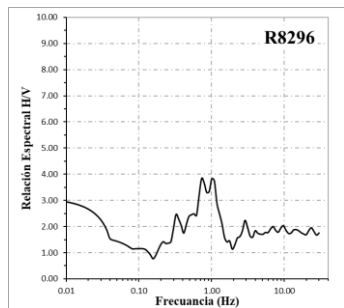
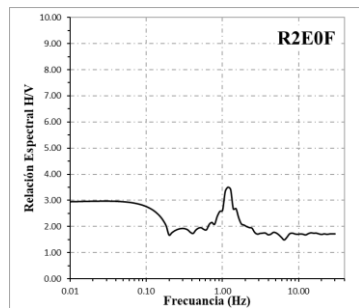
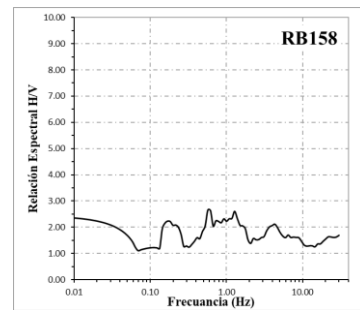
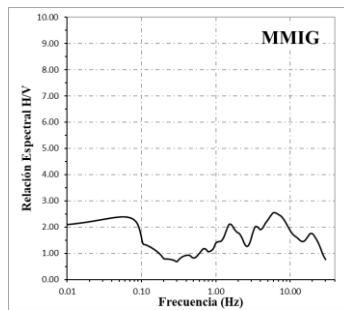
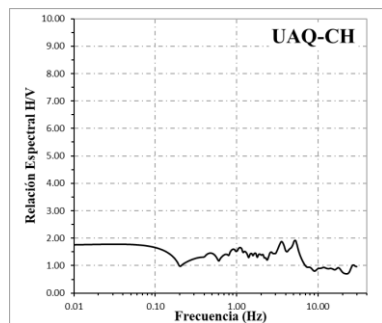
- Faja Volcánica Transmexicana. In *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* (Vol. 57, Issue 3, pp. 227–283). <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a2>
- Havenith, H.-B., et al. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation*.
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*.
<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Infante-Gil, S., y de Lara, G. P. Z. (2012). Métodos estadísticos, un enfoque interdisciplinario. 3ra. *Editorial Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. De México*.
- Jaimes, M. A., y García-Soto, A. D. (2020). Updated ground motion prediction model for Mexican intermediate-depth intraslab earthquakes including V/H ratios. *Earthquake Spectra*, 36(3), 1298–1330.
- Jeronimo Garcia, A. G., et al. (2016). *Parámetros de diseño sísmico para algunos estados del pacífico mexicano: Michoacán, Guerrero y Oaxaca*. Universidad Autónoma Metropolitana (México). Unidad Azcapotzalco~....
- Knopoff, L. (1964). *Q. Rev. Geophys. Space Phys.*, 2, 625–660.
- Konno, K., y Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 228–241.
- Kostoglodov, Vladimir y Pacheco, J. F. (1999). *Cien años de Sismicidad en México*.
<https://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html#:~:text=La longitud de la ruptura,de su zona de contacto>.
- Lermo, J., y Chávez-García, F. J. (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(5), 1574–1594.
- López-Castañeda, A. S., y Reinoso, E. (2021). Strong-motion duration predictive models from subduction interface earthquakes recorded in the hill zone of the Valley of Mexico. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 144, 106676.
- Martínez- Rivera, J. M., et al. (2022). *Análisis de los Efectos de Sitio de Sismos Corticales en el Eje Neovolcánico*.
- Miller, M. (2014). *Mecanismo focal*.
- NGDC. (2022). *Magnetic Field Calculators*.

- <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/calculators/magcalc.shtml#declination>
- Okal, E. A. (2021). Earthquake, focal mechanism. In *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics* (pp. 236–241). Springer.
- Ordaz, M., Jara, J. M. y Sing, S. K. (1989). Riesgo sísmico y espectros de diseño en el Estado de Guerrero, Informe Conjunto del II-UNAM y el Centro de Investigación Sísmica AC de la Fundación Barros Sierra al Gobierno del estado de Guerrero, Instituto de Ingeniería, UNAM, proyectos, 8782.
- Ordaz, M., y Krishna Singh, S. (1992). Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(1), 24–43.
- Ordaz, M., Salgado-Gálvez, M. A., y Giraldo, S. (2021). R-CRISIS: 35 years of continuous developments and improvements for probabilistic seismic hazard analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(7), 2797–2816.
- Ordoñez Sacapi, G. E., y Salazar Riera, M. V. (2023). *Elaboración de un manual de usuario del programa “RCrisis” y su aplicación en el caso de amenazas sísmicas en el cantón Quito, provincia Pichincha*.
- Pérez-Gavilán, J. J., Aguirre, J., y Ramirez, L. (2018). Seismicity and structural safety in buildings: lessons learned in Mexico. *Salud Pública de México*, 60(S1), 41–51.
- Pérez-Moreno, Luis Francisco, et al. (2018). *Análisis Bayesiano de leyes de atenuación sísmica para la región de la faja volcánica transmexicana*.
- Pérez-Moreno, L. F., Rodríguez-Pérez, Q., Zúñiga, F. R., Horta-Rangel, J., Pérez-Rea, M. de la L., y Pérez-Lara, M. A. (2021). Site response evaluation in the Trans-Mexican Volcanic Belt based on HVSR from ambient noise and regional seismicity. *Applied Sciences*, 11(13), 6126.
- Pérez, A. C. (2000). Atenuación de ondas Coda en Grecia. *Trabajo de Investigación Dentro Del Programa de Doctorado de Geodesia, Geofísica y Meteorología. Universidad Complutense de Madrid*.
- Perron, V., Gélis, C., Froment, B., Hollender, F., Bard, P.-Y., Cultrera, G., y Cushing, E. M. (2018). Can broad-band earthquake site responses be predicted by the ambient noise spectral ratio? Insight from observations at two sedimentary basins. *Geophysical*

- Journal International*, 215(2), 1442–1454.
- Richards, P. G., y Aki, K. (1980). *Quantitative seismology: theory and methods* (Vol. 859). Freeman San Francisco, CA.
- Rivas Nieto, C. A. P. et al. (2020). *Relación de atenuación de la aceleración máxima del terreno para sismos corticales en el Eje Neovolcánico*.
- Samaniego, J. F. L., Jaimes, M. A., Sesma, F. J. S., Sánchez, C. C., Jiménez, H. C., y Enriquez, J. O. C. (2020). Ground motion prediction model for southeastern México removing site effects using the Earthquake horizontal-to-vertical ratio (EHVSR). *Geofísica Internacional*, 59(4), 257–272.
- Scales, J. A. (1995). *Theory of seismic imaging* (Vol. 2). Springer-Verlag Berlin.
- Searle, S. R. (1997). *Linear models*, John Wiley and Sons Inc., Ithaca, N.Y.
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Sismología de México*.
<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>
- Shapiro, N. M., Campillo, M., Paul, A., Singh, S. K., Jongmans, D., y Sanchez-Sesma, F. J. (1997). Surface-wave propagation across the Mexican Volcanic Belt and the origin of the long-period seismic-wave amplification in the Valley of Mexico. *Geophysical Journal International*, 128(1), 151–166.
- Singh, S. K. (1994). Magnitude determination of Mexican earthquakes. *Geofísica Internacional*, 33(2), 189–198.
- SSN. (2026a). *Mapas de Sismicidad Anual*. <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/mapas-de-sismicidad-anual/>
- SSN. (2026b). *Sismo del 11 de Diciembre de 2022, Guerrero (M 6.0)*.
http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2022/SSNMX_rep_esp_20221211_Guerrero_M60.pdf
- SSN. (2026c). *Redes Sismológicas*. <http://www.ssn.unam.mx/acerca-de/estaciones/>
- SSN. (2026d). *Cátalo de Sismos*. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/10.21766/SSNMX/EC/MX>
- SSN. (2026e). *Magnitud de un Sismo*.
<http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/Magnitud-de-un-sismo.pdf>

- Stein S. y Wysession M. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure* (1st ed.). Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK.
- Suetsugu, D. (1997). Source mechanism practice. *Training Course in Seismology and Earthquake Engineering II. Japan International Cooperation Agency (JICA), Ibaraki-Ken*, 305, 13–48.
- Toksöz, M. N., y Johnson, D. H. (1981). Seismic wave attenuation: Society of Exploration Geophysicists. *Geophysics Reprint Series*, 2.
- Tovar, S. (2019). *Una aproximación a la explicación de los sismos a través del concepto de onda mecánica*. Universidad Pedagógica Nacional.
- USGS. (2017). *Advanced National Seismic System (ANSS) Comprehensive Catalog of Earthquake Events and Products*.
<https://www.sciencebase.gov/catalog/item/52eab950e4b0444d1ce67917>
- Villalobos-Escobar, G. P., Márquez-Ramírez, V. H., Castro, R. R., y Peña-Alonso, T. A. (2023). Empirical Ground-Motion Relations in Northeastern México from intraplate moderate earthquakes. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(3), 769–786.
- Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Cornou, C., Giulio, G. Di, Guillier, B., Ohrnberger, M., y Savvaidis, A. (2020). Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1878–1889.
- Youngs, R. R., Chiou, S.-J., Silva, W. J., y Humphrey, J. R. (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58–73.
- Zavala, N., Clemente-Chávez, A., Figueroa-Soto, Á., González-Martínez, M., and Sawires, R. (2021). Application of horizontal to Vertical Spectral Ratio microtremor technique in the analysis of site effects and structural response of buildings in Queretaro city, Mexico. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, 103211.
- Zúñiga, F.R., Suárez, G., Figueroa-Soto, Á. et al. (2017). A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation. *J. Seismol*, 21, 1295–1322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10950-017-9666-0>

ANEXO A. GRÁFICAS HVSR Y FRECUENCIAS FUNDAMENTALES DE SITIO



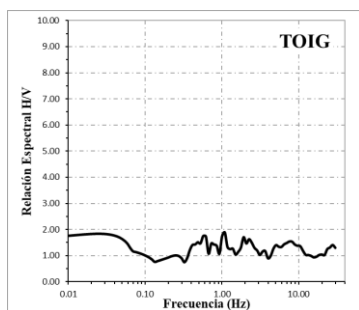
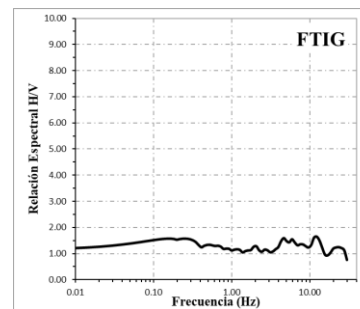
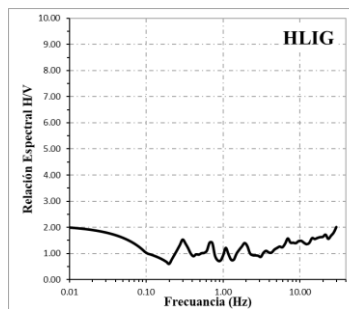
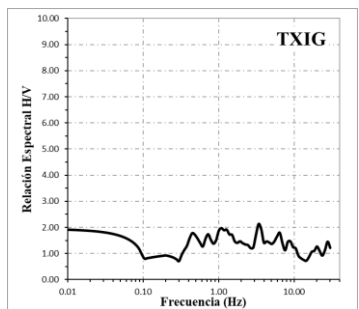
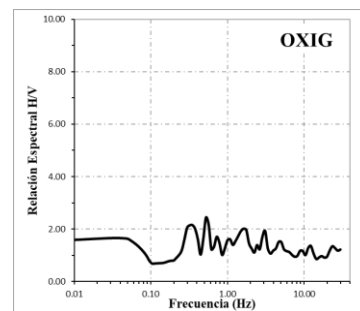
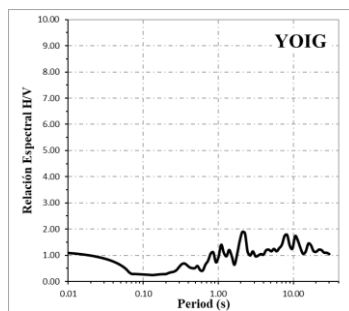
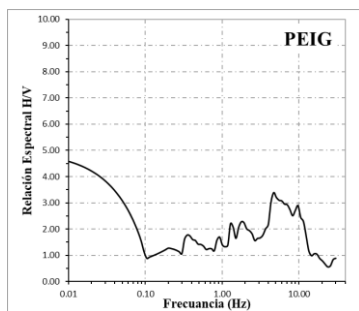


Tabla A.1 Estimación de los efectos de sitio de las estaciones sísmicas.

Estación	f_0	Clasificación de sitio	Bibliografía
	(Hz)		
ACIG	-	N	Pérez-Moreno et al., (2021)
ANIG	16.00	S	Martínez-Rivera et al., (2022).
ARIG	23.84	N	Elaboración Propia
CAIG	10.96	N	Elaboración Propia
CJIG	1.94	N	Clemente et al., 2014
DAIG	2.65	N	Elaboración Propia
DHIG	-	N	Martínez-Rivera et al., (2022).
FTIG	12.04	N	Elaboración Propia
HLIG	7.43	N	Elaboración Propia
HUIG	18.10	N	Elaboración Propia
IGIG	1.30	S	Martínez-Rivera et al., (2022).
JRQG	0.98	N	Martínez-Rivera et al., (2022).
MEIG	5.50	N	Elaboración Propia
MMIG	5.65	N	Elaboración Propia
MOIG	-	N	Martínez-Rivera et al., (2022).
OXIG	0.29	N	Elaboración Propia
PEIG	4.68	S	Elaboración Propia
PLIG	0.93	N	Elaboración Propia
PPIG	12.11	S	Martínez-Rivera et al., (2022).
RB158	0.62	N	Elaboración Propia
R03C7	15.91	N	Elaboración Propia
R2E0F	1.28	N	Elaboración Propia
R8296	0.78	N	Elaboración Propia
TOIG	1.19	N	Elaboración Propia
TPIG	-	N	Pérez-Moreno et al., (2021)
TXIG	3.61	N	Elaboración Propia
YAIG	0.7	N	Clemente et al., 2014
YOIG	2.16	N	Elaboración Propia
UAQ- CH	4.98	N	Elaboración Propia
UNM	-	N	Pérez-Moreno et al., (2021)

S= Efecto de sitio considerable; N= Efecto de sitio despreciable

ANEXO B. ACELERACIONES MÁXIMAS DEL TERRENO

En las siguientes tablas se presentan los resultados de aceleración obtenidos para cada una de las trayectorias. La información se encuentra organizada de la siguiente manera:

1. Número del evento sísmico
2. Fecha en UTC (Hora Universal Coordinada)
3. Hora en UTC
4. Distancia epicentral en km
5. Distancia hipocentral en km
6. Magnitud de momento sísmico M_w
7. Número de registros recopilados
8. Estaciones sísmicas del SSN de las que se obtuvieron los registros
9. Aceleración de la componente Este- Oeste en cm/s^2
10. Aceleración de la componente Norte- Sur en cm/s^2
11. Aceleración de la componente Vertical en cm/s^2
12. Media cuadrática de las aceleraciones máximas del terreno en cm/s^2

Tabla B-1. Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Jalisco- Colima.

No	Fecha UTC	Hora UTC	r (km)	R (km)	H (km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
1	20/02/2013	21:23:09	145.24	145.28	3.2	5.6	4	CJIG	-1.124	0.996	1.005	1.062
			417.20	417.21				JRQG	0.099	0.140	0.122	0.122
			299.61	299.63				MOIG	0.506	0.434	-0.303	0.471
			527.15	527.16				DHIG	-0.028	-0.023	-0.022	0.026
2	23/10/2016	22:59:29	74.26	75.48	13.5	5.6	4	CJIG	10.944	11.770	-9.102	11.364
			361.06	361.31				MOIG	0.139	-0.101	0.071	0.122
			468.92	469.11				JRQG	-0.050	0.055	0.051	0.053
			589.52	589.67				DHIG	-0.010	-0.013	0.014	0.012
3	09/02/2018	14:05:48	59.71	59.81	3.5	5.9	4	CJIG	9.719	-12.801	7.745	11.365
			470.19	470.20				JRQG	-0.124	-0.141	0.154	0.133
			365.00	365.02				MOIG	-0.244	0.277	0.161	0.261
			593.03	593.04				DHIG	-0.031	0.034	2.276	0.033
4	30/06/2018	03:56:49	66.07	67.91	15.7	5.9	3	CJIG	16.884	-18.885	-10.873	17.913
			515.72	515.95				JRQG	0.044	0.073	0.070	0.060
			411.61	411.91				MOIG	-0.105	0.168	-0.097	0.140
5	19/09/2022	19:30:42	518.59	518.62	6	5.3	3	DHIG	0.012	0.012	-0.014	0.012
			291.03	291.09				MOIG	0.204	-0.217	-0.146	0.211
			409.83	409.87				UAQ	-0.093	0.057	-0.051	0.077

Tabla B-2 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Michoacán

No	Fecha UTC	Hora UTC	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
1	11/04/2012	22:55:10	46.00	50.16	20	6.4	4	MMIG	106.729	97.494	-88.835	102.216
			252.29	253.08				MOIG	-3.420	3.951	2.347	3.695
			382.18	382.70				JRQG	-1.256	-1.309	-0.740	1.283
			468.18	468.61				DHIG	0.160	0.166	0.134	0.163
2	29/09/2015	15:02:15	94.09	96.93	23.3	5.0	3	MMIG	1.305	-1.723	-0.569	1.529
			218.98	220.22				MOIG	-0.124	-0.157	0.138	0.141
			423.65	424.29				JRQG	0.049	-0.053	0.087	0.051
3	17/07/2018	08:54:37	274.37	274.42	5.0	5.1	3	MOIG	0.213	-0.260	-0.198	0.237
			400.16	400.19				JRQG	-0.056	-0.058	0.051	0.057
			497.77	497.80				DHIG	0.008	-0.015	-0.016	0.012
4	19/04/2012	12:44:10	153.58	154.31	15.0	5.0	4	MMIG	0.472	0.538	-0.280	0.506
			199.38	199.94				MOIG	0.918	-2.321	1.076	1.765
			320.49	320.84				UAQ	0.128	0.161	-0.104	0.145
			382.20	382.49				DHIG	0.043	-0.033	-0.030	0.038
5	19/09/2022	18:05:09	250.82	251.27	15.0	7.7	5	MOIG	8.894	-7.799	-5.306	8.365
			375.02	375.32				UAQ	-1.844	-1.850	-1.910	1.847
			373.75	374.05				R03C7	3.291	3.402	2.027	3.347
			374.22	374.52				R2E0F	-8.602	9.720	2.525	9.178
			370.67	370.97				R8296	-5.253	-6.102	3.212	5.694

Tabla B-3 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Michoacán (Continuación)

No	Fecha UTC	Hora UTC	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
5	19/09/2022	18:05:09	375.41	375.71			3	RB158	5.273	4.659	-2.822	4.976
			412.33	412.60				TXMV	-2.177	-2.646	-8.171	2.423
			473.59	473.83				DHIG	0.784	-0.661	-0.578	0.725
6	20/09/2022	19:04:29	473.59	473.86	16	5.4	4	DHIG	0.015	0.023	-0.016	0.020
			252.24	252.75				MOIG	0.433	0.314	-0.304	0.378
			413.80	414.11				TXMV	0.056	-0.048	-0.304	0.052
			377.09	377.43				UAQ	-0.058	-0.073	0.053	0.066
7	22/09/2022	06:16:09	473.53	473.68	12	6.9	6	DHIG	0.296	0.339	0.288	0.318
			380.43	380.62				R2E0F	4.111	3.840	1.575	3.978
			376.36	376.55				R8296	3.267	4.781	1.644	4.095
			416.20	416.37				TXMV	0.908	-1.224	-4.716	1.077
			254.81	255.09				MOIG	-5.998	4.714	4.600	5.394
			380.52	380.71				UAQ	-0.988	1.418	-0.879	1.222

Tabla B-4 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Guerrero

No	Fecha UTC	Hora UTC	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
1	26/04/2011	11:07:28	163.86	164.06	8	5.2	7	ARIG	1.884	-2.362	-1.572	2.137
			51.44	52.06				CAIG	6.673	8.594	-6.783	7.694
			368.83	368.92				DHIG	-0.068	0.074	0.054	0.071
			266.67	266.79				UNM	0.672	-0.736	-0.439	0.705
			403.34	403.42				JRQG	0.186	0.197	-0.100	0.191
			124.27	124.53				MEIG	6.192	5.752	-5.713	5.976
			230.09	230.23				YAIG	1.521	1.699	0.737	1.612
2	05/05/2011	13:24:07	220.38	220.71	12	5.6	7	ARIG	-1.528	-1.602	1.517	1.566
			142.64	143.14				CAIG	1.936	-2.794	-1.659	2.403
			369.24	369.43				DHIG	-0.107	0.087	-0.070	0.098
			273.22	273.48				UNM	1.391	-1.073	0.656	1.242
			437.25	437.41				JRQG	0.166	0.217	0.137	0.193
			149.45	149.93				MEIG	5.857	8.193	-3.630	7.121
			225.80	226.12				YAIG	-2.080	-3.218	1.258	2.710
3	20/03/2012	18:02:48	276.41	277.00	18	7.5	4	ARIG	-13.869	-24.906	-18.617	20.158
			197.30	198.12				CAIG	-8.466	-9.796	-13.316	9.155
			407.75	408.15				DHIG	1.055	-0.945	-1.348	1.001
			486.50	486.83				JRQG	-1.260	1.457	-1.102	1.362

Tabla B-5 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Guerrero (Continuación)

No	Fecha UTC	Hora UTC	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
3	20/03/2012	18:02:48	237.10	237.78	18	7.5	2	PLIG	14.710	20.675	20.152	17.942
			266.92	267.53				YAIG	-23.717	-11.011	16.537	18.489
4	01/04/2012	22:23:48	255.88	256.66	20	5.3	7	ARIG	-0.215	-0.177	0.138	0.197
			181.9	183.00				CAIG	-0.232	0.309	-0.264	0.273
			386.68	387.20				DHIG	-0.022	0.022	-0.028	0.022
			293.34	294.02				UNM	0.180	0.244	0.134	0.215
			464.6	465.03				JRQG	-0.035	-0.044	0.039	0.040
			215.22	216.15				PLIG	0.223	0.253	-0.237	0.239
			245.4	246.21				YAIG	0.515	-0.312	-0.205	0.426
5	15/01/2013	19:20:27	464.47	464.63	12.1	5	8	JRQG	0.041	-0.038	-0.047	0.040
			257.87	258.15				ARIG	0.218	0.264	-0.204	0.242
			186.18	186.57				CAIG	0.219	-0.310	0.227	0.268
			384.83	385.02				DHIG	-0.020	0.017	0.017	0.019
			292.03	292.28				UNM	0.194	0.212	0.133	0.204
			182.53	182.93				MEIG	-0.932	0.854	0.489	0.894
			215.37	215.71				PLIG	-0.295	0.366	0.340	0.332
			244.08	244.38				YAIG	-1.019	-0.618	-0.391	0.842
6	05/04/2013	01:58:48	125.86	126.77	15.2	5.2	7	ARIG	-4.135	3.838	3.592	3.989
			54.41	56.49				CAIG	4.670	-9.209	5.459	7.301
			365.03	365.35				DHIG	-0.111	-0.205	0.118	0.165
			361.22	361.54				JRQG	0.125	-0.160	0.145	0.144
			275.4	275.82				UNM	0.762	0.731	0.969	0.747
			144.14	144.94				MEIG	2.294	-2.689	2.712	2.499
			247.09	247.56				YAIG	-0.836	-0.946	-0.529	0.893
7	06/08/2013	20:17:30	457.69	458.13	20	5	7	JRQG	0.040	0.038	0.049	0.039
			248.08	248.88				ARIG	0.329	-0.311	0.219	0.321
			174.46	175.60				CAIG	-0.208	-0.360	0.186	0.294
			381.18	381.70				DHIG	0.029	0.038	-0.028	0.034
			173.8	174.95				MEIG	0.897	-0.922	0.575	0.910
			208.18	209.14				PLIG	0.323	0.320	-0.297	0.321
			239.44	240.27				YAIG	1.152	1.028	-0.394	1.092
8	16/08/2013	15:33:00	250.31	250.91	17.4	5.1	5	ARIG	-0.515	0.449	0.406	0.483
			177.22	178.07				CAIG	0.493	-1.086	-0.636	0.843
			381.89	382.29				DHIG	-0.054	0.093	-0.080	0.076
			459.17	459.50				JRQG	0.085	0.075	-0.104	0.080
			175.75	176.61				MEIG	1.326	-1.378	0.886	1.352

Tabla B-6 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Guerrero (Continuación)

No	Fecha UTC	Hora UTC	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
8	16/06/2013	15:33:00	209.75	210.47	17.4	5.1	2	PLIG	0.506	-0.544	-0.492	0.525
			240.38	241.01				YAIG	-2.219	0.858	0.717	1.682
9	06/10/2013	15:10:56	147.36	147.44	5	5.1	6	ARIG	-1.122	1.095	0.849	1.109
			27.29	27.74				CAIG	16.542	15.563	-11.791	16.060
			363.61	363.64				DHIG	-0.022	0.027	0.031	0.024
			389.18	389.21				JRQG	-0.042	0.047	0.041	0.044
			167.93	168.00				PLIG	0.290	-0.298	-0.282	0.294
			228.74	228.79				YAIG	0.328	-0.347	-0.191	0.338
10	18/04/2014	14:27:21	119.34	120.69	18	7.1	7	CAIG	-57.951	-39.908	-40.906	49.754
			408.71	409.11				DHIG	0.958	-1.047	-0.951	1.004
			382.97	383.39				JRQG	-3.164	3.342	-2.068	3.254
			205.52	206.31				MEIG	24.564	19.559	-20.069	22.203
			325.35	325.85				UNM	18.656	17.907	10.161	18.285
			239.65	240.33				PLIG	16.443	27.122	22.087	22.428
			302.63	303.16				YAIG	7.441	-10.068	5.381	8.852
11	19/04/2014	14:58:15	346.45	346.92	18	5.2	6	JRQG	0.087	0.102	0.074	0.095
			108.49	109.97				CAIG	0.497	0.608	-0.427	0.555
			372.69	373.12				DHIG	0.034	0.026	-0.033	0.030
			290.89	291.45				UNM	0.284	0.299	0.175	0.291
			208.77	209.54				PLIG	-0.294	0.273	0.245	0.283
			270.64	271.24				YAIG	-0.180	0.183	0.136	0.182
12	08/05/2014	17:00:14	141.38	141.73	10	6.5	7	ARIG	-23.263	28.324	-32.189	25.917
			65.18	65.94				CAIG	84.018	54.482	-48.644	70.807
			381.06	381.19				DHIG	0.702	0.688	0.833	0.695
			374.68	374.81				JRQG	-1.305	1.241	-0.989	1.273
			291.64	291.81				UNM	19.096	19.814	13.761	19.458
			199.40	199.65				PLIG	-7.101	-7.494	-6.862	7.300
			263.44	263.63				YAIG	-3.970	6.598	3.407	5.445
13	10/05/2014	07:36:00	135.39	135.76	10	5.9	8	ARIG	-7.131	-9.770	-6.431	8.553
			62.28	63.08				CAIG	6.288	-14.879	8.314	11.422
			375.08	375.21				DHIG	-0.223	0.249	0.245	0.236
			369.00	369.14				JRQG	-0.617	-0.511	0.418	0.566
			154.82	155.14				MEIG	-7.534	8.120	7.155	7.832
			285.84	286.01				UNM	2.351	8.964	1.607	6.553
			193.76	194.02				PLIG	2.623	-2.903	-2.536	2.767
			257.78	257.97				YAIG	1.291	-2.025	1.288	1.698

Tabla B-7 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Guerrero (Continuación)

No	Fecha UTC	Hora UTC	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
14	23/07/2014	00:28:14	403.92	404.04	10	5.1	6	DHIG	0.025	-0.034	-0.023	0.030
			417.86	417.98				JRQG	0.040	0.045	0.047	0.043
			163.88	164.18				MEIG	0.272	0.278	0.219	0.275
			210.37	210.61				PLIG	0.220	-0.200	-0.183	0.210
			309.19	309.35				UNM	0.225	0.216	0.133	0.221
			272.69	272.87				YAIG	0.127	-0.136	0.086	0.132
15	04/08/2014	00:21:50	55.97	58.27	16.2	5.1	6	CAIG	2.004	-2.049	1.446	2.027
			365.29	365.65				DHIG	-0.021	-0.031	0.027	0.027
			360.83	361.19				JRQG	0.064	-0.065	0.055	0.064
			276.02	276.52				UNM	0.288	0.362	0.231	0.327
			183.75	184.46				PLIG	-0.397	0.358	-0.408	0.378
			274.76	275.24				YAIG	0.363	-0.459	-0.218	0.414
16	13/02/2017	07:29:30	142.26	142.51	8.5	5.0	8	ARIG	-2.359	2.350	1.966	2.354
			53.75	54.42				CAIG	6.016	-7.568	-5.025	6.837
			337.52	337.63				DHIG	0.028	0.020	-0.021	0.025
			337.39	337.50				JRQG	-0.060	0.065	0.047	0.062
			93.42	93.81				MEIG	4.756	4.437	-4.734	4.599
			239.35	239.50				UNM	0.299	0.280	0.167	0.289
			141.32	141.58				PLIG	-0.606	-0.445	-0.446	0.532
			197.98	198.16				YAIG	0.655	-0.523	0.374	0.592
17	18/08/2017	05:15:12	385.00	385.04	5.7	5.0	9	JRQG	-0.078	-0.075	-0.108	0.077
			143.09	143.20				ARIG	-1.038	1.051	-0.894	1.045
			26.81	27.41				CAIG	-3.493	-3.687	4.284	3.591
			81.78	81.98				DAIG	1.235	0.627	0.733	0.980
			372.63	372.67				DHIG	-0.033	0.044	0.038	0.039
			135.64	135.76				MEIG	1.318	1.263	-0.959	1.291
			278.63	278.69				UNM	0.487	0.657	0.310	0.578
			180.79	180.88				PLIG	-0.407	-0.459	0.321	0.434
			243.98	244.05				YAIG	-0.327	0.470	0.196	0.405
18	25/12/2017	20:23:11	376.55	377.17	21.5	5.0	6	JRQG	-0.032	0.035	0.046	0.034
			138.82	140.51				ARIG	-1.030	0.864	0.677	0.951
			19.76	29.35				DAIG	-38.382	-51.948	-30.390	45.672
			243.36	244.33				UNM	0.175	0.167	0.200	0.171
			96.56	98.97				MEIG	-2.026	2.070	-2.562	2.048
			203.12	204.28				YAIG	-0.299	0.429	-0.240	0.370

Tabla B-8 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Guerrero (Continuación)

No	Fecha UTC	Hora UTC	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
19	22/08/2018	18:03:08	450.38	450.45	8.1	5.3	9	JRQG	0.060	0.066	-0.069	0.063
			237.07	237.21				ARIG	-0.577	-0.589	0.318	0.583
			160.73	160.93				CAIG	0.467	0.787	-0.634	0.647
			102.89	103.21				DAIG	-1.932	2.080	1.531	2.007
			377.78	377.87				DHIG	-0.030	-0.030	0.036	0.030
			164.37	164.57				MEIG	0.824	-0.688	0.770	0.759
			283.31	283.43				UNM	0.312	0.311	0.176	0.311
			200.70	200.86				PLIG	-0.621	0.501	-0.525	0.564
			235.10	235.24				YAIG	0.526	0.425	-0.299	0.478
20	30/01/2020	06:47:22	388.81	389.20	17.5	5.0	8	JRQG	0.060	-0.060	-0.045	0.060
			147.07	148.11				ARIG	-1.483	1.302	-0.961	1.396
			27.46	32.56				CAIG	-25.027	12.009	14.339	19.629
			49.81	52.79				DAIG	3.977	-6.817	-3.402	5.581
			362.91	363.33				DHIG	0.017	-0.027	0.030	0.022
			119.51	120.78				MEIG	2.348	2.011	-1.450	2.186
			266.37	266.94				UNM	0.192	0.269	0.153	0.233
			167.19	168.10				PLIG	-0.436	0.506	-0.360	0.473
21	14/09/2022	02:58:18	320.31	321.53	28	5.0	3	UAQ	0.059	0.103	0.058	0.084
			345.61	346.74				DHIG	-0.053	0.034	-0.037	0.045
			238.60	240.24				YAIG	0.119	-0.134	-0.056	0.126

Tabla B-9 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Oaxaca

No	Fecha UTC	Hora (UTC)	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
1	20/03/2012	18:35:38	490.78	490.94	12.6	5.3	7	JRQG	-0.066	0.076	0.075	0.071
			180.43	180.87				HLIG	-1.182	-1.004	-1.229	1.097
			246.47	246.79				HUIG	0.253	0.189	-0.188	0.223
			201.30	201.69				OXIG	2.029	-0.924	1.360	1.576
			321.14	321.39				UNM	0.426	0.450	0.236	0.464
			252.85	253.16				TPIG	1.243	1.577	-0.956	1.420
			120.01	120.67				YAIG	-0.810	-0.820	0.562	0.815
2	20/03/2012	20:14:40	484.85	484.88	5.6	5.2	4	JRQG	-0.085	0.082	0.077	0.084
			400.93	400.97				DHIG	0.045	-0.039	0.077	0.042
			154.78	154.88				HLIG	1.120	0.737	1.052	0.948
			226.11	226.18				HUIG	-0.326	0.198	-0.208	0.270

Tabla B-10 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Oaxaca (Continuación)

No	Fecha UTC	Hora (UTC)	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
2	20/03/2012	20:14:40	171.27	171.36	5.6	5.2	2	OXIG	-2.197	-1.290	-1.573	1.802
			309.80	309.85				UNM	0.346	0.497	0.262	0.428
3	22/03/2012	16:46:42	517.71	517.90	14.2	5	8	JRQG	-0.104	0.105	0.068	0.105
			444.89	445.12				DHIG	-0.055	-0.053	0.050	0.054
			210.36	210.84				HLIG	0.524	0.396	-0.383	0.459
			247.36	247.77				HUIG	0.118	-0.074	0.050	0.091
			220.12	220.58				OXIG	-0.671	0.532	-0.410	0.605
			350.56	350.85				UNM	0.542	0.509	0.289	0.525
			282.17	282.53				TPIG	0.605	0.852	0.357	0.739
			142.59	143.30				YAIG	-0.555	-0.598	0.353	0.577
4	13/04/2012	10:10:03	501.65	501.67	5	5.2	7	JRQG	-0.115	0.114	-0.070	0.114
			421.08	421.11				DHIG	0.055	-0.064	-0.071	0.060
			177.17	177.24				HLIG	0.994	-1.008	-0.936	1.001
			227.50	227.55				HUIG	0.183	-0.414	-0.276	0.320
			186.58	186.65				OXIG	-2.741	-2.757	1.393	2.749
			328.91	328.95				UNM	0.580	0.570	0.332	0.575
			107.52	107.64				YAIG	-0.744	-0.664	0.580	0.705
5	22/09/2012	12:29:57	494.69	494.71	4.6	5.4	11	JRQG	0.079	0.062	-0.071	0.071
			411.45	411.48				DHIG	0.049	0.040	-0.050	0.045
			165.94	166.00				FTIG	-2.782	-3.298	1.981	3.051
			164.58	164.64				HLIG	-1.519	1.282	1.576	1.405
			222.76	222.81				HUIG	-0.641	-0.644	0.349	0.643
			175.17	175.23				OXIG	3.345	2.528	2.000	2.965
			220.68	220.73				TOIG	0.920	-1.047	1.042	0.986
			235.24	235.28				TPIG	-1.348	-1.216	0.864	1.284
			320.15	320.18				UNM	0.482	0.646	0.272	0.570
			112.28	112.37				TXIG	-3.220	3.421	2.406	2.842
			95.09	95.20				YOIG	2.827	2.595	4.161	2.714
6	29/09/2012	07:11:10	513.87	514.15	16.9	5.5	7	JRQG	0.095	0.124	0.054	0.111
			209.53	210.21				FTIG	-0.795	0.688	-0.464	0.743
			213.11	213.78				HLIG	-0.633	-0.610	0.912	0.621
			256.26	256.82				HUIG	-0.231	0.280	0.136	0.257
			227.23	227.86				OXIG	-1.438	-1.254	0.726	1.349
			273.34	273.86				TOIG	0.777	-0.827	-0.496	0.802
			285.45	285.95				TPIG	-1.128	-0.999	-0.498	1.065

Tabla B-11 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Oaxaca (Continuación)

No	Fecha UTC	Hora (UTC)	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
6	29/09/2012	07:11:10	348.42	348.83	16.9	5.5	2	UNM	0.616	0.642	0.248	0.629
			164.04	164.91				TXIG	1.916	1.703	1.437	1.812
7	10/03/2014	00:37:57	525.22	525.24	4.8	5.8	9	JRQG	0.091	0.064	-0.063	0.079
			450.04	450.07				DHIG	0.065	-0.051	-0.066	0.058
			210.16	210.21				FTIG	-0.602	-0.583	0.415	0.592
			210.58	210.63				HLIG	-0.754	0.309	-0.555	0.576
			213.87	213.92				OXIG	-0.862	0.623	0.594	0.752
			266.59	266.63				TOIG	0.530	-0.508	0.477	0.519
			281.57	281.61				TPIG	-0.723	0.960	-0.423	0.850
			356.39	356.42				UNM	0.391	0.416	0.295	0.422
			308.48	308.52				YAIG	-0.446	-0.418	0.335	0.433
8	08/05/2016	07:33:59	507.86	507.91	7.4	6	10	JRQG	0.156	0.158	0.099	0.157
			414.25	414.32				DHIG	-0.114	0.098	0.095	0.106
			160.54	160.71				FTIG	6.877	-8.053	-4.119	7.488
			150.88	151.06				HLIG	-2.941	2.111	2.189	2.560
			185.36	185.51				HUIG	1.713	3.521	-2.142	2.769
			136.80	137.00				OXIG	-15.034	11.832	8.966	13.528
			195.01	195.15				TOIG	-2.517	2.290	1.676	2.406
			215.96	216.09				TPIG	-2.795	-2.545	2.082	2.673
			93.67	93.96				TXIG	6.740	10.117	-4.382	8.596
9	27/06/2016	20:50:31	280.44	280.54	4.4	5.7	9	YAIG	1.867	1.306	-0.758	1.611
			511.69	511.71				JRQG	0.091	-0.122	-0.092	0.108
			422.05	422.07				DHIG	-0.078	-0.085	0.068	0.082
			163.42	163.48				HLIG	-2.212	1.658	1.618	1.955
			194.48	194.53				HUIG	-1.120	1.409	1.473	1.273
			230.32	230.36				TPIG	2.615	-4.316	1.491	3.568
			107.14	107.23				TXIG	5.395	-6.624	5.323	6.040
			333.49	333.52				UNM	0.781	0.806	0.523	0.794
			285.98	286.01				YAIG	-1.127	-0.790	-0.700	0.973
10	21/12/2017	03:23:32	79.36	79.48	15	5.2	5	YOIG	9.021	7.075	8.108	8.107
			520.29	520.51				JRQG	-0.050	-0.053	0.078	0.052
			199.39	199.95				FTIG	0.924	-1.112	-0.697	1.023
			198.58	199.15				HLIG	-0.868	-0.460	0.791	0.695
			253.38	253.82				TOIG	-0.780	-0.678	-0.588	0.731
			432.50	432.76				ACIG	0.050	-0.042	-0.022	0.046

Tabla B-12 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Oaxaca (Continuación)

No	Fecha UTC	Hora (UTC)	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
10	21/02/2017	03:23:32	269.05	269.47	15	5.2	5	TPIG	1.513	-1.052	0.592	1.303
			145.82	146.59				TXIG	-1.803	1.782	-1.350	1.792
			349.24	346.56				UNM	0.276	0.326	0.186	0.302
			301.29	301.66				YAIG	-0.596	0.561	0.367	0.579
			124.66	125.56				YOIG	0.805	0.912	-0.747	0.861
11	16/02/2018	23:39:39	510.31	510.56	16	7.2	12	JRQG	-0.924	-1.384	-0.645	1.177
			420.83	421.13				DHIG	-0.757	0.664	0.598	0.712
			169.41	170.16				FTIG	-23.104	22.854	15.481	22.979
			162.56	163.35				HLIG	9.921	-8.328	N/E	9.159
			420.47	420.77				ACIG	-1.267	1.121	0.571	1.196
			195.73	196.38				HUIG	8.091	-12.965	-9.333	10.806
			153.95	154.78				OXIG	51.113	-48.160	43.677	49.658
			210.38	210.99				TOIG	8.737	-9.250	10.163	8.997
			106.40	107.60				TXIG	-79.455	-36.274	25.370	61.762
			332.18	332.57				UNM	14.398	15.760	9.791	15.095
			284.66	285.11				YAIG	-8.870	-6.262	-4.480	7.678
12	20/03/2018	16:43:55	79.16	80.76				YOIG	-22.580	-24.693	25.849	23.660
			505.53	505.74	14.6	5	12	JRQG	0.043	0.062	0.071	0.053
			436.29	436.53				DHIG	-0.033	-0.019	-0.025	0.027
			204.95	205.47				FTIG	-0.327	-0.294	-0.216	0.311
			209.84	210.35				HLIG	-0.230	0.185	0.181	0.208
			419.73	419.98				ACIG	0.034	-0.035	-0.021	0.034
			262.95	263.36				HUIG	0.239	0.193	0.093	0.217
			229.35	229.81				OXIG	-0.295	-0.184	-0.204	0.246
			271.88	272.27				TOIG	0.173	-0.161	0.112	0.167
			282.63	283.01				TPIG	-0.351	-0.433	0.254	0.394
			162.27	162.93				TXIG	-0.478	-0.358	0.282	0.422
			341.03	341.34				UNM	0.265	0.233	0.110	0.249
			293.37	293.73				YAIG	-0.234	-0.229	0.184	0.231
13	20/03/2018	17:46:54	499.58	499.72	12	5.3	6	JRQG	0.044	0.060	-0.088	0.052
			429.11	429.28				DHIG	0.038	0.032	-0.034	0.035
			196.99	197.36				FTIG	-0.588	0.692	-0.408	0.642
			201.88	202.24				HLIG	0.522	-0.469	0.433	0.496
			260.62	260.90				HUIG	0.345	-0.366	0.139	0.356
			413.44	413.61				ACIG	0.045	0.055	0.027	0.050

Tabla B-13 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Oaxaca (Continuación)

No	Fecha UTC	Hora (UTC)	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
13	20/03/2018	17:46:54	334.09	334.31	24.1	5.1	7	UNM	0.367	0.373	0.158	0.370
			223.19	223.51				OXIG	-0.888	-0.682	-0.592	0.791
			264.22	264.49				TOIG	-0.471	0.364	-0.307	0.421
			274.71	274.97				TPIG	-0.686	-0.629	-0.354	0.658
			154.56	155.03				TXIG	1.414	-0.930	-0.839	1.196
			286.36	286.61				YAIG	0.503	0.525	0.249	0.514
			142.61	143.11				YOIG	-0.952	-0.698	-0.921	0.835
14	22/04/2019	20:15:23	506.61	506.86	15.8	5.5	12	JRQG	-0.102	0.131	0.090	0.118
			435.74	436.03				DHIG	-0.067	-0.062	-0.068	0.064
			202.35	202.97				FTIG	-0.853	-0.840	0.501	0.847
			206.41	207.01				HLIG	0.666	-0.458	0.892	0.572
			257.19	257.67				HUIG	0.314	0.344	-0.154	0.329
			223.77	224.33				OXIG	0.907	-1.323	0.636	1.134
			267.54	268.01				TOIG	0.852	-0.669	0.498	0.766
			278.96	279.41				TPIG	-1.033	-1.035	-0.470	1.034
			158.04	158.83				TXIG	1.915	1.493	1.478	1.717
			340.86	341.23				UNM	0.659	0.726	0.289	0.693
			293.11	293.54				YAIG	-0.686	0.554	0.410	0.624
			144.19	145.05				YOIG	-1.114	0.947	1.022	1.034
15	11/01/2020	14:22:02	435.74	493.63	6.9	5.1	7	JRQG	0.042	-0.055	0.099	0.05
			116.80	166.94				FTIG	0.314	-0.218	0.140	0.27
			223.09	223.20				TOIG	-0.518	0.297	-0.270	0.42
			237.13	237.23				TPIG	-0.590	-0.409	-0.343	0.51
			114.41	114.62				TXIG	-0.634	-0.328	-0.319	0.53
			271.74	271.83				YAIG	-0.092	-0.093	-0.077	0.09
			98.20	98.44				YOIG	-0.328	0.350	-0.470	0.34
16	15/01/2020	08:15:23	508.52	508.56	6.7	5.1	9	JRQG	0.040	0.035	0.037	0.037
			420.50	420.55				DHIG	-0.024	-0.020	-0.026	0.022
			170.17	170.30				FTIG	-1.899	1.905	-1.515	1.902
			201.12	201.23				HUIG	0.506	-0.522	0.286	0.514
			418.90	418.95				ACIG	-0.037	0.040	0.022	0.039
			164.46	164.60				HLIG	0.695	0.608	0.864	0.653
			159.37	159.51				OXIG	-2.835	1.980	1.500	2.445
			214.00	214.10				TOIG	0.612	-0.777	-0.542	0.699
			232.38	232.48				TPIG	-0.662	-1.041	0.505	0.872

Tabla B-14 Aceleración Máxima del Terreno- Trayectoria Oaxaca (Continuación)

No	Fecha UTC	Hora (UTC)	r (km)	R (km)	H (Km)	M	No	Estaciones	EW	NS	V	PGA
16	15/01/2020	08:15:23	108.91	109.12	6.7	5.1	4	TXIG	1.435	2.045	1.753	1.766
			331.21	331.28				UNM	0.273	0.366	0.159	0.323
			283.58	283.66				YAIG	-0.633	0.526	0.344	0.582
			83.54	83.81				YOIG	2.874	-2.547	2.169	2.716