



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Ecuaciones de predicción del movimiento
y cálculo del Espectro de Peligro
Uniforme en las estaciones CU y CCUT de
la Ciudad de México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Paula Felisa Peña Flores

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Leonardo Ramírez Guzmán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ECUACIONES DE PREDICCIÓN DEL MOVIMIENTO Y CÁLCULO DEL ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME EN LAS ESTACIONES CU Y CCUT DE LA CIUDAD DE MÉXICO, que presenté para obtener el título de INGENIERA GEOFÍSICA es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

PAULA FELISA PEÑA FLORES
Número de cuenta: 315317918

A MI FAMILIA, POR SU APOYO Y AMOR INCONDICIONAL

A MORITA, IGOR Y PIRUL POR SU COMPAÑÍA Y CARÍÑO

A MIS PROFESORES POR INSPIRARME A SEGUIR APRENDIENDO

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Verónica y Guillermo, a mi hermano, Samuel y a mis abuelos, por su apoyo, amor y cariño. Gracias por acompañarme en cada paso e impulsarme siempre a seguir adelante.

A mi familia, y en especial, a mi tía conchita, por sus palabras de aliento, por no desanimarme y motivarme a constantemente cumplir mis sueños, a mi tía Claus, por siempre estar dispuesta a responder mis dudas y ayudarme en donde le ha sido posible, a mi tío J. Manuel por tus constantes retroalimentaciones.

A Alexandra Hernández, Lizeth Hernández, Fanny, Lope, Juan Chang, Ana, Andy López, Lenin e Isaí, por su apoyo, sus oraciones y los ánimos brindados en cada etapa de mi vida.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Ingeniería por proporcionarme los recursos necesarios para completar esta etapa de mi vida académica y llevar a cabo esta investigación; a toda la Coordinación de Instrumentación Sísmica, en especial a M.C. Moisés Contreras y M.I. Miguel Leonardo, por su valioso apoyo a este trabajo. A Citlali, Rosario y Ana por su apoyo en la búsqueda de los registros utilizados. Al Dr. Leonardo Ramírez Guzmán, mi tutor, por el apoyo y motivación, pero especialmente a mis amigos del instituto: Luis, Fernando, Daniela, Roberto, Lilibeth, Héctor, Iván y Miguel, sin su apoyo, este trabajo no hubiera sido el mismo. Gracias por la motivación, enseñanzas, momentos especiales y las palabras de aliento para mejorar cada uno de los aspectos de este trabajo y también en mi vida personal.

A mis **profesores de la carrera**, en especial al Dr. Antonio Uribe Carvajal, Dr. Manuel Aguilar, Dra. Iza Canales, Mtro. José Antonio y la Dra. Mildred Zepeda por su pasión al enseñar, consejos y ayuda a buscar lo que realmente me gusta y apasiona.

A mis **geoamigos** que hicieron esto una aventura más llevadera: Enoc, Emiliano, Uriel, Juan, Sebastián, Omar, Jacqueline, Jessica, Lezlie.

A mis **sinodales** por su tiempo y supervisión del trabajo.

A la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación SECTEI, por la beca otorgada a través del patrocinio del proyecto para la realización del proyecto: *Monitoreo permanente de la zona de Lomas-Mixcoac y estimación de escenarios por sismicidad local.*

RESUMEN

La Ciudad de México ha experimentado eventos sísmicos que han proporcionado lecciones importantes para el desarrollo normativo y la ingeniería sísmica. En el estudio presente se aborda el peligro sísmico en dos sitios dentro de la ciudad: 1) Ciudad Universitaria (CU), un sitio en la zona de lomas; y 2) el Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT), un sitio en la zona de lago.

Se calculan los Espectros de Peligro Uniforme (EPU) empleando Ecuaciones de Predicción del Movimiento desarrolladas para las estaciones mencionadas. Las estimaciones se hacen para sismos de subducción e intraplaca. Para obtener los coeficientes de las GMPE, se utiliza un proceso de inversión por mínimos cuadrados ordinarios, y el EPU se estima utilizando zonas sismogénicas compatibles con las empleadas en los cálculos del código sísmico vigente, el Sistema de Acciones Sísmicas para el Diseño (SASID).

Al comparar los EPU obtenidos con los EPU del reglamento, se muestra la importancia de utilizar GMPEs específicas por sitio y la forma funcional de las ecuaciones empleadas. Se observaron diferencias significativas en el peligro sísmico entre CU y CCUT, influenciadas principalmente por las condiciones geológicas contrastantes en cada ubicación, así como discrepancias aparentes con el EPU normativo en la estación CCUT.

ABSTRACT

Mexico City has experienced seismic events that have provided important lessons for the development of seismic regulations and earthquake. In this context, the present study addresses seismic hazard at two sites within the city: 1) Ciudad Universitaria (CU), located in the Hill zone, and 2) Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT), located in the lake zone.

Uniform Hazard Spectra (UHS) are calculated using Ground Motion Prediction Equations (GMPEs) development for the mentioned stations. Estimates are made for both subduction (interplate) and intraplate earthquakes. The GMPE coefficients are derived using an ordinary least-squares inversion, and the UHS are estimated using seismogenic zones consistent with those employed in the current seismic design code, the Seismic Action System for Design (SASID).

The results showed the importance of site-specific GMPEs and the functional form of the equations used. Significant differences in seismic hazard between CU and CCUT were observed, mainly influenced by the distinct geological conditions at each site, and apparent discrepancies with the normative UHS at CCUT.

CONTENIDO

Agradecimientos.....	3
Resumen	5
Abstract	5
1 Objetivos	8
1.1 Objetivo General	8
1.2 Objetivos Específicos	8
2 Introducción	9
3 Antecedentes y Marco Teórico	11
3.1 Marco Geológico y Tectónico	11
3.1.1 Regionalización Sísmica	13
3.1.2 Área de Estudio	17
3.2 Fundamentos Teóricos	21
3.2.1 Magnitud, Momento Sísmico y Saturación de la Magnitud	22
3.2.2 Parámetros del Movimiento del Terreno	24
3.2.3 Ecuaciones de Predicción del Movimiento del Suelo	29
3.2.4 Métodos de Regresión para el Ajuste de GMPE	32
3.2.5 Peligro Sísmico.....	35
3.2.5.1 Espectro de Peligro Uniforme (EPU)	39
4 Metodología y resultados.....	41
4.1 Obtención de los datos y análisis de registros de aceleración	42
4.1.1 Tipos de datos utilizados	42
4.1.2 Homologación de magnitudes	43
4.2 Procesamiento de los datos.....	52
4.2.2 Ecuación de Predicción del Movimiento.....	61
4.2.3 Espectro de Peligro Uniforme	67
5 Resultados	73
5.1.1 Coeficientes de las GMPE.....	73
5.1.2 Espectro de Peligro Uniforme para los sitios investigados	74
6 Discusión	77
6.1 Alcance general de los resultados.....	77
6.1.1 Limitaciones del catálogo sísmico y homogenización de magnitudes	77
6.1.2 Justificación y alcance del Método OLS	78

6.1.3	Análisis de las GMPEs	78
6.1.4	Comparación con la normativa.....	87
6.1.5	Diferencias entre subducción e intraplaca y su impacto en el peligro.....	91
6.1.6	Comparación entre superficie y profundidad en el CCUT	91
6.1.7	Espectros de Peligro Uniforme (EPU).....	91
7	Conclusión	95
8	Anexo.....	96
9	Bibliografía	112

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener las curvas de peligro sísmico empleando ecuaciones de predicción del movimiento elaboradas para las estaciones Ciudad Universitaria y el Centro Cultural Universitario Tlatelolco (en Pozo a 45m de profundidad y en Campo Libre) y evaluar las diferencias entre las curvas de peligro sísmico calculadas en el sistema SASID.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Obtener una ecuación de predicción del movimiento para sismos de subducción e intraplaca para cada estación: CCUT (Campo Libre y Pozo) y CU.
- b) Calcular el espectro de peligro uniforme para la estación CCUT (Campo Libre y Pozo); y CU mediante el programa CRISIS.
- c) Comparación de los resultados obtenidos y los del reglamento de la Ciudad de México.
- d) Discutir las implicaciones de las estimaciones de peligro en CU y en el CCUT (Campo Libre y Pozo).

2 INTRODUCCIÓN

México es un país altamente sísmico debido a la convergencia de cinco placas tectónicas: la Norteamericana, la del Pacífico, la de Cocos, la de Rivera y la del Caribe. Esta actividad tectónica ha provocado desastres significativos en diversas regiones del país. Los sismos representan un desafío para la sociedad, pues son eventos particulares, raros en escalas de tiempo humanas, pero que pueden causar una gran destrucción (Stein & Wysession, 2003).

La Ciudad de México ha experimentado los efectos de diversos sismos destructivos, entre los cuales destacan los sismos de San Marcos, en 1957; el de Petatlán, conocido como el “Terremoto de la Ibero”, en 1979; el sismo de Michoacán, en 1985; y el sismo Puebla-Morelos, en 2017. Los eventos mencionados dejaron pérdidas humanas y materiales que obligaron a las autoridades a revisar las Normas Oficiales que regulan la industria de la construcción. Las afectaciones a la sociedad causadas por el fenómeno siguen siendo un enorme desafío para la ingeniería actual que motiva el desarrollo de estudios en sismología e ingeniería sísmica.

La evolución de las normativas sísmicas modernas en México comienza en 1921; sin embargo, es hasta 1972 y posteriormente en 2004 cuando se presentan cambios significativos en la misma al incorporar los avances de la ingeniería sísmica (González Cuevas, 2022). En 2017 se realizaron modificaciones adicionales al código de construcción, incorporando un análisis detallado de edificios altos en el área lacustre. Entre estas modificaciones se incluyó el Sistema de Acciones Sísmicas para el Diseño (SASID), el cual es una aplicación web obligatoria que proporciona los Espectros de Peligro Uniforme (EPU) en la capital y acelerogramas para los sitios en la Ciudad de México.

El análisis de peligro sísmico es un aspecto central en la normativa sísmica; puede ser tanto determinista como probabilista. Sin embargo, actualmente los códigos emplean cálculos probabilistas en los cuales uno de los componentes principales son las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo (*Ground Motion Prediction Equations*, GMPE, por sus siglas en inglés) para estimar parámetros de intensidad sísmica como la PGA o SA, en función de variables como magnitud, distancia, tipo de falla, efectos de sitio, etc. Estas estimaciones permiten calcular la probabilidad de ocurrencia esperada para que un evento provoque intensidades que excedan un valor dado en un tiempo determinado y así elaborar mapas de zonificación sísmica, estimar pérdidas económicas y sociales, y definir estrategias de mitigación (Schmidt-Díaz, 2014; PEER; López y Toscana, 2016).

Las GMPE empleadas en México han sido desarrolladas bajo el supuesto de ergodicidad, suponiendo que el comportamiento sísmico promedio observado en distintas regiones dentro de una misma categoría tectónica. Esto permite generar modelos robustos, pero también introduce una alta variabilidad aleatoria debido a la falta de caracterizaciones específicas de la fuente, el trayecto que recorren las ondas y las condiciones locales (Atkinson, 2006; Strasser, Abrahamson & Boomer, 2009).

Para disminuir la incertidumbre mencionada, se han desarrollado modelos no ergódicos que integran información regional específica del sitio, permitiendo descomponer la variabilidad total del modelo en los efectos que aporta la fuente, el trayecto y el sitio, mejorando la capacidad predictora de los modelos y generando estimaciones más realistas del peligro sísmico.

La estación CU ha sido utilizada como referencia y el efecto de sitio inducido por la geología del Valle de México se incluye a través de cocientes empíricos entre la estación de referencia y las estaciones acelerográficas en la zona de lago. Así, la no ergodicidad relacionada con el sitio se aproxima. Sin embargo, los efectos de la fuente y trayecto en bajas frecuencias y sismos cercanos requieren análisis y caracterización adecuada.

Este trabajo tiene como objetivo analizar el EPU en CU y CCUT en dos puntos: Pozo, 45 m; y Campo Libre. En esta comparación los modelos de atenuación (GMPE) se calibraron con datos de aceleración espectral en diversos periodos obtenidos con el método de un paso propuesto y la ayuda de un programa para la obtención de los espectros de peligro uniforme, para finalmente compararlos con los del SASID.

La estimación del peligro sísmico en CU y el CCUT presenta diferencias significativas relacionadas a sus condiciones geológicas locales, que pueden ser identificadas y cuantificadas mediante el uso de GMPE no ergódicas y superar las limitaciones asociadas a los modelos ergódicos tradicionales, siendo una referencia clave para comparar los efectos entre diferentes condiciones. El peligro y su incertidumbre son diferentes cuando se calcula de forma estándar y con la GMPE del sitio. Este análisis tiene como propósito contribuir a una mejor comprensión de las estimaciones del EPU en dos sitios representativos de la Ciudad de México, implementando herramientas y modelos de predicción del movimiento que omiten la hipótesis de ergodicidad, con el fin de obtener ecuaciones específicas y permitir evaluar con mayor detalle las implicaciones en el cálculo del peligro sísmico.

3 ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

El estudio del peligro sísmico en la Ciudad de México requiere una comprensión integral de su contexto geológico, tectónico y sísmico. En este capítulo se presenta la regionalización tectónica y sísmica del país centrándolo en las fuentes de subducción e intraplaca que afectan al Valle de México. Se describe el área de estudio donde se encuentran las estaciones ubicadas en CU y CCUT. Asimismo, se explican los fundamentos teóricos del análisis de peligro sísmico probabilista, el espectro de peligro uniforme, los parámetros del movimiento del terreno, incertidumbre en el cálculo y definición de la magnitud; los diferentes tipos de magnitud registrada, sus cálculos, y la saturación. Finalmente, se introduce el concepto y uso de la ecuación de predicción del movimiento (GMPE), se detallan los métodos de regresión de dos pasos de Joyner y Bore y el de mínimos cuadrados ordinarios empleados para el desarrollo de las GMPE.

3.1 MARCO GEOLÓGICO Y TECTÓNICO

La Tierra no es una estructura continua, sino que está compuesta por múltiples fragmentos denominados placas tectónicas, cuya interacción genera sismos y la formación de montañas (Udías y Buforn, 1999). Los sismos ocurren principalmente en los límites de dichas placas (figura 3.1).



Figura 3.1 Placas Tectónicas en México y su interacción. El mapa ilustra las cinco placas tectónicas que interactúan en el territorio mexicano, siendo la causa principal de la actividad sísmica en el país. Placa Norteamericana (verde): Placa continental bajo la cual se subducen las placas oceánicas a lo largo de la costa del Pacífico. Placa de Cocos (café claro) y Placa de Rivera (azul): Placas oceánicas generadoras de sismos interplaca debido al proceso de subducción bajo la placa Norteamericana. Placa del Pacífico (café oscuro) y Placa del Caribe (blanco): Placas que delimitan las otras zonas de interacción tectónica. Fuente:

Servicio Sismológico Nacional. Disponible en <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Evolucion-tectonica-Mexico.html>

Los sismos interplaca presentan mecanismos de falla inversa debido a la liberación de energía acumulada entre las placas tectónicas a lo largo de los límites convergentes de las mismas; mientras que los denominados sismos *inslab*, corresponden a los sismos de falla normal generados dentro de las placas oceánicas que se

subducen bajo el continente originados cuando la roca se rompe debido a las grandes deformaciones que producen los esfuerzos de tensión aplicados sobre el plano de la roca.

Las zonas de subducción tienen diferentes características según la región, lo que influye en la diversidad de sismos que se generan, tanto en sus mecanismos como en sus profundidades (Stein y Wysession, 2003). Estos terremotos se clasifican en tres categorías: *superficiales* (menos de 70 km de profundidad); *intermedios* (entre 70 y 300 km); y *profundos* (más de 300 km). Los sismos intermedios y profundos conforman la zona de Wadati-Benioff,¹ que en algunas regiones alcanza profundidades cercanas a los 700 km. Mientras que estos eventos ocurren dentro de las placas en subducción, en un entorno frío, los sismos superficiales están ligados a la interacción entre placas. Los sismos de mayor magnitud y frecuencia suelen ocurrir en la interfaz entre ellas, liberando la energía acumulada por el desplazamiento tectónico. Sin embargo, también pueden originarse dentro de la placa superior o la subducida.

En México, los sismos interplaca se generan a lo largo de la costa del Pacífico, su mecanismo es generado por la subducción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera bajo la placa Norteamericana, siendo parte de las fuentes sísmicas más activas y peligrosa del país (Suárez, 2024).

Diversos estudios han demostrado que los sismos interplaca han sido especialmente destructivos para el Valle de México y el Cinturón Volcánico Mexicano,² mientras que los sismos intraplaca han afectado más a la población del altiplano que se extiende en el sur del Cinturón, donde su potencial es amplificado debido a la menor profundidad por la subducción casi horizontal de la placa (García Jiménez, 2006).

La sismicidad que afecta al Valle de México tiene su origen en diversas regiones de la República Mexicana. Los sismos que afectan principalmente a la Ciudad de México provienen de la costa del Pacífico, abarcando los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Chiapas y Oaxaca. En particular, el sureste de Oaxaca representa una fuente significativa de sismos locales dentro del valle y sismos intraplaca más cercanos que han impactado la capital. Lo que nos impulsa a considerar tanto fuentes lejanas como cercanas en los análisis de peligro sísmico en esta región.

La definición de fuentes o zonas sismogénicas o sismogenéticas es fundamental para el estudio del peligro sísmico, ya que permiten definir áreas, polígonos o volúmenes en los que se pueden suponer características tectónicas similares con el fin de modelar la ocurrencia de sismos mediante distribuciones estadísticas, como la Ley de Gutenberg-Richter; la cual establece una relación exponencial entre la magnitud y la frecuencia de ocurrencia de los eventos sísmicos. Un modelo de fuentes sismogénicas debe considerar la magnitud máxima esperada y la frecuencia en la que puedan ocurrir sismos de distintas magnitudes, para lo cual es necesaria la identificación, delimitación y parametrización adecuada de las fuentes presentes en la región a analizar. Requiere considerar su geometría, la distribución dentro de ellas y la distribución del tamaño y ocurrencia de los sismos a lo largo del tiempo. Los criterios para determinar los límites se basan en la configuración tectónica, fallas activas, características focales, patrones de fallamiento y catálogos sísmicos (Zúñiga *et al.*, 1997; Leonardo, 2013). A medida que se obtienen más y mejores datos sísmicos disponibles, es posible subdividir las regiones, incorporando un detalle más fino en la caracterización de estas zonas (Zúñiga *et al.*, 2017).

¹ Esta región, llamada "Zona Benioff", se utiliza para localizar la placa subductante (California Institute of Technology, 2009).

² Definido como un arco magmático continental, conformado por cerca de 8,000 estructuras volcánicas y algunos cuerpos intrusivos; su nombre se refiere a su dirección preferencial, ya que muestra una distribución transversal respecto de sus provincias geológicas (Ariza, 2009).

En el caso de México, Esteva (1970) propuso 21 provincias tectónicas o regiones sismogénicas, que tiempo después se actualizaron (Zúñiga *et al.*, 1997) con base en los parámetros que definen la tasa de recurrencia sísmica: desde entonces se incorporaron 14 provincias adicionales. Este ajuste tenía como objetivo considerar los sismos de gran magnitud ($M > 7$) que se originan en la costa del Pacífico, cuyo intervalo de recurrencia no tiene una distribución exponencial.

La regionalización de Zúñiga en el 2017 está compuesta por 18 regiones sísmicas, que se dividen en tres categorías principales:

- a) *Sismicidad asociada a la subducción a lo largo de la costa del Pacífico de México*: regiones Costa de Jalisco y Colima, Sureste de Michoacán, Centro de Michoacán, noreste de Oaxaca, sur de Oaxaca, costa de Chiapas, Istmo de Tehuantepec, golfo de Tehuantepec y Yucatán.
- b) *Sismicidad intraplaca dentro de las placas subducidas COC y RIV*: regiones Jalisco, Michoacán sur, Guerrero sur, Oaxaca norte y Oaxaca sur.
- c) *Sismicidad cortical asociada a varias regiones geológicas y tectónicas*: regiones Sierra Madre Occidental, Sierra Madre Oriental, y Faja volcánica Transmexicana.

Para cada región, estimaron los valores de a y b de la relación de Gutenberg Richter. Los valores se estimaron como una función del tiempo para cada región, a fin de confirmar su fiabilidad y estabilidad. Los tiempos de recurrencia predichos por las relaciones de Gutenberg-Richter resultantes se compararon con los tiempos de recurrencia observados de los eventos más grandes en cada región, tanto históricos como instrumentales. La mayoría de las regiones sismogénicas tienen definida la sismicidad por el modelo Truncado de Gutenberg-Richter.

3.1.1 Regionalización Sísmica

Existen dos propuestas de regionalizar sísmicamente la zona metropolitana del Valle de México: a través del Manual de Obras Civiles MOC-CFE15 o mediante el Reglamento de Construcciones Del Distrito Federal RCDF. El primero es de carácter nacional y toma en cuenta las zonas de peligro sísmico. El segundo es de carácter local y de referencia nacional para el diseño de edificaciones. El RCDF indica que para cumplir con sus lineamientos es necesario seguir las indicaciones de la Norma Técnica Complementaria correspondiente. En la NTC para Diseño y Construcción de Cimentaciones toman en cuenta el carácter geotécnico (Zonas I, II Y III). Por otra parte, en la NTC para el Diseño por Sismo se toma en cuenta otra clasificación, donde considera la respuesta dinámica del sitio (Zona A, B, C).

3.1.1.1 Regionalización según MOC-CFE15

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2021) describe el *Sistema de regionalización sísmica* utilizado en el país, basado en el Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ver figura 3.2; divide el territorio en cuatro zonas de peligro sísmico, de menor a mayor, las cuales son: A, B, C y D. De esta manera, y según la zona de sismicidad regional, se establecen los requisitos de seguridad en la construcción sobre terreno firme. Sin embargo, el documento señala que esta regionalización es aplicable a estructuras construidas en terreno firme y no aborda el fenómeno de amplificación sísmica en suelos blandos, un factor importante para la evaluación del peligro y riesgo en áreas como la Ciudad de México.

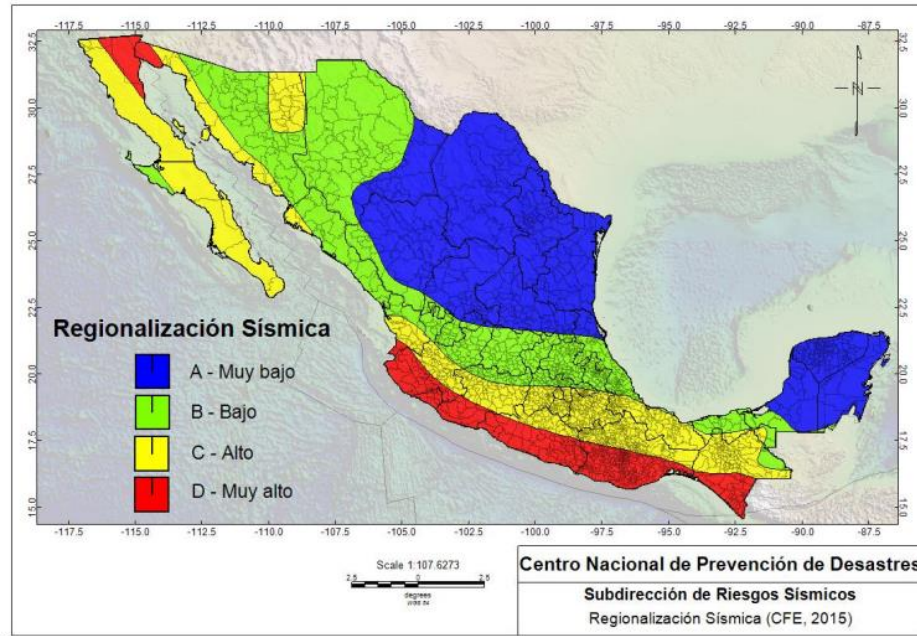


Figura 3.2 Regionalización sísmica de la República Mexicana de acuerdo con el Manual de Obras Civiles de la CFE (2015). El mapa presenta la clasificación del país en cuatro zonas sísmicas (A, B, C, D) con relación al nivel de peligro esperado, según la metodología definida por la CFE. Zona A (Azul): Peligro Muy bajo. Zona B (verde): Peligro Bajo. Zona C (Amarillo): Peligro Alto. Zona D (Rojo): Peligro Muy alto. Fuente: CENAPRED, 2021.

De acuerdo con la Regionalización Sísmica de la Comisión Federal de Electricidad, la Ciudad de México, está ubicada entre zonas de sismicidad baja (Zona B) y alta (Zona C), como se muestra en la Figura 3.2

La Zona B está definida por una baja frecuencia de sismos y la intensidad del suelo que no excede el 70% de la aceleración gravitacional, a diferencia de la Zona C, que se caracteriza por una mayor ocurrencia de sismos (CENAPRED, 2021). Se divide a la ciudad en tres zonas geotécnicas (I, II, III), Figura 3.2 de acuerdo con el tipo de suelo: Lomas, Lago y Transición.

Para el desarrollo de este trabajo, se adoptó la zonificación establecida por la CFE (Figura 3.3) para calificar y delimitar las dos principales fuentes sismogénéticas que impactan a la Ciudad de México: Subducción (Azul) e Intraplaca (Rojo).

MAPA DE UBICACIONES DE LOS SITIOS UTILIZADOS Y FUENTES SISMOGÉTICAS

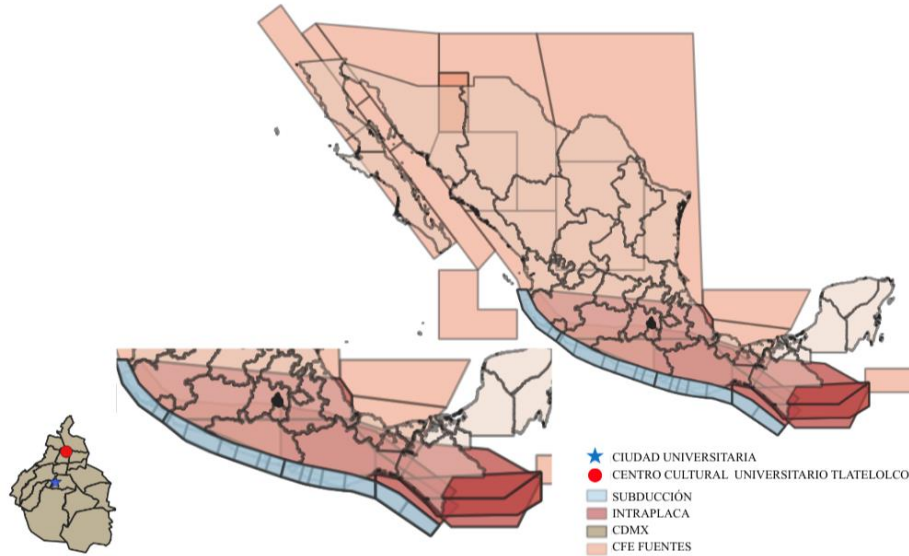


Figura 3.3 Mapa de ubicaciones de los sitios utilizados y Fuentes Sismogénicas adoptadas para la obtención de los espectros de peligro uniforme. El mapa principal presenta la delimitación de las fuentes sismogénicas utilizadas en este trabajo, clasificadas de acuerdo con la zonificación establecida. Subducción (fuente interplaca) se representa en color azul.

Fuente: elaboración propia.

3.1.1.2 Regionalización según la NTC Para Diseño y Construcción de Cimentaciones

El Reglamento de Construcciones del Distrito Federal es una norma de carácter local y una referencia nacional para el diseño de edificaciones. Para efectos de construcción, existe un mapa de zonificación geotécnica que está descrita en la NTC- Cimentaciones, que divide la capital en función de la estructura y las características de los suelos subyacentes (roca, suelo, sedimentos debajo de la superficie inmediata del sitio). Gobierno de la Ciudad de México (2023). En la Figura 3.4 se ilustran las siguientes zonas geotécnicas:

Zona I: Firme o de lomas, compuesta por rocas o suelos muy compactos. La amplificación de las ondas sísmicas no es tan significativa y los movimientos tienen poca duración. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos artificiales no controlados.

Zona II: Transición, tiene características intermedias entre las zonas I y III en la que los depósitos resistentes se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos pertenecientes a limo y arena intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

Zona III: Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros.

Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales, por lo que son suelos muy blandos y compresibles con altos contenidos de agua, con espesores superiores a los 50 m. Este tipo de suelo favorece la amplificación de las ondas sísmicas (SGM, 2017).

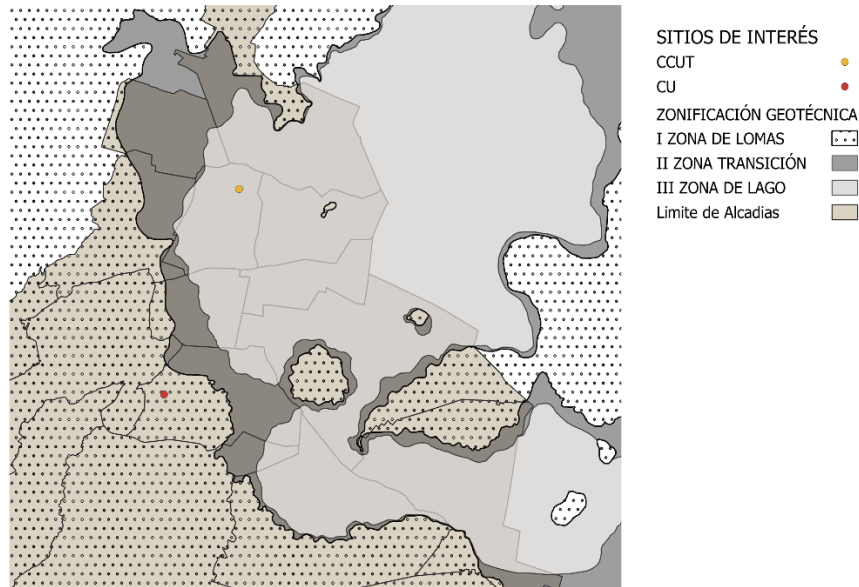


Figura 3.4 Mapa de zonificación geotécnica de la Ciudad de México y áreas aledañas. Ubicación del CCUT en Zona III y CU en Zona I. Fuente: Elaboración propia basada en NTC Cimentaciones Gobierno de la Ciudad de México. (2023).

3.1.1.3 Regionalización según la NTC para el Diseño por Sismo

La zonificación sísmica de la CDMX está basada en la respuesta dinámica del sitio durante los sismos, específicamente a partir del periodo dominante más largo del terreno. Desde la NTC 2017 estos datos son obtenidos mediante el **Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID)** del Gobierno de la Ciudad de México. (2023). La Tabla 3.1 describe la zonificación sísmica.

ZONA SÍSMICA	CONDICIÓN DEL PERIODO DOMINANTE
Zona A	Corresponde a la zona de la ciudad para la que el periodo dominante para la que Ts es igual o menor que 0.5s.
Zona B	Corresponde a la zona de la ciudad para la que $0.5 < Ts \leq 1.0s$
Zona C	Corresponde a la zona de la ciudad para la que Ts es mayor que 1.0s

Tabla 3.1 NTC SISMO Gobierno de la Ciudad de México. (2023). Ts indica el periodo dominante en segundos. Fuente: elaboración propia.

La zonificación geotécnica ha sido utilizada en normas anteriores como referencia sísmica, derivada de coeficientes y parámetros para el cálculo de espectros de diseño. Si embargo, no coincide con exactitud con

la zonificación sísmica, ya que la respuesta depende de los suelos subyacentes, intervienen otros factores relevantes. Por ello, identificar la zona sísmica es esencial para definir parámetros de diseño y comprender los límites de su aplicación.

Con el contexto anterior, en la Figura 3.4 se observa que el CCUT pertenece a la zona III o de lago, caracterizada por suelos altamente compresibles, lo que puede implicar mayores amplificaciones en los movimientos sísmicos y una duración prolongada de los mismos. Por otro lado, CU se localiza en la zona I o de lomas, compuesta por suelos firmes de alta resistencia, esto marca la diferencia y el enfoque no ergódico antes mencionado.

3.1.2 Área de Estudio

El presente estudio se enfoca en dos sitios representativos de la Ciudad de México: Ciudad Universitaria (CU) y el Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT), ambos pertenecientes a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

La estación CU destaca por tener una extensa trayectoria de monitoreo sísmico, iniciada con la instalación del primer acelerógrafo en 1960. Desde entonces, ha mantenido registros continuos durante más de cinco décadas, lo que permite disponer de una cobertura temporal considerable. Esta característica la convierte en una referencia fundamental para el desarrollo y validación del modelo propuesto.

Por otra parte, el CCUT cuenta con un menor historial de eventos sísmicos registrados debido a que esta red fue instalada en 2009; representa un sitio de interés por su ubicación en una zona lacustre, permitiendo evaluar diferentes efectos locales del sitio y comparar el comportamiento sísmico bajo diferentes condiciones geotécnicas.

Las subsecciones siguientes presentan una descripción breve de las características relevantes de los sitios de estudio.

3.1.2.1 Sitio Ciudad Universitaria

El sitio Ciudad Universitaria está ubicada en la alcaldía Coyoacán y está construida sobre el suelo originado por la erupción del volcán Xitle, cuyas coladas (masa de lava) cayeron en buena parte del suroeste de la Ciudad de México, formando lo que hoy se conoce como el Pedregal de San Ángel. Este terreno corresponde a un malpaís, caracterizado por afloramientos de lava poco erosionada, con superficies irregulares correspondientes al tipo de solidificación pahoe-hoe o demolítico, principalmente (Delgado *et al.*, 1998; Palacio Prieto & Guilbaud, 2015). Presenta derrames compactos masivos y vesiculares en la parte superior. En el área de exploración, la base de los depósitos de basaltos no aflora; sin embargo, en otras partes de CU sí lo hacen. En algunas partes de este basalto expuesto pueden observarse evidencias de metamorfismo de contacto, producidas por lavas al escurrir sobre rocas y suelos más antiguos.

La geología de Ciudad Universitaria es conformada por depósitos de lavas, principalmente del volcán Xitle; estas lavas son de composición basáltica (García Palomo *et al.*, 2020). El espesor de las lavas basálticas varía entre 50 centímetros y 10 metros; el tipo de vulcanismo es islándico, que se caracteriza por la efusión lenta de lava fluida a lo largo de una fractura de más de 7 km.

La zona de CU cercana a la Facultad de Ingeniería y la Torre de Ingeniería se localiza dentro de un contexto geológico dominado por basaltos. Para caracterizar la estratigrafía del subsuelo en esta área, se utiliza como referencia la columna litológica del Pozo Copilco-1, debido a la proximidad espacial y a que se emplaza dentro del mismo marco geológico-volcánico de CU. De acuerdo con la Figura 3.5 el pozo alcanza una

profundidad total de 2,258 metros, y en la sección de interés comprendida entre 0 m a 520 m de profundidad, la columna litológica se compone de las siguientes unidades:

J) Basalto con algunas partes alteradas. Espesor 23 m.

I) Brechas volcánicas de fragmentos de toba con trazas de basalto. Espesor 32 m

H) Tobas café rojizo y verde olivo con basalto, trazas de pómez y brechas volcánicas con fragmentos angulosos de composición tobácea. Espesor 310m

G) Arcillas café claro con tobas y basaltos Espesor 155 m

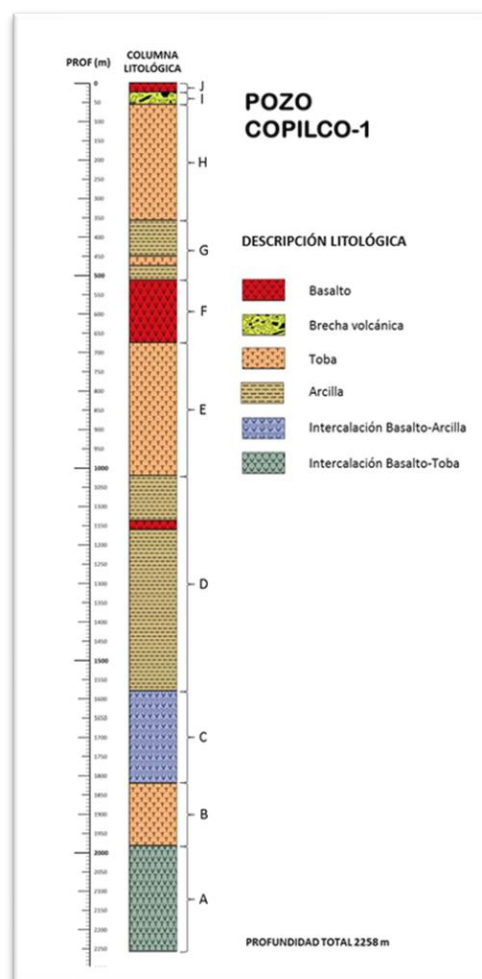


Figura 3.5 Pozo Copilco-1. Fuente: Unda López (2016).

3.1.2.2 Sitio Centro Cultural Universitario Tlatelolco

Se encuentra ubicado en la alcaldía Cuauhtémoc, cerca del centro de la Ciudad de México. De acuerdo con la zonificación sísmica de las NTC (2020), pertenece a la Zona III o Zona Lacustre, la cual está caracterizada por suelos de alta plasticidad, que puede ser un factor en la respuesta sísmica del terreno y está conformada por depósitos de arcilla altamente comprensibles separados por capas arenosas con contenido de limo o arcilla.

La estratigrafía del lugar contiene: un estrato de arcilla blanda altamente comprensible que subyace a una capa superficial endurecida de espesor variable (6 a 10 m) y se extiende hasta una profundidad de 30 m sobre una capa dura, conformada en su mayoría por limo y arena.

En el primer bloque de arcilla se localizan intercalaciones de rellenos de arena, arcilla de secado y ceniza volcánica de un espesor reducido. Debajo de la capa dura se desprende otro estrato de arcilla (serie arcillosa inferior), que, aunque con menor espesor que el primero, conserva propiedades similares. Este estrato se extiende hasta los 45 m de profundidad, donde se encuentran los depósitos profundos (Cruz, 2007).

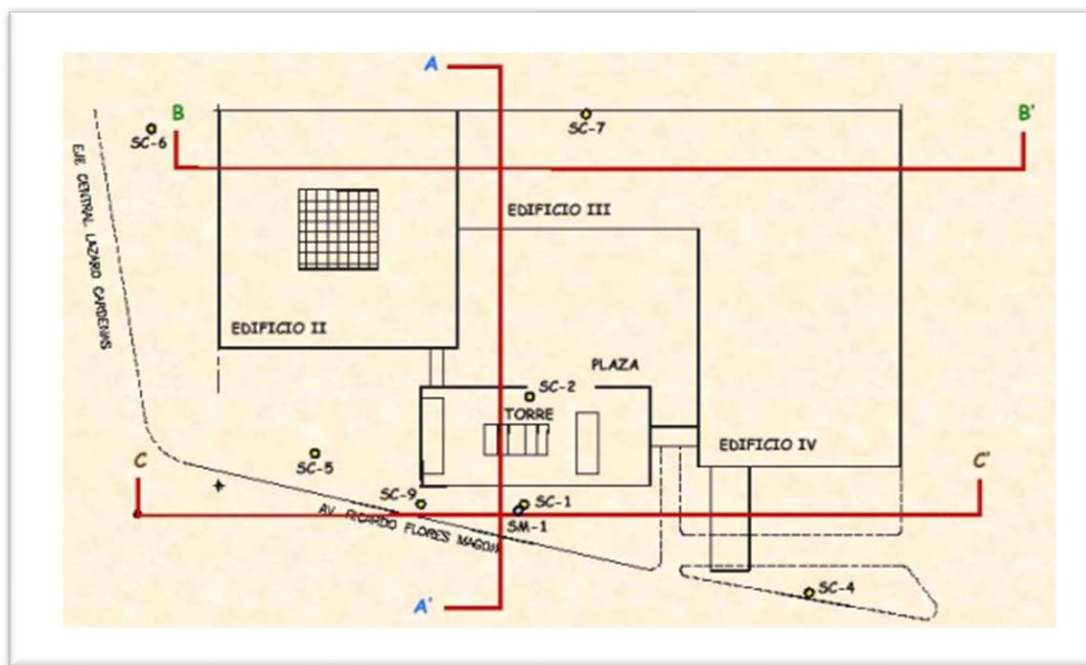


Figura 3.6 Secciones para perfiles estratigráficos en el CCUT. Fuente: Cruz, 2007:18.

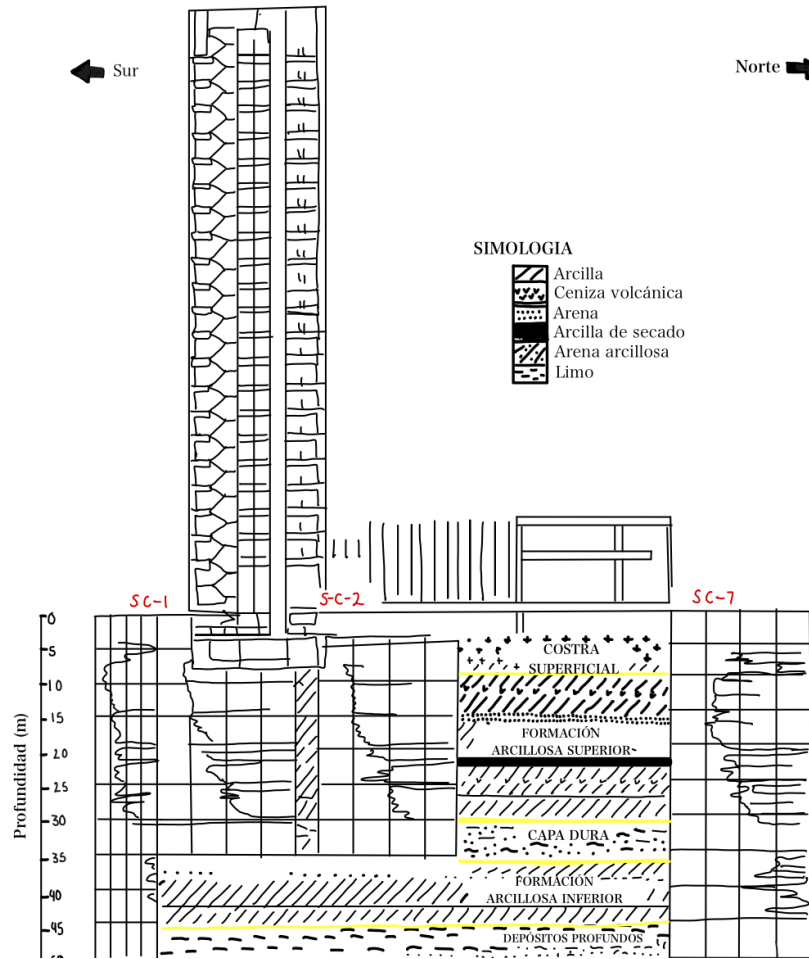


Figura 3.7 Corte estratigráfico A-A'. Fuente: Cruz, 2007:18.
SC representa la columna estratigráfica para cada corte establecido en el Centro Cultural Universitario.

La geología de cada sitio influye directamente en la respuesta sísmica de la estructura. Aunque CU y CCUT comparten la misma fuente de sismos, sus características geológicas y sísmicas son diferentes. En CCUT, esta diferencia se evidencia en las dos ubicaciones de las estaciones, se tienen dos tipos de registro: 1) Campo Libre y 2) Pozo a 45 m de profundidad. En la Figura 3.7 se observa en los registros estratigráficos que a 45m se encuentra una capa dura, un cambio que se reflejará en la amplificación y duración de la energía sísmica. Específicamente en los suelos blandos (Lacustres) que tienden a amplificar las ondas en ciertas frecuencias, registrando aceleraciones más altas, mientras los suelos más duros o rocas presentan una amplificación y atenuación menor.

Las diferencias geológicas o efectos de sitio condicionan la forma de los espectros de peligro uniforme. Esto se debe a que la respuesta dinámica del suelo y por consecuencia la amplificación está ligada a los periodos dominantes del terreno T_s . Los efectos de sitio generan variaciones notables en la aceleración sísmica registrada, no solo entre diferentes ubicaciones geográficas, sino también en el mismo punto a diferentes profundidades. Esta amplificación sumada a la naturaleza de la fuente sísmica (subducción o intraplaca), es un factor que impulsa a establecer GMPEs calibradas para reflejar y considerar estas condiciones locales.

3.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta sección establece los fundamentos teóricos para comprender el cálculo del peligro, incluyendo el desarrollo, calibración, aplicación y la importancia de las GMPE. Los factores más importantes considerados son los tipos de fuentes sísmicas, la energía liberada por las mismas y la propagación de ondas que están relacionadas con las características del sitio.

En primer lugar, en cuanto a las características físicas del fenómeno sísmico, se introduce el concepto de magnitud y momento sísmico, destacando la importancia de la homologación de la magnitud de momento (M_w) para tener consistencia en el análisis. En este apartado se abordan las escalas tradicionales y el fenómeno de saturación.

Posteriormente, se revisan los parámetros del movimiento del terreno, tales como aceleración máxima (PGA), velocidad máxima (PGV) y los espectros de respuesta. Así mismo se introducen los conceptos de la propagación de ondas sísmicas, lo que permite comprender como las condiciones geológicas locales modifican la señal observada y justifican la importancia de considerar los efectos de sitio en los modelos de predicción.

Con base en lo anterior, se profundiza en el desarrollo de las GMPE, detallando los distintos métodos de regresión que suelen ser empleados en su calibración. Finalmente, se presenta la metodología basada en el análisis probabilista del peligro sísmico (Figura 3.8), el cual permite incorporar la incertidumbre asociada a las fuentes sísmicas el trayecto y el sitio, a diferencia del análisis determinista. Dentro de este marco, se presenta la diferencia entre términos como riesgo y peligro destacando su relevancia en el contexto del diseño sísmico.

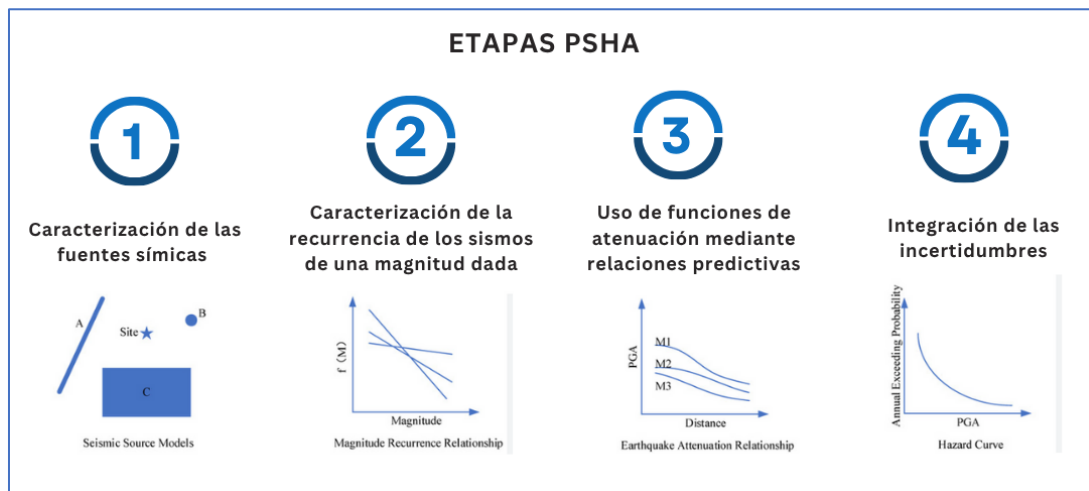


Figura 3.8 Descripción de las etapas del método PSHA – Enfoque probabilista.

3.2.1 Magnitud, Momento Sísmico y Saturación de la Magnitud.

La magnitud de los sismos está relacionada con la energía liberada durante un sismo. Esta energía proviene del comportamiento de las rocas que se rompen debido a tensiones acumuladas. Una medida para cuantificar el tamaño físico de un sismo es mediante el momento sísmico (M_0), el cual se calcula a partir del área de la falla que se ha desplazado, el deslizamiento promedio en la falla y la rigidez del material de la corteza terrestre. El momento sísmico se define:

$$M_0(t) = \mu [\bar{u}] A, \quad 3.1$$

donde μ es el módulo de rigidez al cortante $[\bar{u}]$ es el deslizamiento y A es el área de ruptura

La liberación de energía depende del tipo de evento. En eventos más grandes las amplitudes de las frecuencias altas son más pequeñas en comparación con las frecuencias bajas debido a la duración del evento. Es importante recordar que las altas frecuencias tienden a atenuarse con mayor facilidad.

Cada sismo tiene una duración finita, lo que establece un límite natural a las frecuencias que pueden contener. Este límite está determinado por el tamaño de la falla y el tiempo de ascenso, una propiedad local que se refiere al comportamiento de un punto específico de la falla, y relaciona el inicio de la ruptura con su desplazamiento hasta alcanzar su valor máximo en ese mismo punto.

Estas diferencias en la liberación de energía y las frecuencias dominantes explican las limitaciones de las escalas de magnitud tradicionales, como la magnitud de onda de cuerpo (m_b) y la magnitud de onda de superficie (M_s).

La magnitud de onda de cuerpo (m_b) se calcula mediante la amplitud de las ondas primarias,

$$m_b = \log\left(\frac{A}{T}\right) + Q(D, h). \quad 3.2$$

Amplitud del terreno en micrómetros A , el periodo de la onda en segundos T y un factor de atenuación Q que depende de la distancia epicentral D en grados y la profundidad del sismo h .

Por otra parte, la magnitud de superficie (M_s)

$$M_s = \log_{10}\left(\frac{A}{T}\right) 1.66 \log_{10} D + 3.30. \quad 3.3$$

Se calcula usando la amplitud máxima de las ondas superficiales M_s las cuales generalmente son las ondas Rayleigh con periodos de oscilación entre 18 y 22 segundos. Se utiliza para sismos grandes, pero también sufre una saturación con sismos de 8.3-8.7.

En terremotos grandes, estas escalas presentan un fenómeno conocido como saturación de la magnitud, donde las magnitudes dejan de aumentar a pesar de que el momento sísmico (M_0) sigue creciendo significativamente (Stein y Wyssession, 2003). Por ejemplo, la magnitud m_b se satura alrededor de 6.2 porque mide principalmente ondas de alta frecuencia, que no aumentan proporcionalmente con el tamaño del evento. De manera similar, M_s se satura cerca de 8.3 debido a los límites en las amplitudes de las ondas de baja frecuencia.

Una solución a este problema es utilizar la magnitud de momento (M_w), la cual se basa en el momento sísmico y no está limitada por un rango específico de frecuencias. La magnitud de momento proporciona una medida del tamaño real del evento al relacionar parámetros físicos como el área de ruptura, el deslizamiento en la falla y la rigidez del material. Esta magnitud se determina a partir del momento sísmico, cantidad proporcional al área de ruptura y al deslizamiento que ocurra en la falla. Su estimación es compleja y puede llevarse a cabo empleando diversos métodos y tipos de datos (Kanamori, 1977; Hanks y Kanamori, 1979).

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 10.7. \quad 3.4$$

Villalón y Palau (2018) señala que contar con una escala de magnitud es fundamental para cuantificar la dimensión de los eventos sísmicos, así como para la elaboración de un catálogo. Asimismo, destaca la importancia de que las magnitudes empleadas sean homogéneas en su tipo y lo más consistentes posibles entre sí, lo que permite realizar una comparación adecuada entre los distintos períodos que conforman el catálogo.

La homogenización de múltiples catálogos requiere un análisis minucioso de los datos disponibles, pues se quieren identificar los eventos duplicados en distintas fuentes. Además, es fundamental desarrollar y aplicar modelos empíricos que permitan estandarizar las magnitudes y ajustarlas a los parámetros del catálogo homogenizado.

Uno de los valores con mayor influencia en el análisis y mayor discrepancia entre sí es la escala de magnitud registrada en cada archivo. Estas magnitudes pueden no estar bajo la misma escala y no representar la misma energía liberada, por lo que es necesario homogeneizar estas escalas para obtener sus valores correspondientes en la escala M_w .

La homogenización de las magnitudes, al convertir magnitudes tradicionales como mb o M_s en M_w es fundamental para establecer una relación adecuada en estudios de sismicidad, como la ecuación de Gutenberg-Richter. Esta ecuación, que describe la relación entre el número de eventos sísmicos y su magnitud, requiere magnitudes consistentes y comparables para representar correctamente la distribución de energía de los sismos y evitar sesgos asociados a la saturación de las magnitudes tradicionales.

La Figura 3.9 ejemplifica los problemas de catálogos no homogéneos. La base de datos corresponde al Sismológico Nacional del periodo 1900-01-01 al 2025-01-06, correspondiente al área que abarcan las coordenadas Latitud 15.3 a 20.81 y Longitud -106.22 a -89-57.91

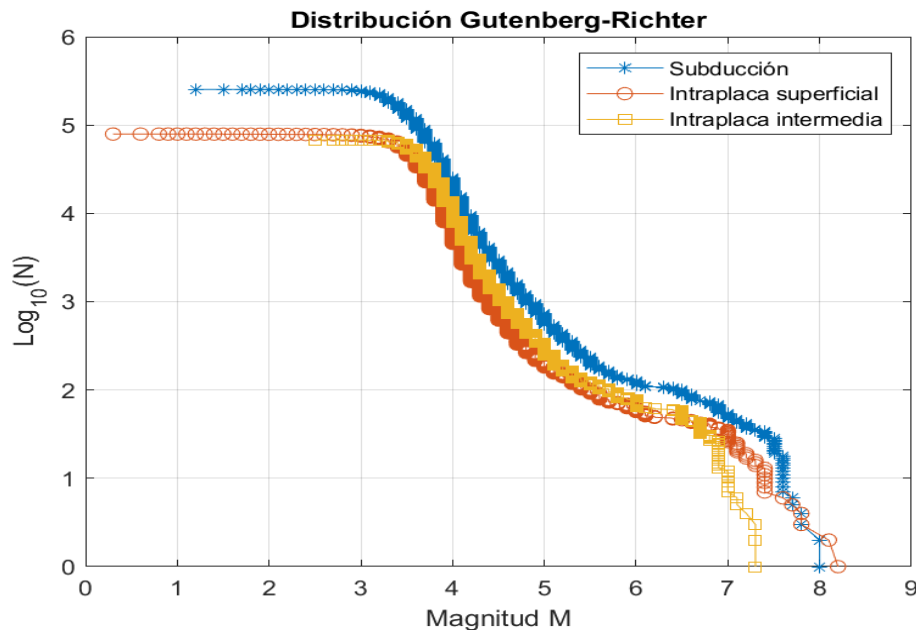


Figura 3.9 Distribución Gutenberg-Richter. La base de datos empleada corresponde al Sismológico Nacional del periodo 1900-01-01 al 2025-01-06, correspondiente al área que abarcan las coordenadas Latitud 15.3 a 20.81 y Longitud -106.22 a -89-57.91
Fuente: Elaboración Propia con el catálogo del SSN.

El problema de la falta de homogenización en las magnitudes en el catálogo del SSN, derivado del uso de diferentes escalas (como **mb**, **Ms**, entre otras), genera una dispersión en los datos, especialmente a los de mayor magnitud. La no unicidad en las escalas afecta en la calidad del ajuste de los modelos de predicción del movimiento del suelo, reduciendo su confiabilidad. Además, se presenta el fenómeno de saturación en magnitudes como **mb** y **Ms**, provocando una subestimación en número real de los eventos con mayor energía. Esto se refleja en la falta de linealidad en la distribución de frecuencia – magnitudes, distorsionando la pendiente esperada de la relación GR. Como consecuencia, el cálculo del parámetro b resulta sesgado, llevando a interpretaciones erróneas sobre la sismicidad regional y la tasa de ocurrencia de los sismos.

Para facilitar la comparación y el análisis de datos sísmicos de diferentes escalas tales como **Ms** y **Mb**, se utilizan relaciones empíricas para convertirlos a una escala común, como **Mw**. Existen diversos estudios como el de Scordilis (2006) analizó estas relaciones, encontrando para sismos someros ($h < 70$ km):

$$\text{Para } 3.0 \leq M_s \leq 6.1: M_W = 0.67(\pm 0.005) M_S + 2.07(\pm 0.03) \quad 3.5$$

$$(R^2 = 0.77, \sigma = 0.17, n = 23,921).$$

$$\text{Para } 6.2 \leq M_s \leq 8.2: M_W = 0.99(\pm 0.02) M_S + 0.08(\pm 0.13) \quad 3.6$$

$$(R^2 = 0.81, \sigma = 0.20, n = 2,382).$$

Respecto de la magnitud de cuerpo (**Mb**), Scordilis reportó una relación aproximadamente lineal hasta **mb** ≈ 6.2 :

$$\text{Para } 3.5 \leq M_b \leq 6.2: M_W = 0.85(\pm 0.04) M_b + 1.03(\pm 0.23). \quad 3.7$$

El estudio señaló la baja calidad de los datos para **Mb** < 4.5 , aunque la relación da estimaciones indicativas, y una saturación para **Mb** > 6.2 , evidenciada por un aumento en la pendiente.

En otro estudio, Sawires *et al.* (2019) utiliza esta transformación mediante ecuaciones obtenidas de manera empírica a partir de la determinación de coeficientes lineales y cuadráticos mediante regresiones estadísticas para sismos en la República Mexicana utilizando datos del International Seismological Centre, ISC y del United States Geological Survey, USGS.

3.2.2 Parámetros del Movimiento del Terreno

Los parámetros del movimiento del terreno (PMT) son fundamentales para caracterizar los efectos de los sismos, especialmente en estudios de movimiento fuerte. Estos parámetros se obtienen, principalmente, de acelerogramas registrados por instrumentos especializados, se agrupan en tres categorías: parámetros de amplitud, duración y contenido espectral (Kramer, 1996). La clasificación de los PMT agrupa según su naturaleza física en tres categorías principales: 1) parámetros de amplitud, que miden la intensidad máxima del movimiento, 2) parámetros de duración, que evalúan el tiempo de agitación de la fuente; y 3) parámetros de contenido espectral, que describen la distribución de energía en función de la frecuencia. La Tabla 3.2.2 presenta algunos de los más comunes.

PARÁMETROS DE AMPLITUD	DURACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE
• Velocidad pico (Peak Ground Velocity, PGV) • Desplazamiento pico (Peak Ground Displacement, PGD) • Raíz cuadrática media de la aceleración	• Duración acotada (Bracketed Duration)
PARÁMETROS DE CONTENIDO ESPECTRAL	OTROS PARÁMETROS
• Espectro de respuesta espectral • Espectro de potencia	• Intensidad de Arias • Intensidad de Housner •

Tabla 3.1 Parámetros del movimiento del terreno (PMT). Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.1 Instrumentación para el monitoreo del movimiento

Para la obtención de estos parámetros se utilizan dos tipos principales de sensores:

Sismómetros: censan movimientos del terreno con alta sensibilidad, incluyendo eventos de baja intensidad y a grandes distancias. Generalmente miden tres componentes ortogonales: norte-sur, este-oeste y vertical. Los sismómetros de banda ancha permiten registrar un rango amplio de frecuencias con gran sensibilidad, permitiendo tener una mejor estimación de la localización de los sismos que ocurren en el territorio nacional. A partir de los registros de aceleración del terreno, en ocasiones y en ciertos rangos es posible calcular la velocidad y el desplazamiento del suelo mediante métodos de corrección por la línea de base.

Acelerómetros: están diseñados específicamente para medir la aceleración del terreno, especialmente ante movimientos fuertes provocados por grandes sismos. Estos instrumentos son esenciales para determinar las características del movimiento que se considera en el diseño de estructuras. Los sensores captan la variable asociada al movimiento de manera analógica y junto con los sistemas de conversión analógica digital se registran los movimientos para ser procesados.

El registro instrumental de un evento sísmico, como el sismo de 2017/Sep/19, se representa como un conjunto de series de tiempo correspondientes a las componentes Sur-Norte (SN), Este-Oeste (EW) y Vertical, ver la Figura 3.10.

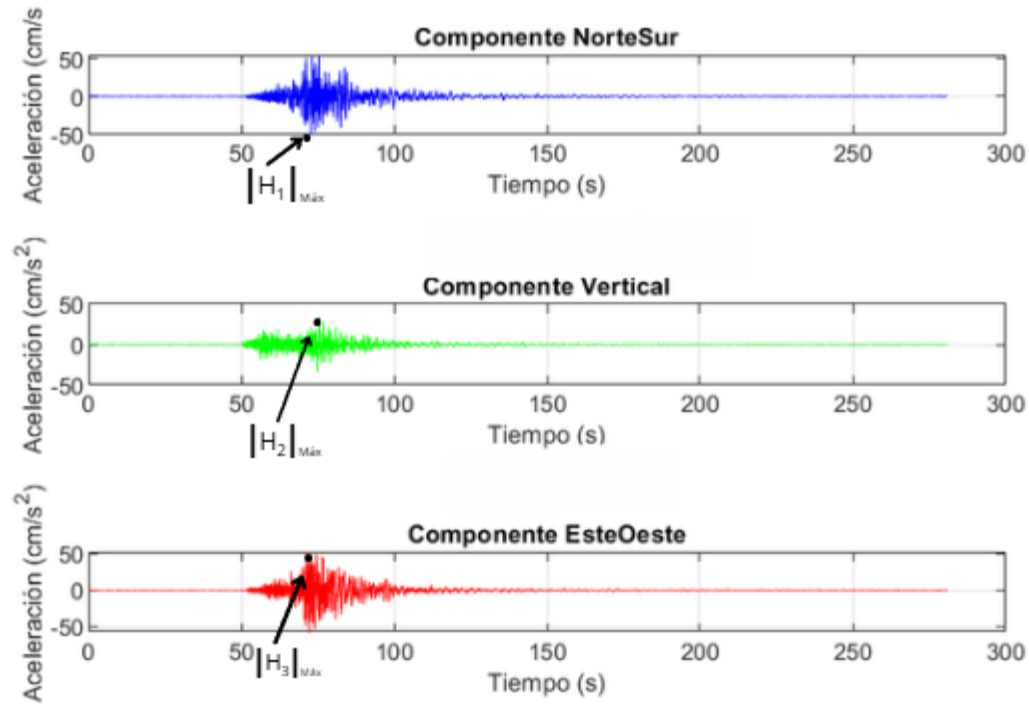


Figura 3.10 Registros de aceleración correspondientes al 19 de septiembre del 2017 registrado en el CU. se muestran en azul para la componente Norte, en Rojo para la componente Este-Oeste y la componente Vertical en verde.

La definición exacta de PMT varía entre investigaciones y es imprescindible para mantener la consistencia de los cálculos orientados a determinar el peligro sísmico.

Generalmente, los PMT se asocian con la severidad de la sacudida y las afectaciones, por lo cual es común referirse a ellos como parámetros de intensidad.

Los registros están compuestos por componentes, dos horizontales y una vertical. En la Figura 3.10 las dos componentes están orientadas hacia el norte y este. En la misma figura indican los valores de las aceleraciones más grandes en magnitud $|H_1|_{\text{máx}}$, $|H_2|_{\text{máx}}$ y $|H_3|_{\text{máx}}$ para las componentes norte, este y vertical; respectivamente.

Actualmente, las normas de construcción no consideran la componente vertical para el diseño o se siguen recetas sencillas para aproximar su influencia. Así, los valores picos se definen casi exclusivamente con las componentes H_1 y H_2 considerando

$$\text{La media cuadrática} = \sqrt{\frac{|H_1|_{\text{máx}}^2 + |H_2|_{\text{máx}}^2}{2}}, \quad 3.8$$

$$\text{La media geométrica} = \sqrt{|H_1|_{\text{máx}}^2 \cdot |H_2|_{\text{máx}}^2}, \quad 3.9$$

$$\text{La media aritmética} = \frac{|H_1|_{\text{máx}} + |H_2|_{\text{máx}}}{2}, \quad 3.10$$

$$\text{O el valor máximo en magnitud de las dos componentes} = \max(|H_1|_{\text{máx}}, |H_2|_{\text{máx}}). \quad 3.11$$

La media cuadrática es utilizada en varias GMPE mexicanas, especialmente, en aquellas desarrolladas para sismos de tipo intraslab (profundidad intermedia). Por ejemplo, el trabajo de García, Sing *et al.* (2005) y estudios posteriores (Jaimes, Ramírez-Gaytán & Reinoso, 2015; Jaimes, Lermo & García Soto, 2016; Jaimes & García Soto, 2020) definen el parámetro de intensidad como la componente horizontal de la media cuadrática, asegurando la validez de los coeficientes de atenuación para este valor. Es utilizada y considerada por muchos como una medida más racional desde el punto de vista físico, y es la métrica preferida de los modelos internacionales (NGA).

Tras definir la combinación de las componentes horizontales, es necesario especificar la naturaleza física de los PMT utilizados en este trabajo siguiendo a Stein & Wyssession (2003), los parámetros de intensidad para la ingeniería sísmica se clasifican según describan: 1) el movimiento del suelo o 2) la respuesta a la estructura.

La PGA es el valor máximo absoluto de la aceleración registrada en el acelerograma. Por otro lado, la Pseudo aceleración (SA) es una función del periodo estructural y del amortiguamiento que describe la respuesta máxima de aceleración que experimenta un sistema elástico. Por ejemplo, un oscilador de un grado de libertad al someterse a una aceleración sobre la base del sistema (Figura 3.11).

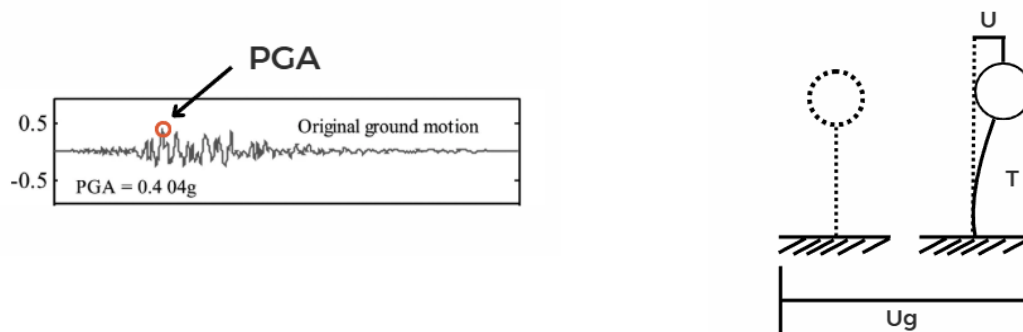


Figura 3.11 Representaciones gráficas de los parámetros PGA, SA. Sirve como una herramienta visual para comprender el movimiento del terreno en el dominio del tiempo, respuesta estructural y frecuencia.

En particular, la aceleración puede expresarse en diferentes unidades según el contexto del análisis. La más comunes son: fracciones de g , donde g corresponde a la aceleración gravitacional estándar ($1\text{ g} = 9.81\text{ m/s}^2$); conforme al sistema internacional; o en Gal, una unidad en la que $1\text{ Gal} = 0.01\text{ m/s}^2$, lo que 1 g equivale a 981 Gal. La elección de la unidad depende del estándar adoptado en cada estudio o normativa.

La escala de intensidad macrosísmica de Mercalli Modificada se basa en observaciones subjetivas de los efectos del sismo en personas, estructuras y el entorno, no en registros instrumentales, y como se ha mencionado los PMT asocian a la intensidad. Es posible establecer correlaciones empíricas entre PGA e intensidad macrosísmica, pero presentan una alta incertidumbre, ya que la percepción del movimiento puede variar significativamente de acuerdo con otros factores locales como el tipo de suelo, la altura de las edificaciones o la vulnerabilidad estructural.

La medida de intensidad depende del escenario de aplicación específico. Además, se utilizan otras medidas instrumentales con significado físico, como la intensidad de Arias, siendo una medida de energía total del movimiento sísmico determinada mediante la integral de la aceleración cuadrática a lo largo del tiempo.

El tipo de terreno puede influir significativamente en la aceleración del suelo registrada, aún a distancias cortas, los valores de los PMT pueden variar considerablemente debido a efectos locales de sitio, como la amplificación. Esto es especialmente relevante en sismos moderados a grandes. Los diferentes resultados de PGA pueden representarse mediante mapas de sacudida ofreciendo una visión rápida de la intensidad del movimiento en diferentes zonas afectadas.

La Aceleración Espectral (SA) representa la respuesta sísmica máxima en términos de aceleración de un oscilador de un grado de libertad, con un amortiguamiento específico (generalmente 5%), a un movimiento del suelo dado, en función de su período natural de vibración (T) (véase Chopra, 2012).

El cálculo del espectro de respuesta consiste en resolver la ecuación diferencial:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) + u(t), \quad 3.12$$

donde: m=masa del oscilador, c=amortiguamiento, k = rigidez y $\ddot{u}_g$ es la aceleración del suelo (ver figura 3.11). El desplazamiento u es el referido a la base del oscilador con respecto a la posición en el tiempo $t=0$ es $u^T(t) = u + u_g$

Una vez resuelta la ecuación 3.2.12 para una aceleración del suelo y un ξ fijo para diferentes T, dado que ecuación 3.2.13 puede expresarse como:

$$\ddot{u} + \frac{c}{m}\dot{u} + \frac{k}{m}u = -\ddot{u}_g, \quad 3.13$$

$$m\ddot{u} + \frac{4\pi}{T}\xi\dot{u} + \frac{2\pi^2}{T^2}u = -\ddot{u}_g, \quad 3.14$$

donde $\xi = \frac{c}{2\xi_w}$ se gráfica $\{T_i\}$ contra $\{|U_{máx}| \}$ o la variable de interés, como $\{|\ddot{u} + \ddot{u}_g|_{máx}\}$ = la aceleración máxima absoluta. A este último se le conoce como el espectro de aceleración (espectral).

La velocidad pico describe principalmente el efecto del movimiento en frecuencias intermedias, por lo tanto, provee información del potencial del daño sobre estructuras en este rango de frecuencias, como son edificios altos, puentes, etc. Además, este parámetro tiene una mejor correlación con la intensidad macrosísmica (Kramer, 1996).

El desplazamiento pico es el máximo valor de desplazamiento en un registro, pero es el parámetro menos utilizado ya que solía ser difícil determinarlo con una buena precisión, a causa de la falta de aparatos con gran resolución en bajas frecuencias. Actualmente se obtienen mediante el uso de GPS.

El espectro de amplitud de Fourier (FAS, por sus siglas en inglés: Fourier Amplitud Spectrum) es la representación del dominio de las frecuencias. Específicamente, el FAS representa la amplitud de la aceleración horizontal para una frecuencia dada, permitiendo identificar y cuantificar la energía del sismo en función de la frecuencia. Este enfoque permite la incorporación directa de la física del fenómeno (fuente y el trayecto), siendo la base de los modelos de aproximación de campo lejano y el modelo de la fuente de Brune. Por su capacidad de modelar la atenuación y la amplificación del sitio, el FAS se recomienda como una variable en modelos robustos, especialmente cuando los datos son limitados.

3.2.3 Ecuaciones de Predicción del Movimiento del Suelo

Las ecuaciones de predicción del movimiento del suelo o *Ground Motion Prediction Equations* (GMPE) son relaciones empíricas o semiempíricas desarrolladas para estimar la intensidad del movimiento sísmico en función de parámetros como la magnitud del sismo, la distancia al hipocentro y las condiciones del sitio. Estas ecuaciones pueden incluir la aceleración máxima del suelo (PGA) o las ordenadas espectrales de respuesta; además, son fundamentales en la evaluación del peligro sísmico, ya que permiten estimar la aceleración espectral esperada en distintos escenarios sísmicos.

Las GMPE consideran factores que contribuyen en el movimiento del suelo, como, la fuente sísmica caracterizada por la magnitud del evento y su mecanismo de ruptura, la trayectoria de propagación de las ondas sísmicas que incluye la distancia entre la fuente y el sitio receptor y las condiciones locales del sitio como el tipo de suelo o la velocidad de las ondas s.

La magnitud (M) y la distancia fuente-sitio (R) son utilizadas como las variables predictoras principales en las GMPE, ya que describen los efectos de la fuente sísmica y la trayectoria, respectivamente. Su incorporación es esencial para definir escenarios sísmicos y realistas (combinaciones M-R) para los cuales se predicen las características del movimiento del suelo. La magnitud y la distancia no son meramente entradas estadísticas; representan los procesos físicos fundamentales de liberación de energía del sismo (magnitud) y su posterior propagación y atenuación a través de la corteza terrestre (distancia). Por lo tanto, su incorporación en las formas funcionales de las GMPE es primordial para que cualquiera sea físicamente realista y fiable.

El desarrollo de las GMPE se fundamenta en el análisis estadístico de los datos de movimiento del suelo registrados. Se han usado comúnmente métodos de regresión convencionales, entre los más comunes: regresión ponderada, regresión de dos etapas y técnicas de efectos aleatorios para establecer relaciones entre la intensidad del movimiento del suelo y las variables predictoras como la magnitud, la distancia y las características del sitio. Sin embargo, estos métodos suelen requerir un número sustancial de puntos de datos para producir estimaciones fiables y estables (Jaimes, Lermo y García-Soto, 2016).

La derivación de Modelos de Predicción del Movimiento del Suelo (GMPE) debe realizarse con enfoques de máxima verosimilitud (de una o dos etapas) o de efectos aleatorios. La solidez estadística y la precisión de estos métodos son cruciales para obtener estimaciones confiables de la intensidad del movimiento del suelo y su incertidumbre. (John Douglas (2011:18), citando a Bommer (2010)). Estos métodos permiten ajustar la relación funcional entre la intensidad del movimiento del suelo y las variables predictoras, que a la vez estiman la dispersión aleatoria del modelo. Es importante destacar que la precisión del ajuste dependerá en gran medida del número de datos y calidad de la base de datos. La capacidad de la GMPE para predecir los movimientos del suelo observados debe evaluarse utilizando conjuntos de datos independientes (Stewart *et al.*, 2015).

La funcionalidad de una GMPE basada en un punto de referencia depende de que el punto de referencia elegido represente adecuadamente el comportamiento sísmico regional y de que el modelo pueda capturar con precisión las desviaciones en todo el rango de parámetros.

El movimiento fuerte del suelo es el resultado de la combinación de diversos factores. Estos factores suelen aislarse y simplificarse para modelarlos a través de ecuaciones paramétricas (García Jiménez, 2006). Entre los principales factores están los efectos por la fuente (magnitud y mecanismo de ruptura); la trayectoria (distancia según su clasificación, campo cercano o campo lejano, propagación de las ondas desde la fuente hasta el sitio de interés); y el sitio (efectos de sitio, geología local). Dado que estos factores son complejos, las GMPE tienden a simplificarlos en relaciones paramétricas que permiten su implementación práctica en estudios.

En muchas regiones, particularmente las que son consideradas con sismicidad moderada o para condiciones específicas del sitio, la disponibilidad de registros de movimiento fuerte es limitada, por lo cual esta limitación introduce incertidumbre epistémica, que es la incertidumbre debida a la falta de conocimiento, en las GMPE (Cotton *et al.*, 2006; Stewart *et al.*, 2015). Además, el modelo debe ser apropiado a las condiciones tectónicas y geológicas locales. Por ello, muchas GMPE son desarrolladas en regiones con sismicidad alta. Sin embargo, los registros de grandes sismos o con intensidades altas no pueden aplicarse directamente a otras regiones sin ajustes; deben ser apropiados para el entorno geológico y tectónico a analizar. Esta necesidad ha impulsado el desarrollo de GMPE regionales, o bien la calibración de modelos globales con base en la información local.

La forma matemática (o funcional) de la GMPE debe capturar adecuadamente la relación entre la intensidad del movimiento del suelo y las variables predictoras (Stewart *et al.*, 2015). Los parámetros deseables pueden incluir la saturación de magnitud, el escalamiento de la distancia dependiente de la magnitud y los términos que representan la atenuación anelástica. De manera general, las GMPE se pueden expresar como:

$$\log Y = E(\text{magnitud, tipo de falla, distancia, efecto de sitio}) + \varepsilon. \quad 3.15$$

Y= parámetro del movimiento del terreno o de intensidad

E= Es el valor esperado de logY

ε = Es la distribución que describe el parámetro

El modelo estadístico más común es:

$$\log Y = \alpha_1 + \alpha_2 M + \alpha_3 R + \alpha_4 \log R + \varepsilon. \quad 3.16$$

ε = Distribución alrededor del parámetro dado $N(0, \sigma)$. Usualmente para sigma σ supone que los errores son homocedásticos (con varianza constante).

Se utilizan diversas métricas de distancia, como la distancia hipocentral (distancia más corta al hipocentro), la distancia de ruptura (distancia más corta a la superficie de la falla), la distancia de Joyner-Boore (distancia más corta desde un sitio hasta la proyección en la superficie de la falla extendida o del plano de ruptura) o epicentrales.

De acuerdo con Douglas (2024), existen 505 GMPE empíricas para la predicción de PGA y 324 modelos empíricos para la predicción de ordenadas espectrales de respuesta elástica publicadas entre los años 1964 y 2023 a nivel mundial. En años recientes, este número ha continuado incrementándose a través de iniciativas como el proyecto NGA-West3; sin embargo, el número final de GMPEs asociadas aun no ha sido oficialmente publicado (Buckreis y Stewart, 2025).

Los primeros modelos de atenuación fueron propuestos por Esteva & Rosenblueth (1964); posteriormente, en México se han utilizado las de Esteva (1970), Ordaz *et al.* (1989), McCann Jr. & Echezwia (1984), y Lermo-Samaniego *et al.* (2020); dichas ecuaciones han sido usadas en condiciones específicas, como el tipo de fuente.

La capacidad de predecir movimientos de suelo para escenarios puntuales en magnitud-distancia es importante para la evaluación probabilística del peligro sísmico (PSHA) y el diseño basado en el rendimiento.

La evaluación regional y local del peligro utiliza las siguientes ecuaciones de movimiento del suelo adaptadas a diferentes tipos de sismicidad Sawires *et al.*, (2019)

- Terremotos corticales: Chiou y Youngs (2014) y Abrahamson *et al.* (2014).
- Sismicidad de subducción interplaca: Zhao *et al.* (2006) y Arroyo *et al.* (2010).

- Fuentes de subducción intraplaca: Zhao *et al.* (2006) y García-Acosta (2004).

Con esta información, se generaron curvas de peligro sísmico para ciudades importantes como la Ciudad de México y mapas de peligro sísmico regional.

3.2.3.1 Formas funcionales de las GMPE en México

Tras haber definido las GMPE, es importante revisar las formas funcionales que se han adoptado en el contexto sísmico mexicano. La selección de una forma funcional adecuada depende de factores como: el tipo de fuente (interplaca, intraplaca, o local), el sitio de interés (terreno firme o zona de lago), de los datos disponibles y el método de regresión a emplear.

El objetivo es obtener la mejor capacidad predictiva con la menor complejidad posible (usando menos variables). Se busca un modelo que además de ajustarse a los datos, sea capaz de extrapolarse de manera fiable fuera de los rangos establecidos por datos empíricos observados, de tal manera que sea realista por ejemplo en casos en los cuales las distancias sean cortas y las magnitudes grandes.

Para construir se escoge la forma más simple y, posteriormente, se añade complejidad por etapas, considerando la significación estadística de cada modificación y su impacto en el error estándar. El modelo debe ser compatible con la cantidad y calidad de datos disponibles. Esto implica que se deben obtener soluciones numéricas estables y físicamente consistentes.

En México la selección de la forma funcional en el país ha sido influenciada por el número de datos disponibles para eventos específicos y la necesidad de incorporar la teoría sismológica. Por esta razón, la regresión bayesiana es la más frecuente, ya que permite incorporar la información *a priori* en casos con datos limitados.

Para garantizar que un modelo sea físicamente consistente y numéricamente estable debe cumplir con los siguientes criterios de racionalidad:

1. Restricciones físicas centradas en la propagación de la onda:
 - Atenuación geométrica: el coeficiente que describe cómo la energía de la onda sísmica se dispersa a medida que se propaga a través del medio, generalmente en la función del logaritmo de la distancia debe ser negativo.
 - Atenuación anelástica: el coeficiente relacionado con la atenuación anelástica también debe ser negativa, reflejando la pérdida de energía de las ondas a lo largo de la trayectoria.
2. Manejo de no linealidad: la no linealidad se incorporó con el objetivo de resolver efectos de saturación a distancias cortas (por ejemplo, el uso de la distancia de referencia o h). si la función no es lineal, puede ser necesario linealizarla fijando coeficientes y resolviendo con iteraciones, ya que los métodos de regresión lineal simple se han considerado inestables.

En México, debido a la heterogeneidad de la red sísmica y la limitación de datos para ciertos tipos de eventos, se prefiere el uso de la regresión bayesiana. Este enfoque permite integrar información *a priori* y la teoría sismológica para compensar la falta de registros.

A continuación, se describen algunas de las formas funcionales utilizadas en este país, clasificadas por la complejidad del modelo y el parámetro de intensidad.

Formas funcionales lineales estándar (RLM)

Esta estructura se basa en la regresión lineal múltiple y son comunes para modelar eventos de subducción, Inslab y locales. Su diseño es ideal para integrarse eficientemente con el análisis bayesiano.

Tipo de parámetro	Ecuación estándar	Usos principales
Pseudoaceleración espectral	$\ln Y(T) = \alpha_1 + \alpha_2(M_w - 6) + \alpha_3 \ln R + \alpha_4 R + \epsilon$	Subducción (Reyes, 1999), Inslab (Jaimes et al., 2015) y sismos locales
Espectro de amplitud de Fourier - FAS	$\ln A(F) = a'_0 + a'_1 M + a'_2 + a'_3 R + \epsilon$	Subducción. Se utiliza como variable intermedia para aplicar restricciones y luego predecir S_a usando la Teoría de Vibración Aleatoria (RTV).

Tabla 3.2 Ejemplos de las ecuaciones estándar según el tipo de parámetro

Formas funcionales con mayor detalle físico

Para mejorar la precisión en eventos específicos, se han desarrollado ecuaciones que incorporan términos no lineales. Estas ecuaciones o variables adicionales, como la profundidad focal (H).

Tipo de parámetro	Ecuación del parámetro	Característica y uso
PGA Histórico (interplaca)	$\log PGA = 1.75 - 0.30 M_w + 0.0031 R - \log R$	Modelo Ordaz et al. (1989). Combina términos lineales y logarítmicos para la magnitud y la distancia.
Log PGA con profundidad (Inslab)	$\log PGA = -0.008 H - \log R$	Modelo de García et al. (2005) incluye el término de profundidad focal en H para eventos inslab en la parte central, aunque modelos como el de Jaimes et al. (2015) lo han incluido.

Tabla 3.3 Modelos con incorporación de términos físicos adicionales.

La fiabilidad de estas estimaciones reside en la cuantificación correcta de la incertidumbre. Un modelo funcional es exitoso no solo con ajustar los datos, si no cuando su estructura permite una extrapolación físicamente consistente, garantizando así la estabilidad necesaria para el diseño de infraestructura y la evaluación del peligro sísmico.

3.2.4 Métodos de Regresión para el Ajuste de GMPE

La regresión es una técnica estadística utilizada para modelar la relación entre una variable dependiente (o de respuesta) y una o más variables independientes (o predictoras). El objetivo principal es encontrar la "mejor" línea, curva o superficie que se ajuste a los datos observados, permitiendo así:

- **Comprender la relación:** Determinar qué variables independientes influyen significativamente en la variable dependiente y en qué dirección (positiva o negativa).
- **Predecir valores futuros:** Estimar el valor de la variable dependiente para nuevos valores de las variables independientes.

El modelo de regresión lineal más simple se puede expresar como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon. \quad 3.17$$

Donde:

- Y es la variable dependiente.
- X es la variable independiente.
- β_0 es el intercepto
- β_1 es el coeficiente de regresión o pendiente
- ϵ es el término de error o residual, que representa la variabilidad no explicada por el modelo.

El objetivo de la regresión es estimar los valores de β_0 y β_1 (y cualquier otro coeficiente si hay más variables independientes) de la manera más precisa posible a partir de los datos.

Para este estudio nos basaremos en los modelos máxima verosimilitud de dos etapas o dos pasos, el cual tiene como objetivo obtener coeficientes que ajusten mejor al conjunto de datos de PGA disponibles. En el contexto de la sismología y el análisis de movimiento fuerte del suelo, los métodos de regresión son herramientas estadísticas fundamentales que permiten establecer relaciones matemáticas entre diversas variables. Su principal uso es predecir el valor de una variable dependiente (como la PGA) en función de una o más variables independientes (como la magnitud del sismo y la distancia).

3.2.4.1 Método Joyner y Boore (dos pasos)

El método de dos pasos, propuesto por Joyner y Boore en 1981, es una técnica estadística utilizada para analizar datos de movimiento fuerte del suelo y desarrollar relaciones de predicción de la intensidad del terreno. Tiene como propósito separar la dependencia de la magnitud y la distancia en la relación de atenuación del movimiento del suelo. En el primer paso, se realiza una regresión para determinar los coeficientes que relacionan la magnitud con la amplitud del movimiento del suelo. En el segundo paso, se utiliza una segunda regresión para determinar la dependencia de la distancia, utilizando los coeficientes de magnitud obtenidos en el primer paso.

Una de las principales ventajas del método de dos pasos es que ayuda a reducir la correlación entre la magnitud y la distancia, lo que mejora la precisión de las estimaciones de los parámetros de atenuación. Además, este método permite considerar la variabilidad entre eventos sísmicos, lo cual es esencial para obtener resultados confiables.

De acuerdo con García Jiménez (2001), a pesar de su eficacia y popularidad, el método de dos pasos tiene algunas limitaciones, lo cual resultó en el desarrollo de diversas modificaciones a lo largo del tiempo. Una de ellas es que el método no funciona de forma óptima con los eventos sísmicos que cuentan únicamente con un registro. Estos datos, al ser excluidos del cálculo de la función de magnitud, pueden llevar a una subestimación de la variabilidad real del movimiento del suelo. En segundo lugar, el método supone que el error en la determinación de la curva global es despreciable. Si bien esta simplificación facilita el análisis, es importante considerar que podría no reflejar adecuadamente la complejidad de los datos, especialmente en situaciones donde la variabilidad es alta.

Sin embargo, debemos considerar que el método de dos pasos ha evolucionado significativamente gracias a diversas modificaciones que buscan mejorar estas limitaciones. Entre ellas, se encuentran el uso de ponderaciones diagonales (Joyner y Boore, 1988; Fukushima y Tanaka, 1990); y no diagonales (Masuda y Ohtake, 1992) en la segunda etapa del método.

3.2.4.2 Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO)

El método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO) es una técnica para estimar los parámetros de un modelo de regresión lineal. Usa el criterio de minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo para que se aproxime lo más posible a la realidad.

El modelo de regresión lineal se expresa como:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon,$$

donde y es la variable dependiente, x es la variable independiente, β_0 (*intercepto*) y β_1 (*pendiente*) son los parámetros del modelo.

Para estimar los parámetros, el método MCO utiliza la función de costo, que mide la suma de los cuadrados de los residuos (diferencia entre el valor observado y el valor predicho) con el objetivo de encontrar los parámetros del modelo que minimizan la función:

$$J(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^N (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i))^2. \quad 3.18$$

Para encontrar los valores óptimos, se utilizan técnicas de cálculo diferencial, como la derivación parcial de la función de costo L_2 con respecto a cada parámetro e igualando estas derivadas a cero.

$$\frac{\partial L_2}{\partial \beta_0} = 0 \text{ y } \frac{\partial L_2}{\partial \beta_1} = 0. \quad 3.19$$

Generando un sistema de ecuaciones lineales cuya solución obtiene las estimaciones de los parámetros. Este resultado es una solución analítica directa para la regresión lineal ya que busca los parámetros que mejor se ajusten a los datos minimizando los errores al cuadrado.

Para que las estimaciones obtenidas a través de MCO sean válidas, insesgadas y eficientes, es fundamental que se cumplan ciertos supuestos clave sobre el término de error (ϵ):

- Linealidad: La relación entre las variables dependiente e independientes debe ser lineal en los parámetros. Esto significa que el modelo describe adecuadamente la tendencia general de los datos.
- Independencia de los errores: Los errores de las observaciones deben ser independientes entre sí. No debe haber un patrón o correlación entre los residuos.
- Homocedasticidad: La varianza de los errores debe ser constante para todas las observaciones. Es decir, la dispersión de los residuos alrededor de la línea de regresión debe ser uniforme en todo el rango de los valores de las variables independientes. La violación de este supuesto (heterocedasticidad) puede llevar a estimaciones ineficientes.
- Normalidad de los errores: Aunque no es estrictamente necesario para la estimación de los coeficientes, se supone que los errores siguen una distribución normal con media cero. Este supuesto es importante para realizar inferencias estadísticas, como la construcción de intervalos de confianza y pruebas de hipótesis.
- No colinealidad perfecta: Las variables independientes no deben estar perfectamente correlacionadas entre sí. Una colinealidad perfecta imposibilitaría el cálculo único de los coeficientes.

Cuando estos supuestos se cumplen, el método de MCO proporciona los mejores estimadores lineales insesgados, un resultado conocido como el Teorema de Gauss-Markov, el cual establece que, bajo las condiciones de linealidad en los parámetros, independencia de los errores, homocedasticidad y no colinealidad perfecta, el estimador de MCO es el que posee la menor varianza dentro de la clase de estimadores lineales e insesgados (Wooldridge, 2016). Esto significa que los estimadores de MCO son

insesgados (su valor esperado es igual al verdadero valor del parámetro), y entre todos los estimadores lineales e insesgados son los que tienen la menor varianza.

3.2.5 Peligro Sísmico

Antes de evaluar el peligro potencial de los sismos u otros desastres naturales es necesario distinguir entre *Peligro* y *Riesgo*. (Stein & Wyssession, 2003). El *peligro* se refiere a la ocurrencia natural de sismos y los efectos resultantes en el suelo. El *riesgo*, en cambio, es una medida de las consecuencias causadas por los temblores para la vida y la propiedad. En este contexto, aunque el peligro es un hecho geológico que no podemos modificar, el riesgo está influenciado por las acciones humanas. Las áreas con alto peligro pueden tener bajo riesgo si hay poca población, mientras que regiones con peligro moderado pueden tener un alto riesgo debido a grandes poblaciones y construcciones deficientes. En este contexto, aunque el peligro no se puede eliminar, los riesgos sísmicos pueden reducirse mediante acciones humanas.

El peligro sísmico es la medida cuantitativa de la ocurrencia de sismos con cierta intensidad incluyendo la frecuencia, magnitud y característica de los terremotos esperados. Para su cálculo, se consideran dos enfoques, el determinista o DSHA (por sus siglas en inglés) y el probabilista (PSHA), ver Tabla 3.4

CRITERIO	ENFOQUE DETERMINISTA (DSHA)	ENFOQUE PROBABILÍSTICO (PSHA)
Definición	Escenario de "peor caso" único.	Considera todos los escenarios y sus probabilidades.
Tratamiento de Incertidumbre	Ignora o simplifica la incertidumbre.	Incorpora explícitamente la incertidumbre.
Selección del Evento de Diseño	Escenario único	Considera todos los eventos posibles.
Selección de Intensidad del Movimiento del Terreno	Mediana o media + 1 desviación estándar.	Distribución de probabilidad de la medida de intensidad (IM).
Resultado	Nivel único de movimiento del terreno.	Tasas de excedencia / Curva de peligro sísmico.
Fortalezas	Facilidad de comprensión.	Defendible, informado por el riesgo.
Limitaciones	Arbitrario, potencialmente no conservador, no captura la variabilidad.	Complejidad computacional, requiere datos extensos.
Aplicación Típica	Evaluación preliminar, proyectos con criticidad.	Diseño de infraestructura crítica, desarrollo de códigos, evaluación de riesgo.

Tabla 3.4. Criterios comparativos. Fuente: Elaboración propia.

El análisis determinista de amenaza sísmica (DSHA) indica el peor escenario posible en el sitio de análisis que afecte a las estructuras, aunque no se toma en cuenta la probabilidad de ocurrencia de ese evento, por lo que no se emplea ni se recomienda como la única manera de analizar la amenaza sísmica.

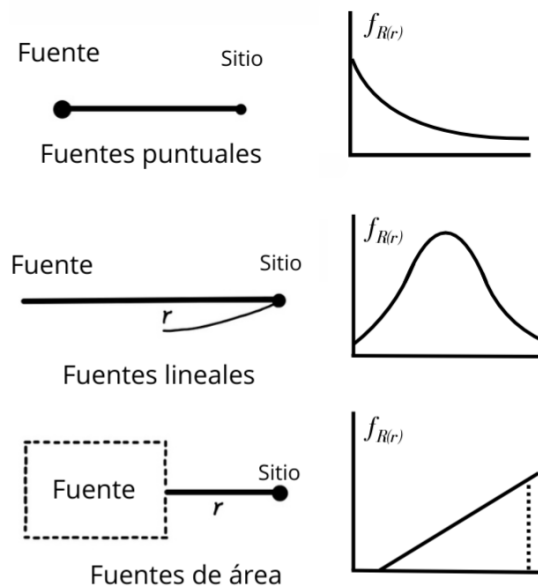
Por otra parte, el análisis probabilístico de amenaza sísmica (PSHA) involucra de manera analítica la incertidumbre asociada a las variables como la frecuencia de ocurrencia, probabilidades de excedencia en las intensidades sísmicas en el peligro sísmico en un lugar determinado. A su vez, se obtienen curvas de peligro sísmico con el fin de mostrar la frecuencia con la que se superan determinados niveles del parámetro de intensidad como es el caso de este trabajo: la aceleración máxima del terreno, PGA.

El PSHA es el enfoque elegido para este trabajo. El método permite obtener la tasa de excedencia para un determinado nivel de movimiento del suelo en un determinado sitio y asocia dicho nivel de movimiento con

una probabilidad de excedencia y un periodo de retorno. Por ello, se desarrollan modelos analíticos para el peligro sísmico en términos de parámetros de intensidad relacionados con los daños observados, tomando en cuenta la región con respecto a su recurrencia y teniendo en cuenta un periodo de retorno esperado considerando su historia sísmica. En este estudio, se consideran dos fuentes principales: Subducción e Intraplaca. La recurrencia en los sismos tiene diferentes probabilidades de que se generen independientemente del tipo de fuente sismogénica, por lo que es un factor para modelar la sismicidad de manera probabilística.

El PSHA se puede describir como un proceso de 4 etapas, según la estructura propuesta por Reiter (1990); ver Kramer, (1996). Los pasos para llevar a cabo el PSHA de forma breve son:

- 1) Caracterización de las fuentes sísmicas: Ubicar las fuentes que tienen influencia en el área de estudio con el propósito de conocer la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico con una magnitud específica a una distancia R entre la fuente y el sitio. Se obtiene una función de densidad de probabilidad $f_R(r)$ (PDF, por sus siglas en inglés), considerando la geometría de la fuente, la distribución de los sismos dentro de las fuentes, la distribución del tamaño y la ocurrencia.



3.12 Tipos de distribuciones por fuente. Fuente: Elaboración propia.

2) Caracterización de la recurrencia de los sismos de una magnitud dada: Se utiliza una relación o distribución temporal de recurrencia de magnitudes, que especifica la tasa promedio de excedencia de la magnitud sísmica particular de un sismo para caracterizar la sismicidad de cada fuente. Para fines prácticos en la ingeniería se acotan los rangos para sismos pequeños que estén por encima de una magnitud m_0 (usualmente entre 4.0 o 5.0) y para sismos que estén por debajo de una magnitud $m_{máx}$. A este modelo se le conoce como modelo truncado Gutenberg-Richter (G-R). Para este caso, se tienen una distribución de probabilidad para el límite inferior expresado en términos de una función de distribución acumulativa (CDF) o función de densidad de probabilidad (PDF). Finalmente, la tasa anual de excedencia y la función de densidad de probabilidad del modelo acotado de Gutenberg-Richter, para magnitudes entre m_0 y $m_{máx}$ son las siguientes, respectivamente:

$$v_m = v \frac{e^{-\beta(m-m_0)} - e^{-\beta(m_{\max}-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_{\max}-m_0)}} \quad 3.20$$

Donde $v = e^{\alpha-\beta m_0}$, $\alpha = \ln_{10} a$ y $\beta = \ln_{10} b$; y

$$f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_0)}}{1 - e^{-\beta(m_{\max}-m_0)}} \quad 3.21$$

3) Uso de relaciones predictivas del movimiento del terreno o intensidad: Para estimar la intensidad del movimiento del suelo en un determinado sitio producto de un evento sísmico a partir de cualquier magnitud posible en cualquier punto posible en la fuente que lo generó, considerando la distancia fuente-sitio, debe determinarse con el uso de relaciones predictivas para finalmente establecer la probabilidad de que se exceda un parámetro.

4) Integración de las incertidumbres: Todas las incertidumbres asociadas a la localización, la magnitud y la atenuación se combinan para obtener la probabilidad de que cierto parámetro sea excedido durante un período de tiempo (Kramer, 1996). Finalmente, las curvas de peligro sísmico se obtienen de la combinación del peligro agregado de cada fuente hacia un sitio en particular, descrita como la probabilidad de exceder cierto valor, y^* , de cierto parámetro de movimiento del suelo, Y . Recurriendo al teorema de probabilidad total, el proceso se repite para todas las magnitudes y localizaciones posibles.

De manera concisa, el cálculo de PSHA consiste en multiplicar las relaciones predictivas $P[Y > y^* | m, r]$ y las funciones de densidad de probabilidad para magnitud y distancia suponiendo que M y R son independientes; si el sitio se encuentra en una región de N fuentes sísmicas potenciales, cada una de las cuales tiene una tasa promedio de superación de la magnitud del umbral, la tasa de excedencia promedio total para la región es descrita:

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^{N_s} v_i \iint P[Y > y^* | m, r] f_{M_i}(m) f_{R_i}(r) dm dr \quad 3.22$$

La curva de peligro sísmico muestra la frecuencia con la que se supera un parámetro de intensidad sísmica específico. A partir de estas curvas de peligro es posible generar espectros de peligro uniforme cuyas ordenadas estén asociadas a un periodo de retorno específico.

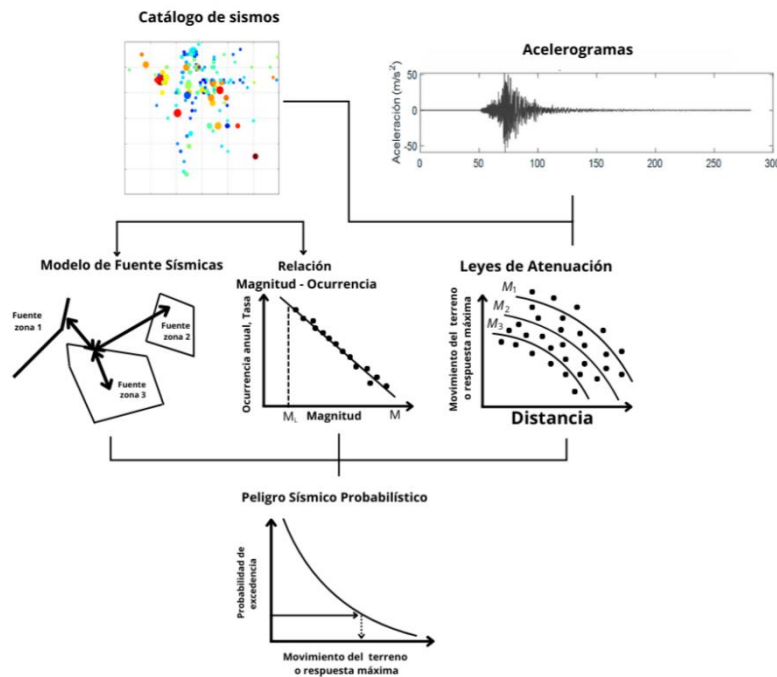


Figura 3.13 Ilustración del método de cálculo de peligro sísmico. Fuente: Modificado de García Soto et al. (2012).

En el ámbito de la evaluación del peligro sísmico y el diseño estructural, existen herramientas que pueden facilitar la obtención del Espectro de Peligro Uniforme (EPU), que se calcula a partir de la ubicación de un sitio específico. Un ejemplo relevante para la Ciudad de México es el Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID). La Tabla 3.5 muestra algunos de los programas para el cálculo del PSHA más populares.

Programa	Descripción	Método de cálculo	Referencias
Hazus - MH	Herramienta desarrollada por FEMA que utiliza sistemas de Información Geográfica (SIG) para estimar las pérdidas potenciales derivadas de diversos desastres naturales. (sismos, inundaciones y huracanes)	El usuario puede decidir el enfoque: determinista basado en un epicentro histórico, una fuente específica o un evento aleatorio definido por el usuario y probabilista basado en periodo de retorno predefinido.	FEMA (2004). Using HAZUS-MH for Risk Assessment: How-To Guide. HAZUS-MH Risk Assessment and User Group Series. FEMA 433.
OpenSHA	Herramientas diseñadas para cuantificar la probabilidad y la intensidad del movimiento del suelo debido a una ubicación o región específica. Además, permite integrar múltiples modelos.	Calcula la probabilidad de excedencia de los niveles de intensidad del movimiento del terreno en un sitio específico durante un periodo de tiempo definido.	University of Southern California (2025) Tutorials / Open SHA. Open-Source Seismic Hazard Analysis. Recuperado de https://opensha.org/Tutorials
OpenQuake	Código abierto que implementa el PSHA para evaluar el peligro regional. Permite gestionar incertidumbres aleatorias y	Procesa archivos con modelos de fuente y	GEM Fundación. Análisis Clásico PSHA OpenQuake training https://www.training.openquake.org/

	epistémicas integrando diversos modelos.	GMPE mediante el uso de árboles lógicos.	
R-CRISIS	Es una herramienta con una interfaz gráfica facilitando la interacción de las componentes necesarias para el cálculo del PSHA.	Integra el modelado geométrico de fuentes, modelos de sismicidad, modelos GMPE, efectos de sitio y topografía, y la gestión de incertidumbres. Además de herramientas de posprocesamiento.	Ordaz M. y Salgado-Gálvez M.A. (2017). R-CRISIS Validación y Verificación Documento. Reporte. Técnico Ciudad de México, México https://www.r-crisis.com/Content/files/R-CRISIS%20Documentation All chapters.pdf

Tabla 3.5 Algunos de los programas para el cálculo de PSHA.

De especial interés en este trabajo es la plataforma SASID disponible en línea desarrollada para la aplicación de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTCDS-2023) de la Ciudad de México, su objetivo principal es proporcionar espectros de diseño sísmico, los cuales son una envolvente del EPU, sin embargo, también proporciona otros parámetros sísmicos de interés. Para la obtención del EPU, el SASID realiza el PSHA, considerando las fuentes sísmicas relevantes para la región. Este cálculo se basa en modelos de predicción del movimiento del suelo (ecuaciones de atenuación) que estiman la intensidad sísmica en función de diversos parámetros. Sin embargo, es importante señalar que la documentación pública de la herramienta no especifica el modelo o los modelos exactos empleados en sus cálculos. El EPU generado por el SASID presenta la intensidad del movimiento del suelo con una probabilidad de excedencia uniforme asociada al objetivo de diseño basada en desempeño. Los objetivos de diseño aseguran que la estructura, ante una intensidad sísmica (caracterizada por un periodo de retorno) cumpla con un nivel de desempeño específico según el tipo de estructura; de este modo, el sistema permite caracterizar el peligro para distintos escenarios: sismo frecuente (periodo de retorno de 20 años) para edificaciones temporales, sismo base de diseño (250 años), para estructuras permanentes convencionales del grupo B, y sismo infrecuente (475 años) para estructuras de alta importancia del grupo A.

3.2.5.1 Espectro de Peligro Uniforme (EPU)

El Espectro de Peligro Uniforme (EPU) es una herramienta fundamental en la ingeniería sísmica. Representa, para cada periodo de vibración, la intensidad del movimiento del suelo que tiene la misma probabilidad de ser excedida en un periodo de tiempo determinado. En otras palabras, muestra la aceleración sísmica esperada con una probabilidad constante de ser sobrepasada, a lo largo de los diferentes periodos de vibración de las estructuras. El término “uniforme” se refiere a esta consistencia en la probabilidad de excedencia en todos los periodos estructurales para un periodo de exposición determinado.

El EPU se deriva directamente de los resultados del PSHA, específicamente de la tasa media anual de excedencia a diferentes niveles de intensidad del movimiento del suelo. El procedimiento para construir un EPU implica los siguientes pasos:

1. Evaluación de la tasa media anual de excedencia para diferentes periodos: Se evalúa la tasa media anual de excedencia (λ) para un rango de periodos de interés (T_e). Esto resulta en un conjunto de curvas de peligro sísmico, donde cada curva corresponde a un periodo estructural diferente y muestra la tasa de excedencia para distintos niveles de intensidad (por ejemplo, aceleración espectral S_a (T_e)).

2. Selección de una Tasa de Excedencia Uniforme: Se selecciona una tasa de excedencia específica (λy^*) o, equivalentemente, un período de retorno (que es el inverso de la tasa de excedencia). Esta tasa representa el nivel de peligro sísmico deseado para el diseño. En las normas mexicanas, un período de retorno de 250 años (que corresponde a una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años) es común para estructuras sismorresistentes.
3. Extracción de Ordenadas Espectrales: Para cada curva de peligro sísmico (correspondiente a un período específico), se identifica el nivel de intensidad (ordenada espectral) asociado con la tasa de excedencia seleccionada (λy^*).
4. Construcción del Espectro: Finalmente, los valores de intensidad resultantes se grafican en función de sus períodos de vibración correspondientes. Este gráfico forma el Espectro de Peligro Uniforme.

Las curvas de peligro se generan típicamente para períodos estructurales específicos, representando la tasa media anual de excedencia correspondiente a un cierto nivel de intensidad para ese período dado. La curva de peligro esencialmente indica la probabilidad de que una intensidad específica sea igualada o excedida dentro de un período de tiempo determinado.

Esta curva es el resultado fundamental y más completo del PSHA antes de derivar el EPU y proporciona una imagen completa del peligro en un sitio, mostrando la probabilidad de exceder *cualquier* nivel de intensidad dado. Esta integración de datos, que conjunta las probabilidades individuales en una curva continua, se ilustra en la Figura 3.13

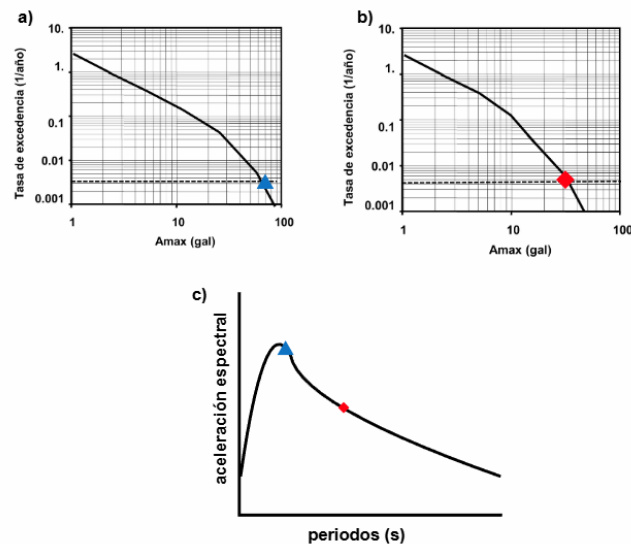


Figura 3.13 Combinación de curvas de peligro de períodos individuales para generar un espectro de peligro uniforme con una tasa de excedencia de 10/años. (a) Curva de peligro para SA (0,3 s), señalado con una estrella azul. (b) Curva de peligro para SA (1 s), destacado como un rombo rojo. (c) Espectro de peligro uniforme, basado en una serie de cálculos como los de (a) y (b). En conclusión, mientras el PSHA nos proporciona la probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos en la fuente, el EPU sintetiza esta información en un parámetro de diseño estructural. De este modo, el riesgo se mantiene constante para todos los periodos vibración.

4 METODOLOGÍA Y RESULTADOS

Con el objetivo de evaluar y comparar los Espectros de Peligro Uniforme propuestos en este trabajo con los obtenidos por el sistema SASID del Reglamento de Construcción del Distrito Federal, se desarrollaron GMPEs específicas (no ergódicas) para las estaciones CU y CCUT (en Pozo y Campo Libre). Estas GMPEs consideran el tipo de fuente sísmica, diferenciando entre sismos de subducción e Intraplaca, siguiendo los criterios de la zonificación de la CFE.

Para la calibración, se utilizaron datos de aceleración de la Red del Instituto de Ingeniería, los cuales fueron clasificados de acuerdo con la ubicación del epicentro e indicando el tipo de fuente y se homologó la magnitud reportada a la magnitud de momento (M_w). Posteriormente, se calcularon los valores de PGA y SA en el rango de 0.01 a 5 segundos.

Se calibró inicialmente la GMPE mediante el modelo de inversión de dos pasos, utilizando el método de mínimos cuadrados para estimar los coeficientes de atenuación. Sin embargo, se determinó que esta metodología no era adecuada para el caso de una sola estación. El objetivo principal de los modelos de Dos pasos y Efectos Mixtos es separar la dependencia de los errores entre múltiples estaciones para un mismo evento. En el caso de una sola estación, la matriz del sistema resultaba ser cercana a la singularidad, pues la variable libre (captura la variabilidad inter-evento) se volvía linealmente dependiente de las variables de atenuación al solo contar con un registro único por evento en una única estación. Esta dependencia generó una alta inestabilidad impidiendo identificar si una baja PGA se debía a un alto coeficiente de atenuación o a una magnitud pequeña, lo cual produjo coeficientes sesgados.

Por esta razón, se optó por usar la regresión en un solo paso (MCO). Si bien, esta metodología ha sido la base histórica de la calibración de GMPEs en modelos con múltiples sitios, se considera obsoleta por ignorar la variabilidad inter-evento e intra-evento (tratando toda la dispersión como un único error aleatorio), su uso se justificó para una sola estación con múltiples eventos, siendo el enfoque más viable y transparente para obtener los coeficientes. Los coeficientes estimados se consideran sitio-específicos (no-ergódicos), lo cual proporcionó una base empírica para la evaluación del peligro sísmico local.

Finalmente, los coeficientes estimados se utilizaron para generar los archivos de entrada del programa R-CRISIS, con los cuales se obtuvieron los Espectros de Peligro Uniforme para los sitios CU y CCUT.

El proceso descrito se sintetiza en el siguiente diagrama de flujo:

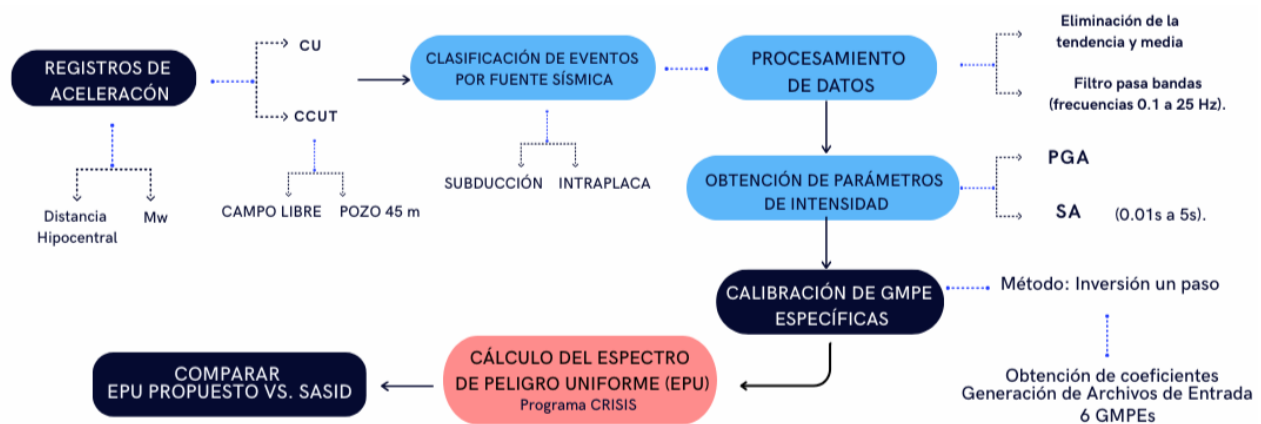


Figura 4 Diagrama de flujo.

4.1 OBTENCIÓN DE LOS DATOS Y ANÁLISIS DE REGISTROS DE ACELERACIÓN

4.1.1 Tipos de datos utilizados

Se utilizaron registros de aceleración de la Red del Instituto de Ingeniería correspondientes a dos estaciones ubicadas en la Ciudad de México: Ciudad Universitaria (CU) y en el Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT).

En CU se contó con datos registrados desde 1964 hasta febrero de 2024, con un total de 329 archivos. En el CCUT, se obtuvieron 384 registros correspondientes al Pozo (con una profundidad de 45 m), y 471 registros del Campo Libre, abarcando el periodo de 2009 a 2024.

De cada archivo correspondiente a cada evento sísmico, se extrajeron directamente los siguientes datos: fecha y hora de epicentro, magnitud, profundidad focal, latitud y longitud del epicentro, así como las coordenadas de la estación en la que se registró el sismo.

Con el objetivo de obtener posteriormente una ley de atenuación específica para cada tipo de fuente sísmica (subducción e intraplaca), se procedió a clasificar los eventos sísmicos. Para ello, se utilizó un *shapefile* de la zonificación sísmica de la CFE, y se emplearon las coordenadas de los epicentros para asignar cada evento a una de las dos categorías, como se ilustra en la Figura 4.1 para la estación CU y la Figura 4.2 para CCUT.

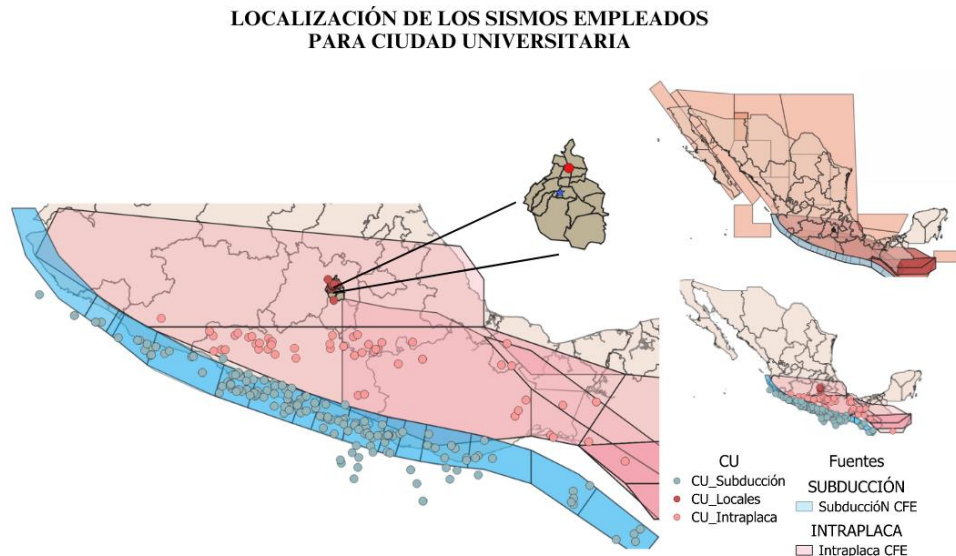


Figura 4.1 Mapa de localización de los sismos utilizados para Ciudad Universitaria y zonificación de fuentes sísmicas. El mapa principal muestra la distribución geográfica de los epicentros de los eventos sísmicos utilizados en la calibración de las GMPEs. Zonificación Sísmica (Polígonos): se delimitan las dos principales regiones de fuente sísmica siguiendo los criterios de la CFE: Los polígonos azules indican la zona de subducción mientras que los polígonos rojos delimitan la zona de los sismos de intraplaca. Epicentros (círculos): Los círculos representan los epicentros de los eventos utilizados clasificados por tipo de fuente, los círculos en rojo corresponden a los sismos locales, en azul los de subducción y rojo medio corresponden a los intraplaca. Mapas de contexto (superiores e inferiores): La figura superior derecha muestra la ubicación la zonificación sísmica del país mientras que la figura siguiente muestra el área de estudio dentro del territorio mexicano. Localización estación: CU está representado con una estrella azul dentro de los límites de las alcaldías de la CDMX.

LOCALIZACIÓN DE LOS SISMOS EMPLEADOS PARA EL CENTRO CULTURAL UNIVERSITARIO EN POZO

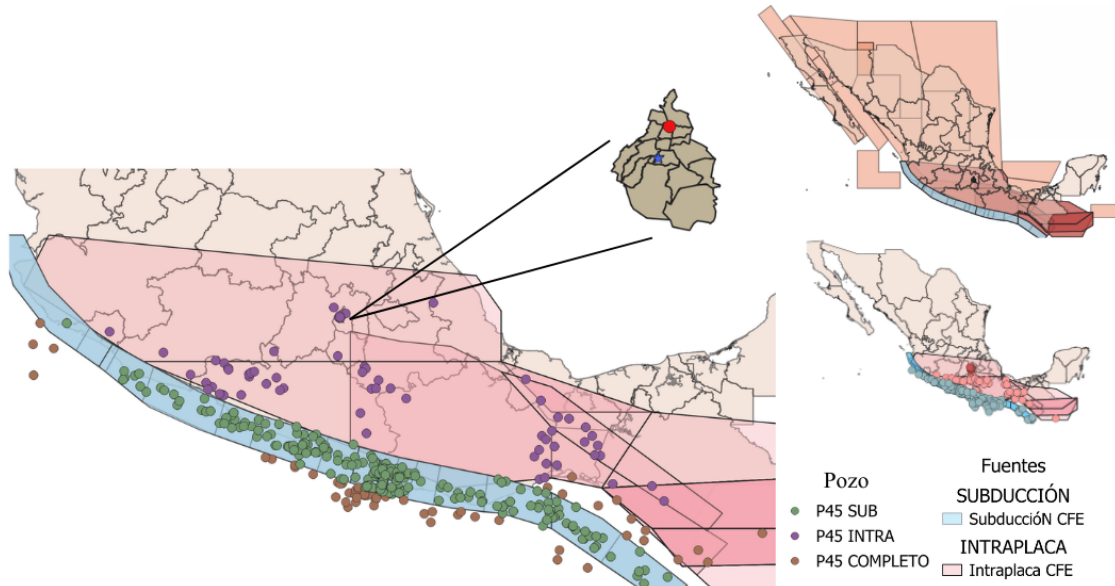


Figura 4.2 Mapa correspondiente a la clasificación por tipo de fuente para CCUT- Pozo a 45m de profundidad y zonificación de fuentes sísmicas. El mapa principal muestra la distribución geográfica de los epicentros de los eventos sísmicos utilizados en la calibración de las GMPEs. Zonificación Sísmica (Polígonos): se delimitaron las dos principales regiones de fuente sísmica para este estudio siguiendo los criterios de la CFE: Los polígonos azules indican la zona de subducción mientras que los polígonos rojos delimitan la zona de los sismos de intraplaca. Epicentros (círculos): Los círculos representan los epicentros de los eventos utilizados clasificados por tipo de fuente, los círculos en verde representan a los de subducción, en morado corresponden a los intraplaca y en café los que pertenecen a las fuentes delimitadas. Mapas de contexto (superiores e inferiores): La figura superior derecha muestra la ubicación la zonificación sísmica del país mientras que la figura siguiente muestra el área de estudio dentro del territorio mexicano. Localización estación: CCUT está representado con un círculo rojo dentro de los límites de las alcaldías de la CDMX.

La siguiente tabla presenta un resumen de los sismos y registros seleccionados en el trabajo.

Sitio	Años	Fuente	Registros	Profundidad Focal Km	Magnitudes
CU	1964 -2024	Sub	103	1 – 52	3.6 - 8.2
		Intra	169	1 – 216	1 – 8.0
CCUT Pozo	2009- 2024	Sub	287	1 – 97	3.0 - 8.2
		Intra	54	16 – 113	4.8 – 6.0
CCUT-CL	2009- 2024	Sub	317	1 - 97	2.9 - 8.2
		Intra	79	5 - 198	2.5 - 7.2

Tabla 4.1 Datos generales correspondientes a las estaciones de estudio. Fuente: elaboración propia.

4.1.2 Homologación de magnitudes

El rango de las magnitudes registradas en los archivos para los tres sitios (CU, CCUT Pozo y CCUT Campo Libre) abarcó desde 2.5 hasta 8.2. Dado que los registros correspondientes a CCUT no se especificaba el tipo de magnitud (solo venía un único valor), o en el caso de CU se tenía más de un tipo de magnitud (Ms, Mb, Mc), fue necesario homogenizar toda la base de datos a la Magnitud de Momento (Mw).

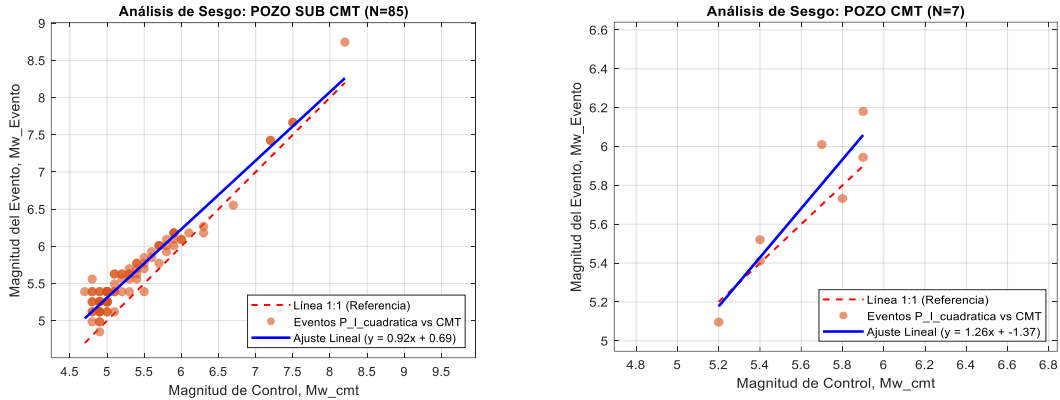
Para convertir las diferentes magnitudes registradas a M_w se hicieron correcciones adicionales adhoc. Sin embargo, se evaluaron las ecuaciones propuestas por Sawires *et al.* (2019). Estas ecuaciones (4.1.4, 4.1.5, 4.1.6 en Sawires et al, 2019) fueron obtenidas empíricamente mediante la determinación de coeficientes lineales y cuadráticos empleado regresiones estadísticas, utilizando una base de datos de sismos en México del International Seismological Centre, (ISC)y del United States Geological Suervery (USGS). De acuerdo con los autores, estas ecuaciones proporcionan un valor de M_w comparable con los valores medidos directamente. Sin embargo, se realizó un análisis de sesgo comparando los resultados del modelo propuesto por Sawires et al. (2019) y la magnitud de referencia del Global CMT (M_{CMT}), en el cual se identificaron errores sistemáticos (Figura 4.3).

$$M_W = (5.58 \pm 0.29) - (0.68 \pm 0.10)M_S + (0.13 \pm 0.01)M_S^2 \quad 4.1$$

$$M_W = (-1.36 \pm 0.13) + (1.35 \pm 0.15)M_b \quad 4.2$$

$$M_W = (-0.31 \pm 0.26) + (1.06 \pm 0.21)M_c \quad 4.3$$

En la Figura 4.3 la línea roja discontinua representa el caso donde ambas magnitudes son iguales ($M_{cmt} = M_{Sawires}$), si el punto naranja está por encima, sobreestimando la M_w que se obtuvo con las relaciones de Sawires et al. (2019). La línea azul es el ajuste a los eventos en naranja.



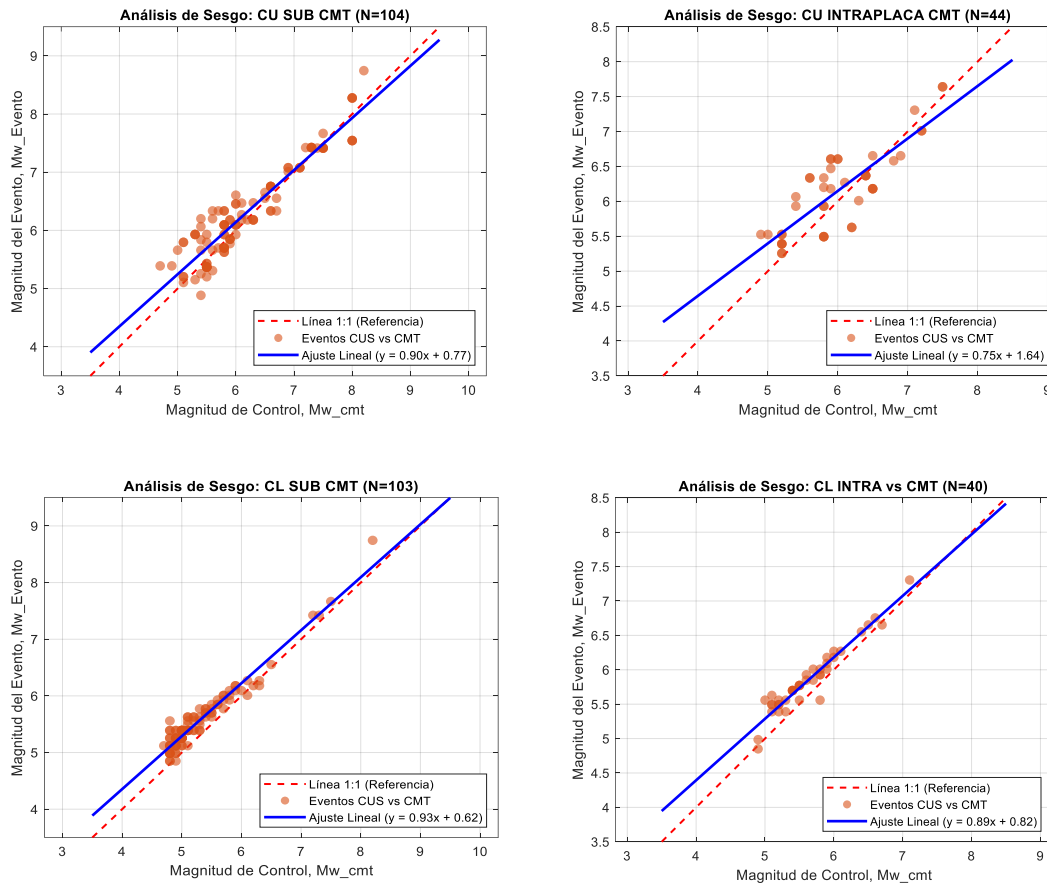


Figura 4.3 Análisis de sesgo. Se obtienen los ajustes lineales. De manera general, las relaciones obtenidas por Sawires (2019) tendieron a sobreestimar la magnitud de control (Global CMT) en el rango de magnitudes bajas y moderadas, lo cual se observó en que la línea de ajuste azul se encuentra por encima de la línea 1:1 (roja discontinua) en casi todos los casos.

Los sismos de Subducción (CL Y CU): muestran pendientes más cercanas a 1 (0.93 y 0.90, respectivamente), lo que indica un menor sesgo general en la tendencia. CL-Subducción es la que cuenta con el mejor ajuste.

Por otro lado, los sismos Intraplaca (CL y CU) muestran pendientes más bajas, específicamente la de CU-Intraplaca con un valor de $m=0.75$, lo que significa que el sesgo es más significativo y que la Mw del evento está alejada de la Mw CMT a medida que la magnitud aumenta, resultando en una mayor desviación estándar.

La pendiente para los datos Pozo-Subducción (0.92) es menor a uno, lo que indica que crece de manera más lenta que la magnitud de control indicando una sobrestimación en magnitudes bajas y sobrestimación en magnitudes altas. Esta tendencia no es tan abrupta como la pendiente correspondiente a los datos de Pozo Intraplaca (1.28), que es mayor a uno. Para Pozo-Intra, la Mw evento subestima en el rango de 5.2 a 5.9 Mw. Sin embargo, el ajuste lineal indica que está sobrestimando los sismos más grandes dentro del rango, siendo un sesgo que aumenta significativamente con la magnitud debido a la marcada inclinación de la pendiente.

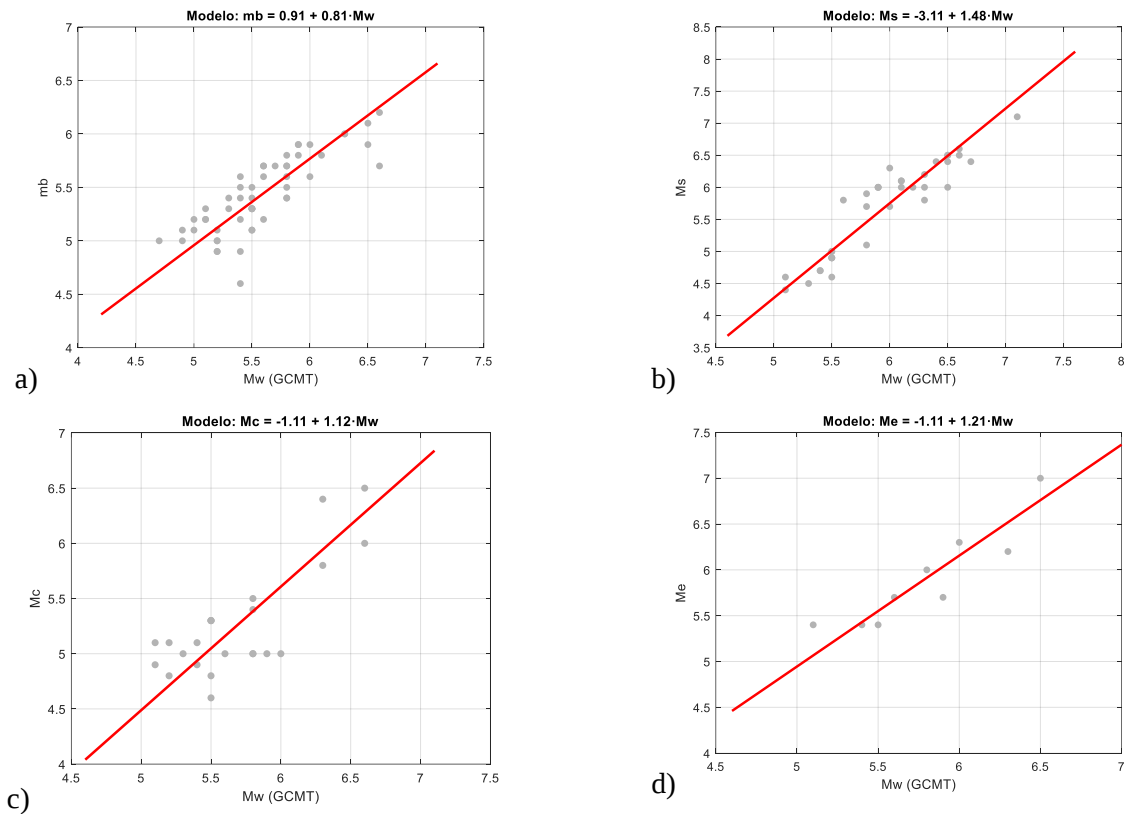
El análisis de sesgo demostró que las relaciones de conversión M a Mw propuestas por Sawires et. al (2019) introducen errores sistemáticos que varían según el sitio y el tipo de fuente sísmica, como se ve reflejado en las pendientes de regresión alejadas de la unidad. Por lo que se optó por utilizar las magnitudes obtenidas directamente del ajuste lineal con el catálogo del Global CMT.

Ante estas diferencias, se optó por desarrollar funciones de calibración propias. Las ecuaciones obtenidas no constituyen por si mismas la homologación del catálogo, si no que representan funciones de calibración entre distintas escalas de magnitud y la magnitud de momento. El proceso se llevó acabo en tres etapas:

- Calibración mediante regresión ortogonal: Se analizaron las relaciones entre cada tipo de magnitud disponible y la magnitud de referencia. Para minimizar el error en ambas variables y evitar el sesgo de la regresión lineal ordinaria, se empleó una regresión de media geométrica (GMR). Un tipo de regresión ortogonal que permite una relación más constante entre escalas. La calibración de los modelos se realizó únicamente con el subconjunto de eventos que contaban con reportes simultáneos con la magnitud a homogenizar y la magnitud de referencia, asegurando una correlación directa ente ambas escalas. Los modelos resultantes y sus respectivos ajustes se presentan en la Figura 4.4 y la Tabla 4.2, donde se observan la relación entre las escalas originales y la magnitud de referencia. Las funciones obtenidas tienen la forma:

$$M_x = a + bMw_{CMT} \quad 4.4$$

Donde M_x representa cada uno de los tipos de magnitud reportados (mb, Ms, Mc, Me y M). y Mw_{CMT} correspondiente a la Mw reportada por el catálogo Global CMT, empleada como magnitud de referencia.



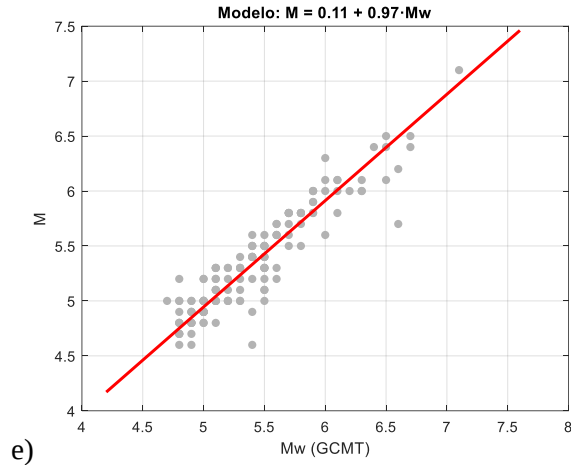


Figura 4.4 Modelos de calibración de magnitud mediante la regresión de media geométrica (GMR). Relaciones de regresión de media geométrica (GMR) entre las diferencias escalas reportadas para a) mb, b) Ms, c) Mc, d) Me y e) M. y la magnitud de referencia Mw del Global CMT. La línea roja representa el ajuste lineal ortogonal utilizado para obtener los coeficientes de conversión. Se observa una mejor dispersión en las escalas con menor número de eventos, mientras que la magnitud M al no estar definida presenta un ajuste más robusto.

Los coeficientes resultantes se presentan en la Tabla 4.2.

Magnitud	a	b	#Eventos
mb	0.910786009	0.809619526	53
Ms	-3.110722632	1.477122974	36
Mc	-1.110736079	1.119716372	23
Me	-1.109112622	1.210787209	9
M	0.105478993	0.967831547	146

Tabla 4.2 Coeficientes resultantes de la calibración GMR.

- Estimación de Mw Homologada: Una vez obtenidos los coeficientes, las ecuaciones fueron despejadas para estimar valores individuales de Mw, de acuerdo a la expresión:

$$M_w = \frac{M_x - a}{b} \quad 4.4$$

Las ecuaciones de conversión se aplicaron de forma sistemática para estimar los valores de Mw en aquellos eventos donde la determinación original no era existente. La validez de estas estimaciones fue evaluada mediante su comparación directa con la Mw de referencia, utilizando diagramas de dispersión y la línea 1:1 presentados en la Figura 4.5. El ajuste de los datos sobre la diagonal identidad en todos los casos confirma que el ajuste es ideal.

En algunos casos, la aplicación de las ecuaciones de calibración fuera del rango de magnitudes utilizadas para el ajuste resultó en valores no adecuados. Dichos valores se interpretaron como efectos de extrapolación del modelo y no fueron considerados en el análisis de validación.

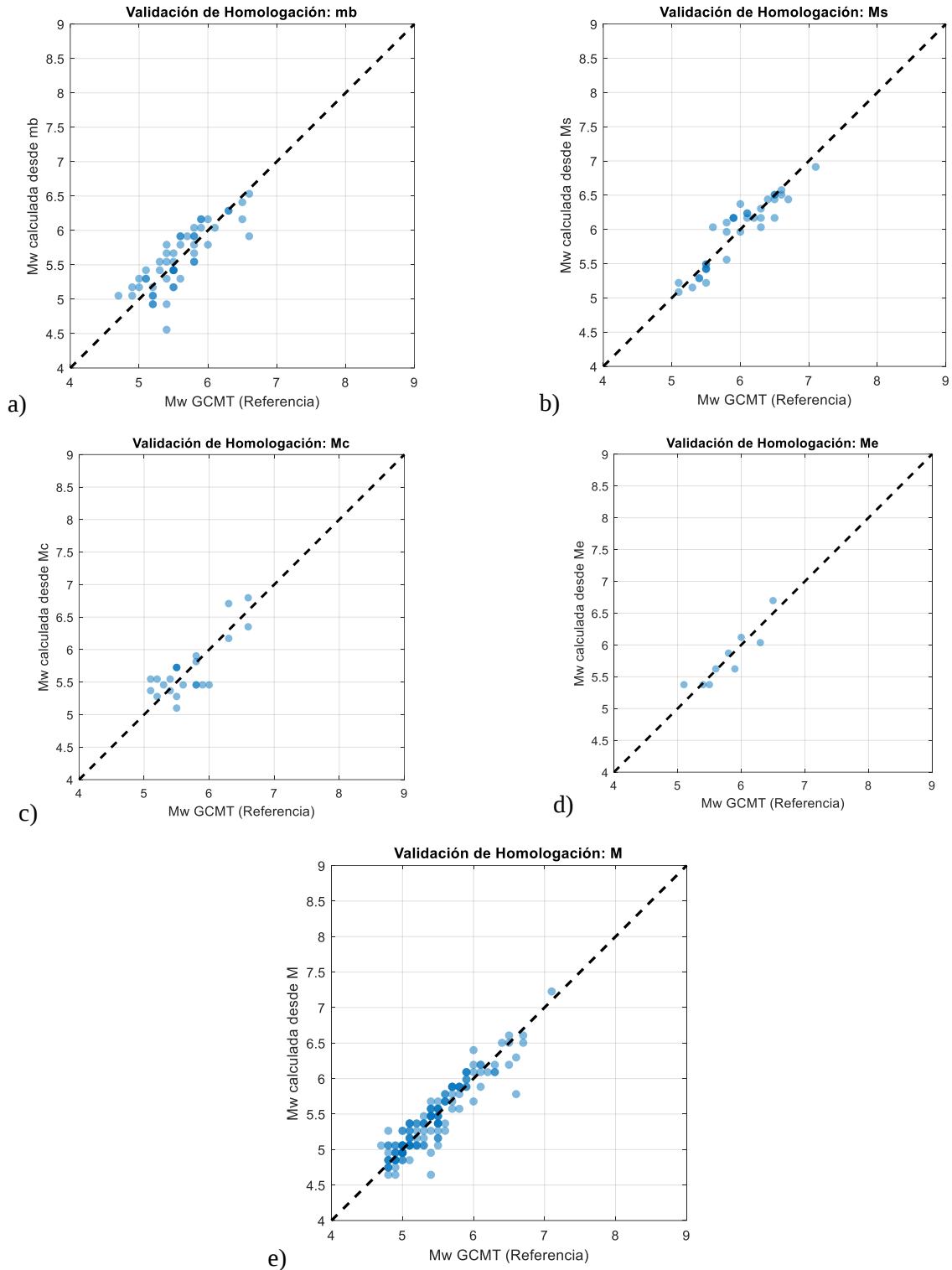


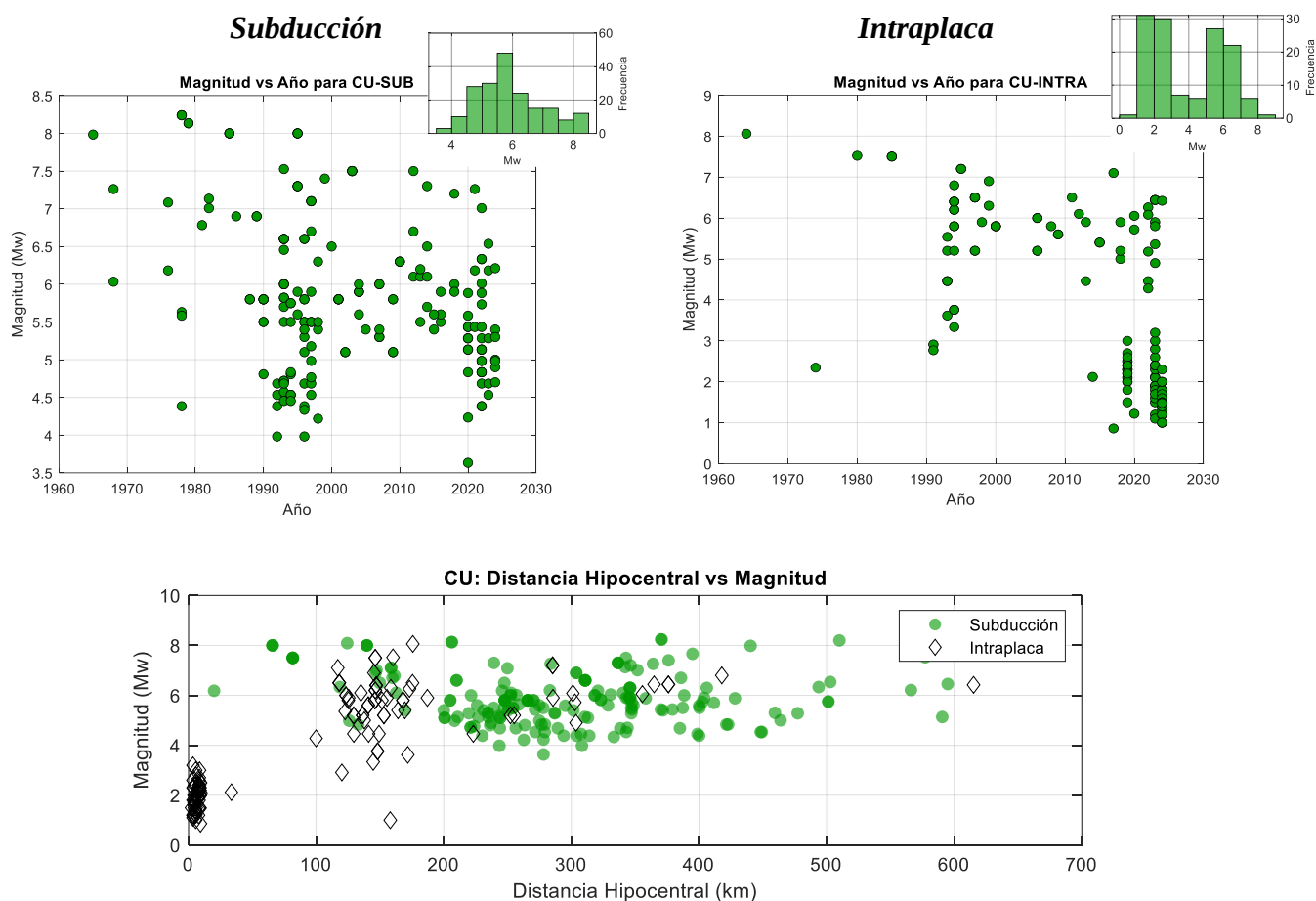
Figura 4.5 Validación de la homologación a M_w . Comparación entre la M_w calculada para a) mb, b) Ms, c) Mc, d) Me y e) M mediante las funciones de calibración y la M_w de referencia (GMT). La línea puntada representa la relación ideal 1:1. El ajuste de los datos a la identidad confirma que los ajustes son adecuados.

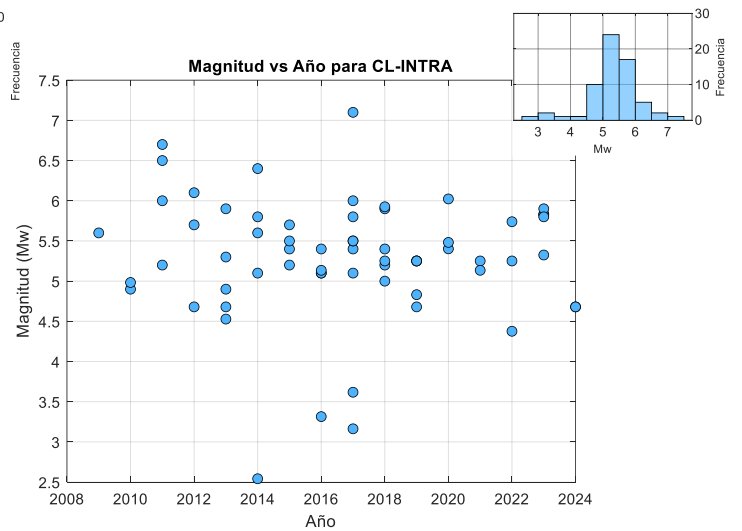
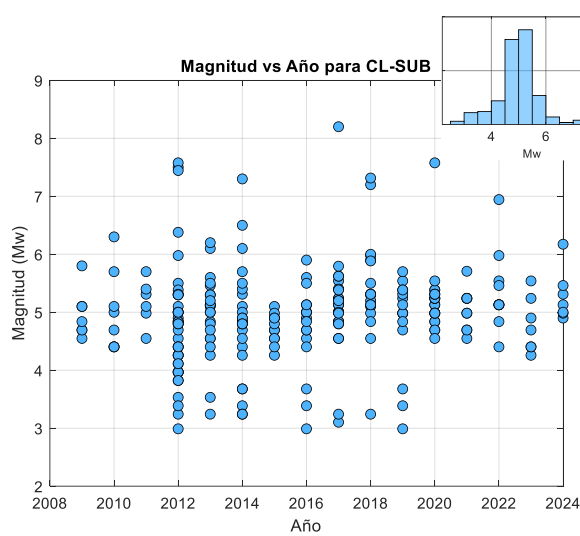
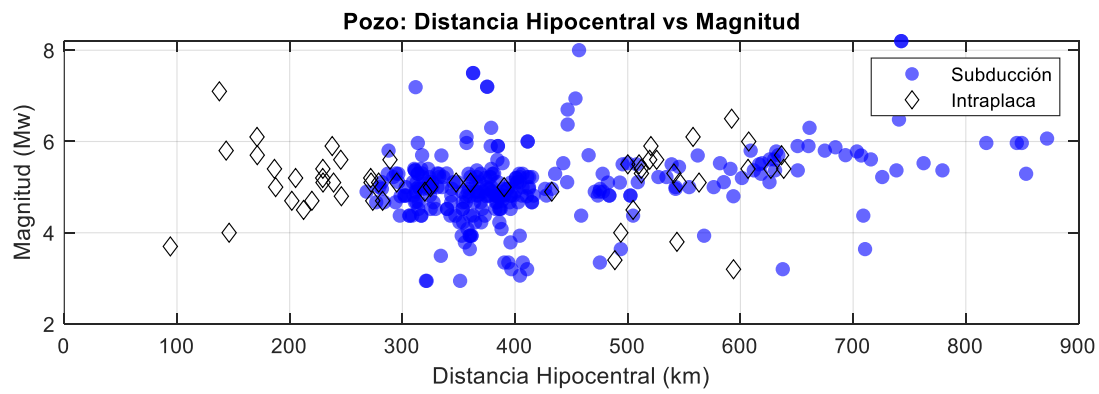
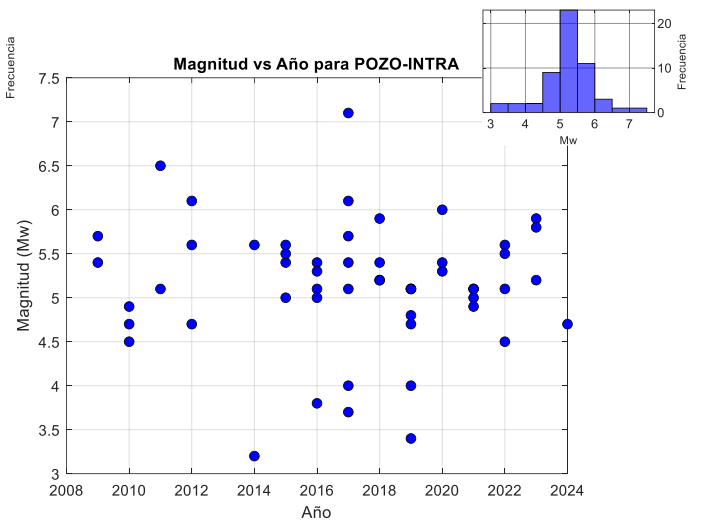
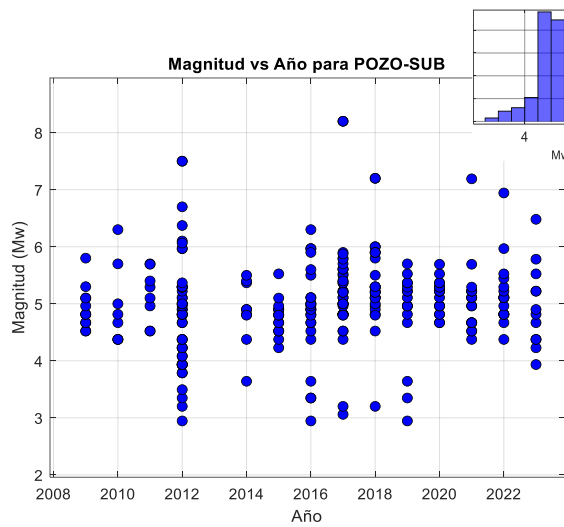
Finalmente se construyó un catálogo sísmico homogéneo mediante la selección jerárquica de la magnitud M_w más confiable disponible por evento. Se priorizo la magnitud reportada por el Global CMT y, en la

ausencia de esta, se emplearon las magnitudes Mw obtenidas a partir de diferentes escalas (M, mb, Ms, Mc y Me). La Tabla 4.3 muestra el resumen de las magnitudes usadas para el catálogo final mientras que la Figura 4.6 muestra la distribución final de las Mw por sitio y fuente utilizadas.

Fuente	Cantidad Eventos
GCMT	159
M	243
Ms	15
mb	104

Tabla 4.3 Resumen del tipo de Magnitud registrada y la cantidad de eventos.





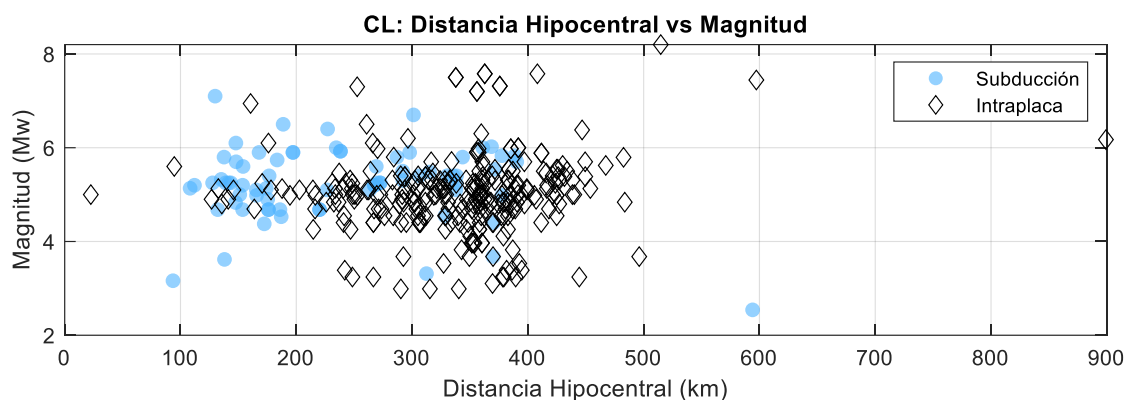


Figura 4.6 Relación entre el tiempo de registro vs Mw de los sismos utilizados correspondientes a cada sitio y tipo de fuente. CU tiene 40 años de registro mientras que CCUT 15 años. **CU:** Las gráficas en **color verde** pertenecen a CU, abarcan un periodo de 40 años de registro, en ambas gráficas a partir de 1880 a 1990 no cuenta con sismos de bajas magnitudes. **Grafica izquierda:** Sismos de Subducción: se observa un aumento en la tasa de sismos registrados superior a Mw 6 a partir de 1990, sugiriendo una mejor cobertura en los registros del país para eventos de magnitud media a alta. El histograma superior a esta grafica muestra una mayor concentración en un rango de 5 a 8 Mw. **Grafica derecha:** sismos Intraplaca, los eventos de magnitud media a alta (Mw 4 a Mw 8) se registran con una mayor presencia a partir 1990, existe un acumulamiento significativo con magnitudes bajas (Mw 1 a Mw3) considerada a partir del año 2016, lo que sugiere una mejora en la capacidad de detección y registro de sismos para magnitudes pequeñas. El histograma superior derecho muestra una distribución bimodal de las magnitudes, reflejando la presencia de eventos importantes mayores a una Mw 4 y la alta frecuencia de sismos de baja magnitud Mw < 3. **Graficas Centrales:** muestran la distribución de la distancia con la magnitud para mostrar que tan buena es la muestra de los datos. Se respetan los colores ya mencionados para los sismos de subducción mientras que para todos los intraplaca se identifican con un rombo.

Graficas centrales e inferiores CCUT: las cuatro graficas presentadas en azul pertenecen a la base de datos empleada para el sitio CCUT, dividida por el tipo de fuente sísmica (subducción e intraplaca) y por la ubicación del sensor. Los registros corresponden a dos condiciones de sitio: Pozo a 45m (Azul marino) y Campo Libre (azul claro). Es importante señalar que ambos sensores abarcan el mismo periodo de registro, 15 años (2009 a 2024). Para ambas estaciones para los sismos de subducción se muestra un mayor número de registros de magnitud Mw moderada (4.5 a 6.0). La distribución temporal es muy similar en ambas estaciones, lo cual es esperado dado que fueron instaladas en el mismo año. La ausencia de sismos pequeños entre 2016 y 2017 en ambas estaciones podrían deberse a cambios o fallas en la red. **Pozo-Intraplaca:** muestra un menor número de registros a comparación de los procedente de subducción, predominan las magnitudes entre 4.5 y 6.5, lo cual es consistente con la naturaleza de estos sismos. **Campo Libre:** muestra una distribución muy similar a los registrados en Pozo-subducción, con una concentración en los eventos de Mw 4 y 6.5. **Campo Libre- Intraplaca:** la mayoría de los registros están entre una magnitud Mw 5 a 6.5, aunque tienen una mayor dispersión temporal de los eventos de menor magnitud (Mw < 4). De maneja general no se observa una variación significativa en la tasa de eventos registrados en este periodo. Esto permite inferir que la base de datos presenta una buena completitud para magnitudes Mw>4.0

4.2 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

El procesamiento de los registros de aceleración se realizó mediante un código desarrollado en Matlab. El objetivo de ese proceso fue limpiar, filtrar y preparar las señales sísmicas para posteriormente obtener los parámetros de aceleración.

La secuencia de procesamiento se llevó a cabo de la siguiente forma:

4.2.1.1.1 Almacenamiento e Inicialización

Se almacenan las aceleraciones de las componentes (Norte, Vertical y Este-Oeste) de los sismos registrados en las estaciones correspondientes a Ciudad Universitaria, Campo Libre y Pozo (47 m) y en el Centro Cultural Universitario Tlatelolco.

Componente Horizontal (H): Para el análisis, la componente horizontal se definió como el promedio geométrico de las componentes Norte y Este-Oeste. Esta componente se utilizó para el cálculo de la PGA y SA. Como primer paso para preparar la señal, se realiza la eliminación de la tendencia y la media de cada registro.

4.2.1.1.2 Preparación para el Filtrado

Para realizar el filtrado digital, fue necesario trabajar en el dominio de la frecuencia.

Aplicación de la Ventana de Suavizado (Tapering): Se aplicó una ventana de suavizado a ambos extremos de la señal temporal. Este paso es importante para reducir los efectos indeseados que pueden ocurrir al aplicar la Transformada rápida de Fourier (FFT). El porcentaje de suavizado utilizado fue del 5%.

Transformada al dominio de la Frecuencia: Posteriormente, se realizó la Transformada Rápida de Fourier para convertir la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

4.2.1.1.3 Aplicación del Filtro y Reversión

Una vez en el dominio de la frecuencia, se aplicó el filtro digital.

Filtro Pasa Bandas: Se aplicó un filtro pasa bandas con una frecuencia de corte en el intervalo de 0.1 Hz y una frecuencia de corte máxima de 25 Hz. Estos límites permitieron el rango de frecuencias de mayor interés e importancia para la ingeniería sísmica. El filtro fue configurado con 4 polos y un intervalo de muestreo de 0.01 segundos. Finalmente, la señal se llevó al dominio del tiempo mediante la Transformada inversa de Fourier (IFFT), obteniendo así el registro de aceleración limpio y filtrado.

En las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se muestran los registros correspondientes al 19 de septiembre del 2017 en cada componente (Norte, Vertical y EW) en CU, CCUT: Campo Libre y Pozo. Mientras que en la figura 4.10 se muestra el mismo sismo en las 3 ubicaciones correspondientes a la componente Horizontal.

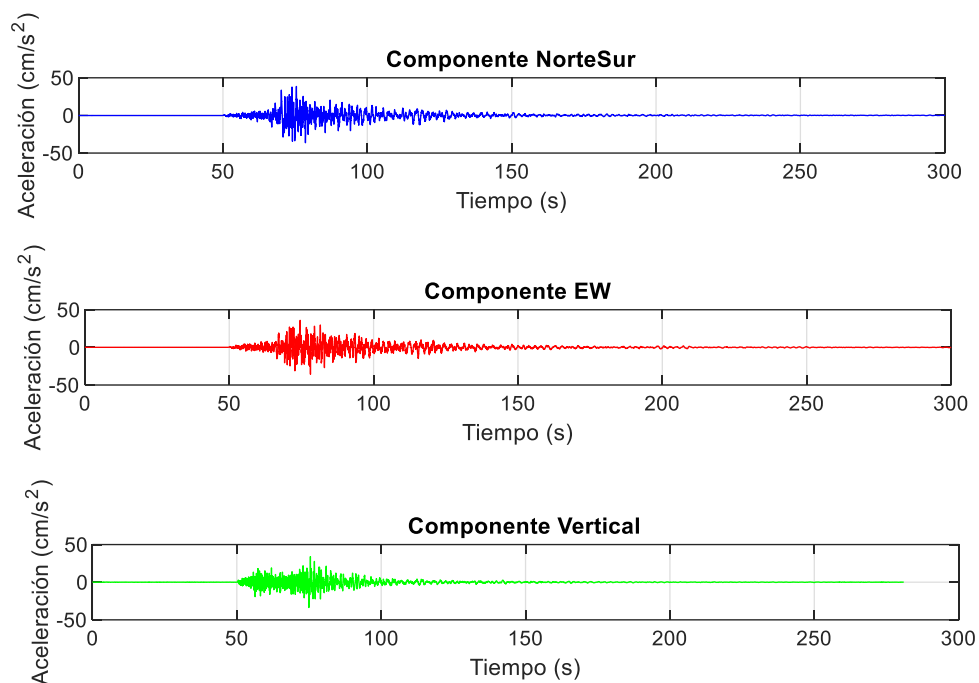


Figura 4.7 Registros de aceleración correspondientes al 19 de septiembre del 2017 registrado en el CCUT-Pozo. Los parámetros para el filtrado son los siguientes: Intervalo de muestreo 0.01 segundos; Frecuencia mínima de corte 0.1 Hz; Frecuencia máxima 25 Hz; 4 polos para el filtro y un porcentaje de 5 en el Tapering.

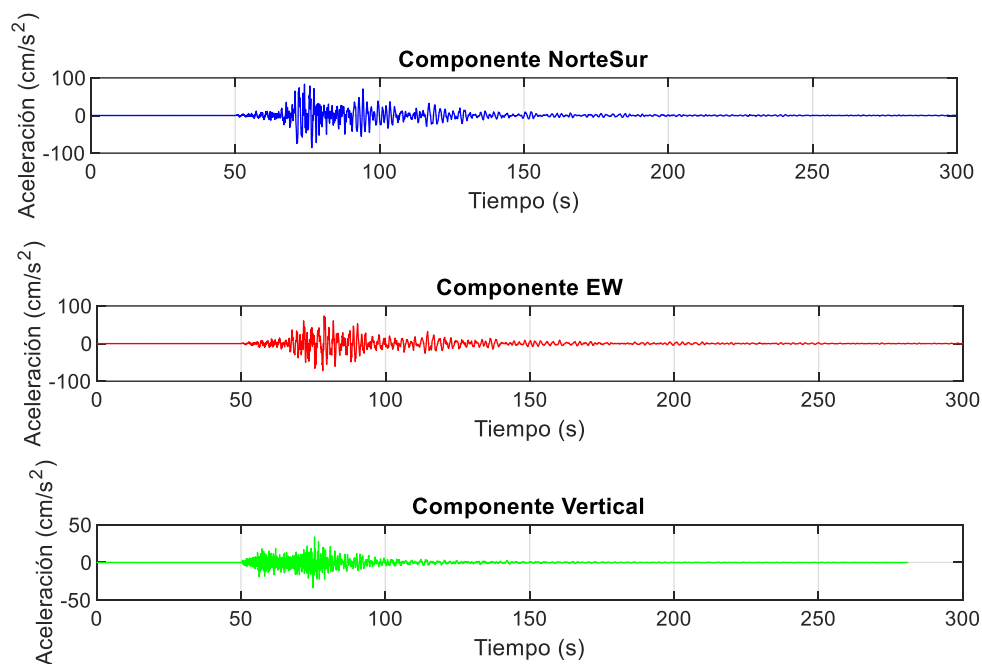


Figura 4.8 Registros de aceleración correspondientes al 19 de septiembre del 2017 CCUT- Campo Libre. Los parámetros para el filtrado son los siguientes: Intervalo de muestreo 0.01 segundos; Frecuencia mínima de corte 0.1 Hz; Frecuencia máxima 25 Hz; 4 polos para el filtro y un porcentaje de 5 en el Tapering.

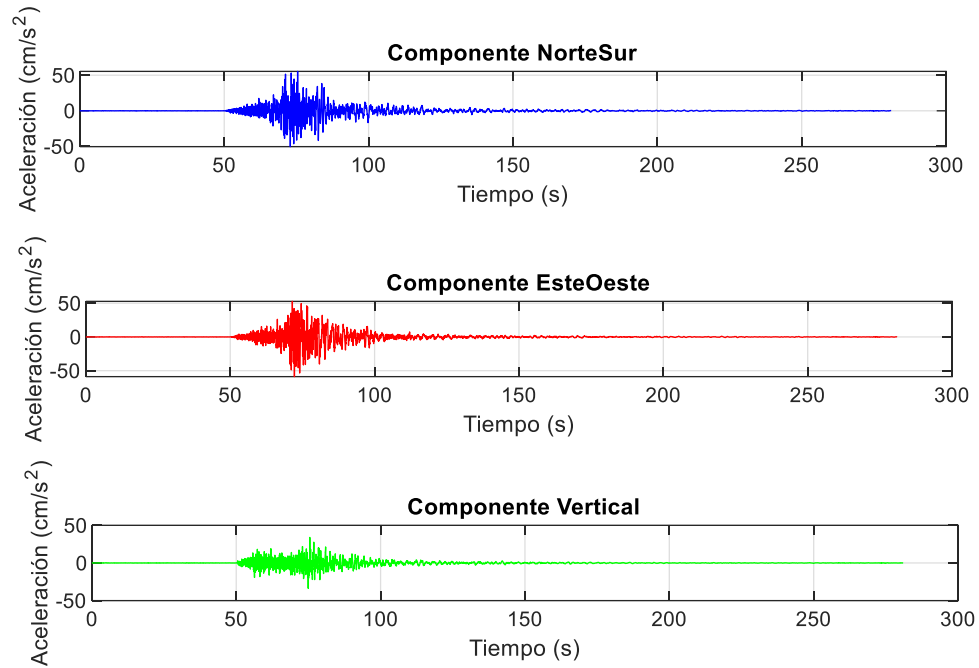


Figura 4.9 Registros de aceleración correspondientes al sismo 19 de septiembre del 2017 registrado en Ciudad Universitaria. Los parámetros para el filtrado son los siguientes: Intervalo de muestreo 0.01 segundos; Frecuencia mínima de corte 0.1 Hz; Frecuencia máxima 25 Hz; 4 polos para el filtro y un porcentaje de 5 en el Tapering.

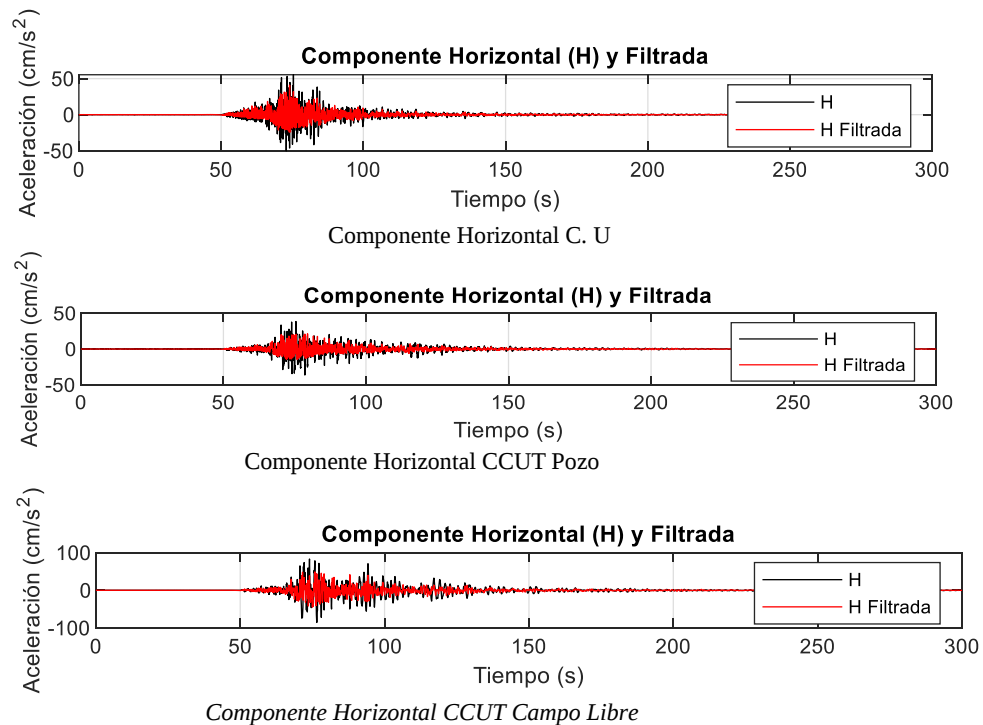


Figura 4.10 Registros de aceleración correspondientes a las Componentes Horizontales (H) de las estaciones usadas con los mismos parámetros que las Figuras 4.9 a 4.11.

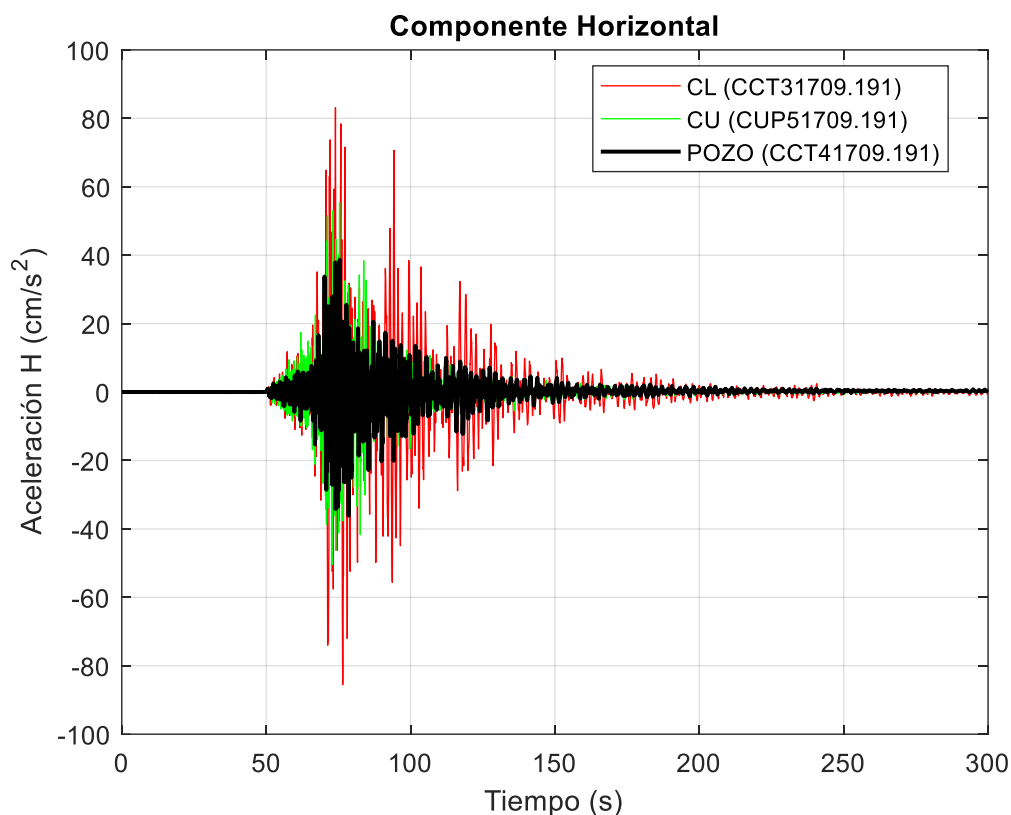


Figura 4.11 Componentes horizontales correspondientes al sismo de 19 de septiembre del 2017 en los tres sitios de interés. En rojo se presenta el registro en Campo Libre, en negro en Pozo y en verde CU. Los parámetros para el filtrado son los siguientes: Intervalo de muestreo 0.01 segundos; Frecuencia mínima de corte 0.1 Hz; Frecuencia máxima 25 Hz; 4 polos para el filtro y un porcentaje de 5 en el Tapering.

4.2.1.2 Obtención de la Aceleración Pico del Terreno (PGA)

Se obtuvo la aceleración máxima (PGA) para cada registro. Para mantener la consistencia con el desarrollo de las GMPE, la PGA se calcula utilizando la media cuadrática (RMS) de las componentes horizontales (véase en la sección 3.2.2).

La distribución de las variables M_w , Distancia Hipocentral y PGA es esencial para comprender la atenuación y los datos con los que contamos para cada sitio. Las Figuras 4.12, 4.13 y 4.14 resumen esta distribución a través de histogramas y la relación de atenuación (Distancia vs Aceleración) para las estaciones CCUT: Campo Libre (CL), Pozo (45 m) y CU, respectivamente, separando la información por fuente sísmica.

Las gráficas superiores muestran la PGA en función de la distancia Hipocentral (H), con los datos clasificados en colores según su intervalo de Magnitud de momento sin solaparse. Esta clasificación ayuda a visualizar la dependencia de la atenuación con la aceleración y establecer los rangos de magnitud que se utilizaron en la calibración de las GMPE.

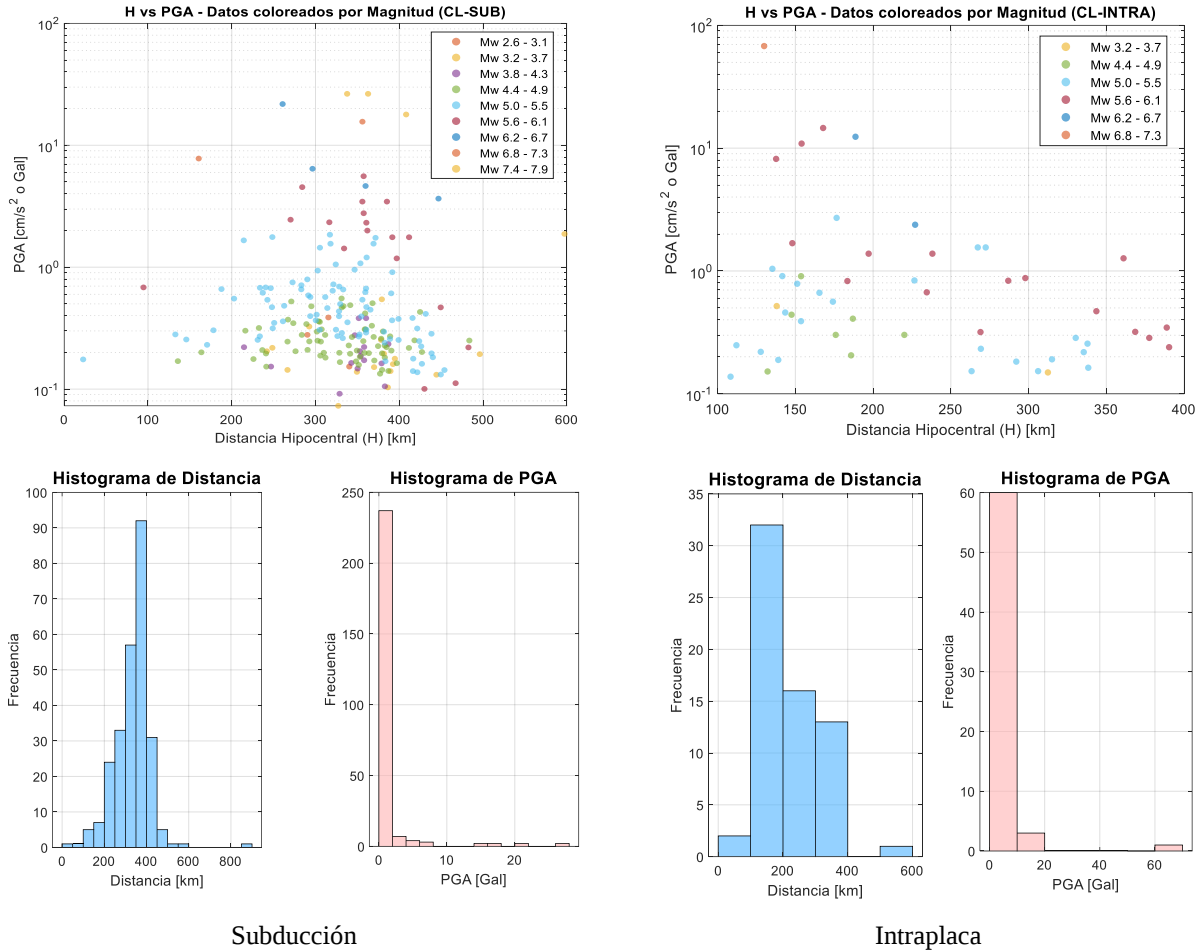


Figura 4.12 Distribución de variables y Relación de atenuación de la PGA con respecto a la Distancia Hipocentral para la estación Campo Libre- CCUT. La figura se presenta en dos bloques principales: Subducción (izquierda) e Intraplaca (derecha). Graficas superiores (Relación de atenuación): Muestran la PGA en función de la Distancia Hipocentral H km, con los datos clasificados por color según el intervalo de Magnitud de momento.

La atenuación en las estaciones de campo libre (CCUT), Figura 4.12 para los eventos de Subducción es dominada por eventos moderados concentrados entre 4.4Mw y 5.5Mw. Las distribuciones en distancia están centradas en el rango de 300km a 400km, lo que muestra una distribución de PGA sesgada, con la concentración máxima en valores cercanos a $0 \frac{cm}{s^2}$ (>230 registros en el primer intervalo). Mientras que en los eventos Intraplaca, el catálogo se concentra entre 5.0 Mw (24 eventos) a 6.1 (17eventos) Mw. La mayoría de los eventos se concentra entre 100 km y 400km, con más datos en el rango de 100 a 200 km. Aunque la distribución de la PGA está concentrada en el primer intervalo correspondiente a valores cercanos a $0 \frac{cm}{s^2}$. Sin embargo, hay valores más altos de PGA llegando a $60 \frac{cm}{s^2}$.

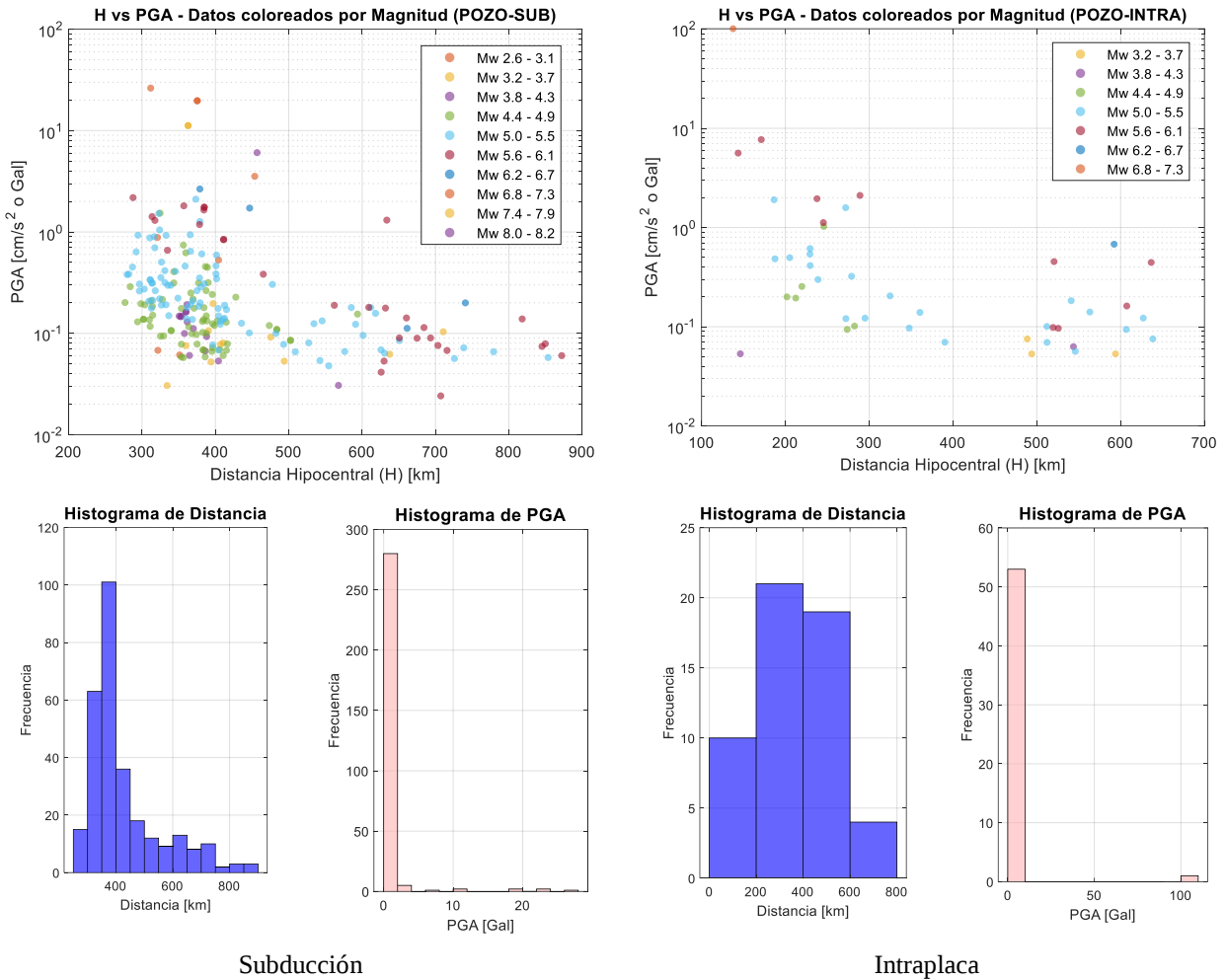


Figura 4.13 Distribución de variables y Relación de atenuación de la PGA con respecto a la Distancia Hipocentral para la estación POZO (45m) - CCUT. La figura se presenta en dos bloques principales: Subducción (izquierda) e Intraplaca (derecha). Graficas superiores (Relación de atenuación): Muestran la PGA en función de la Distancia Hipocentral (H km), con los datos clasificados por color según el intervalo de Magnitud de momento.

La atenuación en la estación de Pozo a 45 m de profundidad (CCUT), Figura 4.13 en los datos correspondientes a Subducción, el catálogo muestra un amplio rango de magnitudes, con una concentración entre 4.4Mw y 5.5Mw. y una Mw máxima en 0.2. La distancia predominante entre 300 y 400 km con aproximadamente 100 registros en el pico, y la PGA está concentrada en valores cercanos a 0 Gal (>280 registros en el primer intervalo). Mientras que para los eventos de Intraplaca se concentran en magnitudes intermedias 5.0 a 5.5 Mw (23 eventos) la mayoría de los eventos se concentra entre 200 km y 600 km siendo un rango más disperso, la distribución de la PGA está concentrada en el primer intervalo correspondiente a valores cercanos a 0 Gales. Sin embargo, se registran aceleraciones superiores a $100 \frac{cm}{s^2}$

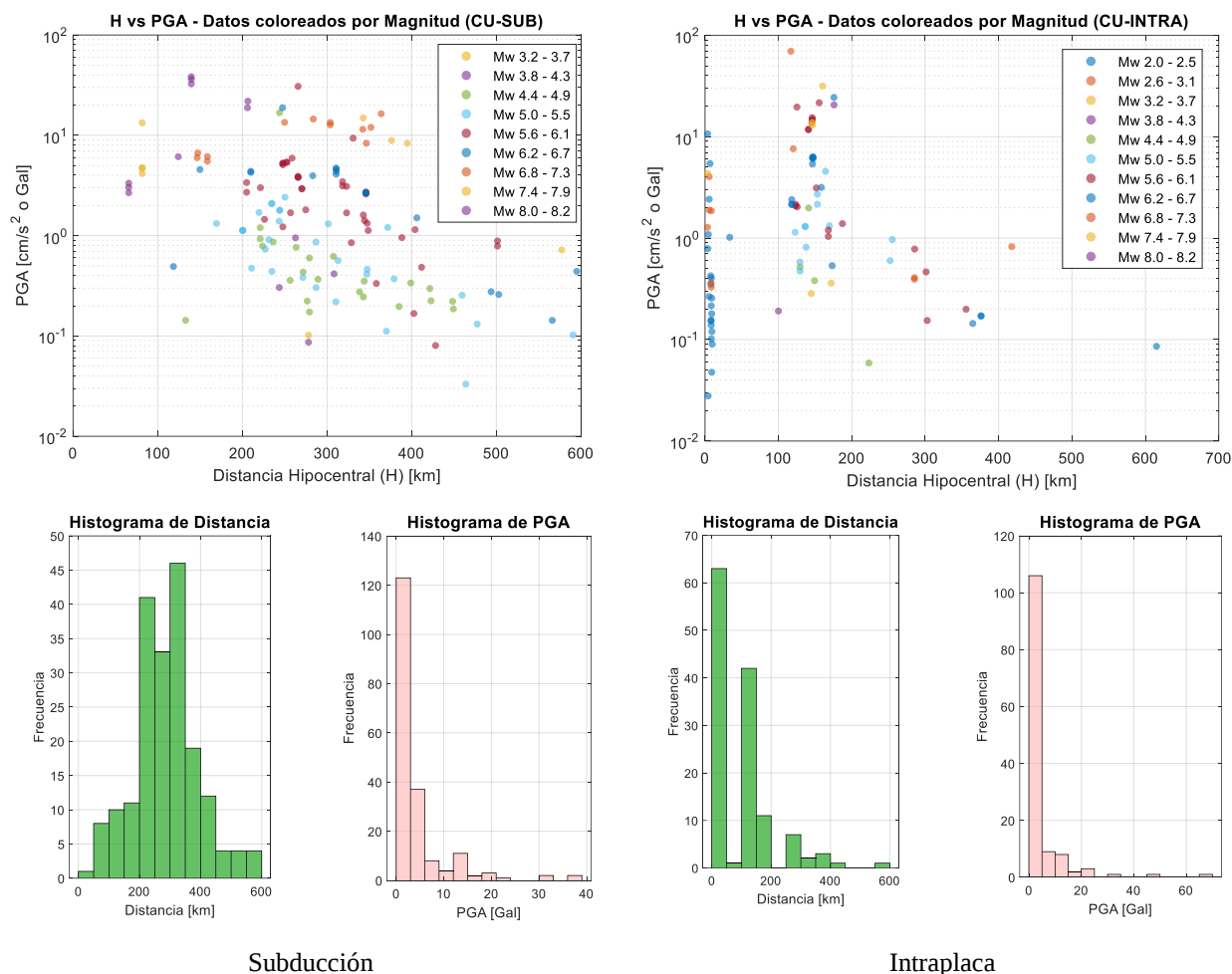


Figura 4.14 Distribución de variables y Relación de atenuación de la PGA con respecto a la Distancia Hipocentral (H) para la estación CU. La figura se presenta en dos bloques principales: Subducción (izquierda) e Intraplaca (derecha). Graficas superiores (Relación de atenuación).

En la estación de CU, Figura 4.14 muestra para los datos de subducción que las Mw se concentra en los intervalos 5.0 a 6.1, el pico de distancia se ubica entre 300 km y 350 km. La PGA es predominantemente baja con aproximadamente 120 registros en el primer intervalo, aunque existen valores hasta aproximadamente $40 \frac{cm}{s^2}$ que reflejan la influencia de sismos de magnitud alta a distancia intermedia (100 a 300 km) mientras que para los datos correspondientes a la fuente Intraplaca el catálogo cuenta con eventos locales o de magnitud muy baja 2.2 a 3.1, los cuales no se deben considerar para las GMPE, la distribución de distancias es dominada por eventos menores a 200 km está concentrada en el primer intervalo como en las demás gráficas, sin embargo, se muestra un intervalo con PGA muy elevados alcanzando los $\frac{cm}{s^2}$.

La mayoría de los registros de subducción se concentran a grandes distancias (entre 300 y 400 km en CU Y CCUT), teniendo más datos con valores de PGA bajos, por otro lado, los sismos intraplaca en ambos sitios (CU y CCUT) cuenta con datos a distancias más cercanas teniendo los picos a menos de 200 km registrando aceleraciones más altas que en los sismos de subducción. La escasez de PGA altas, en general podría introducir una mayor incertidumbre en las GMPE, mientras que la variedad en las distancias puede favorecer una mejor restricción de los coeficientes de atenuación en el rango cercano.

4.2.1.3 Obtención de SA

A partir de las componentes Este-Oeste (EW) y Norte-Sur (Norte) de los registros sísmicos se obtuvo la Aceleración Espectral (SA) para los periodos de 0.1 a 5 segundos en incrementos de 0.1 segundos, amortiguamiento crítico del 5%.

Se resolvió la ecuación diferencial del sistema oscilante utilizando el método de Newmark-Beta integrar Finalmente se obtuvo la combinación de estas componentes utilizando un promedio cuadrático (RMS) de las horizontales.

$$H = \frac{(MAX(accN))^2 + (MAX(accEW))^2}{2} \quad 4.5$$

$$RMS = \sqrt{H} \quad 4.6$$

Donde: $MAX(accEW)$ = aceleraciones espectrales máximas de las componentes $MAX(accN)$ = aceleraciones espectrales máximas de las componentes Norte

H= Componente Horizontal

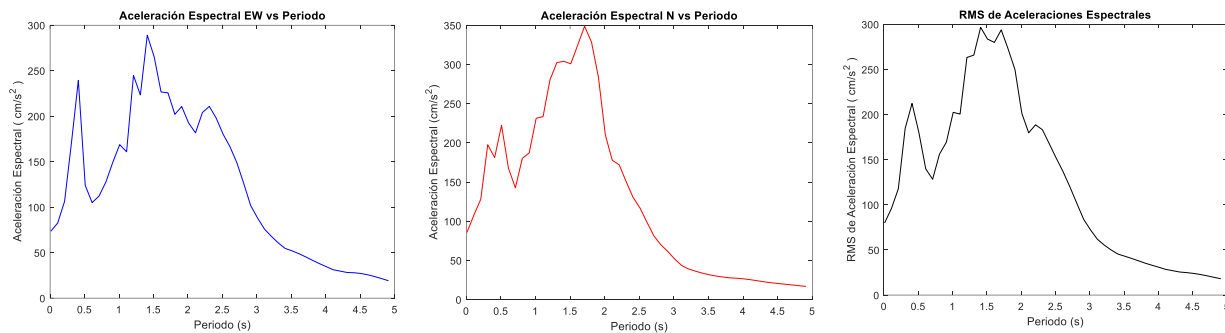


Figura 4.27 Aceleración Espectral y RMS de Aceleraciones espectrales correspondientes al Registro CCT31709.191 Fecha del sismo: 2017/09/19. Magnitud: 7.1 CAMPO LIBRE-CCUT. En azul se muestra la aceleración Espectral en la componente EW con un pico máximo en $300 \frac{cm}{s^2}$, en rojo la componente Norte con un pico máximo en 350, mientras que en negro se muestra el promedio de las componentes Norte y EW mencionadas con un máximo en $300 \frac{cm}{s^2}$. El espectro en negro muestra dos picos definidos, el primero se presenta en un periodo corto $T_s=0.4$ mientras que el pico máximo se encuentra en $T=1.4$ A 1.7, reflejando la amplificación en las bajas frecuencias y la influencia del efecto de sitio en los suelos blandos.

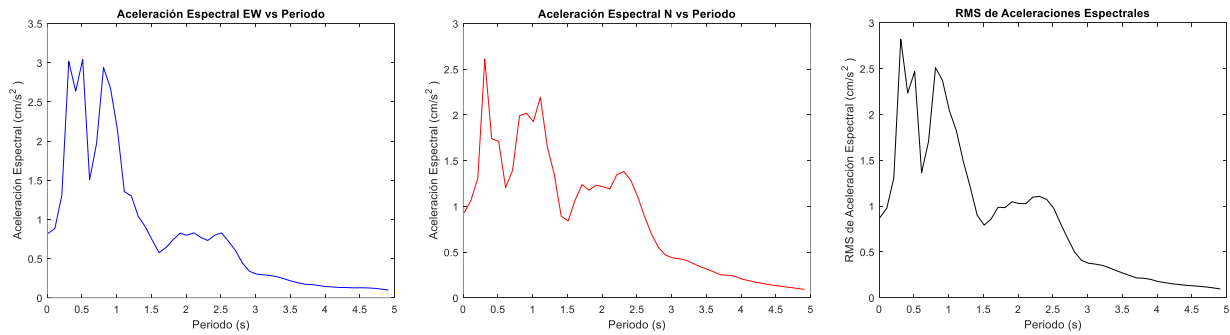


Figura 4.14 Aceleración Espectral y RMS de Aceleraciones espectrales correspondientes al Registro CCT31709.191 Fecha del sismo: 2017/09/19. Magnitud: 7.1 POZO-CCUT. En azul se muestra la aceleración Espectral en la componente EW con diferentes picos en periodos cortos y largos específicamente en 0.4s, 1.3s y 2.5s con la aceleración máxima en 90 cm/s^2 , en rojo se muestra la componente con un valor máximo de 120 cm/s^2 en 0.3 Norte mientras que en negro se muestra el promedio de las componentes Norte y EW mencionadas mostrando una aceleración máxima de 110 cm/s^2 en 0.4s

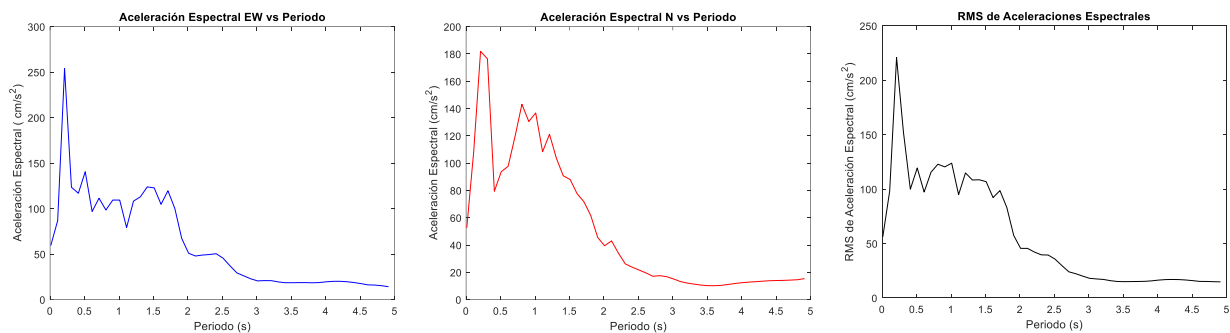


Figura 4.15 Aceleración Espectral y RMS de Aceleraciones espectrales correspondientes al Registro CUP51709.191 Fecha del sismo: 2017/09/19. Magnitud: 7.1 Ciudad Universitaria. En azul se muestra la aceleración máxima de 250 cm/s^2 , en un periodo menor a 0.5s en la componente EW, en rojo se muestra la componente Norte con un pico en 180 cm/s^2 mientras que en negro se muestra el promedio de las componentes Norte y EW mencionadas mostrando el pico máximo en $T=0.2\text{s}$ con una aceleración en 230 cm/s^2

La comparación entre los espectros obtenidos para el sismo 2017/09/19 de tipo intraplaca con una magnitud de momento de 7.1 muestra un contraste en las respuestas de los sitios. La estación CCUT-CL mantiene amplificaciones en los periodos largos (T_s 1-4 a 1.7s con amplitudes hasta 300 cm/s^2 mostrando el efecto de sitio en la zona de lago donde las ondas sísmicas de baja frecuencia son amplificadas en la superficie marcando ese contraste en los espectros de CCUT Pozo y CU, los cuales son consistentes al presentar un pico de aceleración máxima en periodos cortos. Aunque ambos se asemejan a una respuesta de suelo firme, las amplitudes del registro en pozo son menores que las de CU, esta atenuación en Pozo es el resultado directo de estar ubicado a profundidad, lo cual reduce la influencia de efectos superficiales y la posible interacción con superficies cercanas. La diferencia entre las respuestas en CCUT: CL y Pozo, a pesar de pertenecer al mismo punto geográfico, demuestra la variación entre las aceleraciones máximas con la profundidad generando la necesidad de modelar la atenuación de manera independiente.

4.2.2 Ecuación de Predicción del Movimiento

Para el cálculo de la Ecuación de Predicción del Movimiento del Suelo (GMPE), en este trabajo se propuso la siguiente forma funcional:

$$\log_{10} PGA = \alpha_1 + \alpha_2 M + \alpha_3 H + \alpha_4 \log_{10} H + \sigma \quad 4.7$$

Esta expresión describe cómo la aceleración máxima del suelo (PGA) disminuye con la distancia hipocentral H y tiene variaciones con la magnitud del sismo M , α_1 y α_2 son los coeficientes que muestran la dependencia con la magnitud mientras que α_3 y α_4 controlan la atenuación con la distancia, finalmente σ nos ayuda a saber que tan bien ajusta nuestro modelo. La estimación de los coeficientes se realizó mediante una metodología de inversión por mínimos cuadrados en dos etapas y mínimos cuadrados ordinarios, siendo este último ajuste el que mejor se comportó y empleó en el análisis de peligro.

4.2.2.1 Mínimos cuadrados en dos etapas

4.2.2.1.1 Primera etapa: relación atenuación con la distancia

La primera inversión buscó disminuir o aislar los efectos de la distancia hipocentral sobre la PGA. La distancia Hipocentral se calcula a partir de la distancia epicentral R y la profundidad focal PF , como:

$$H = \sqrt{R^2 + PF^2} \quad 4.8$$

Matriz binaria por evento

Antes de construir la primera matriz G_1 para la inversión, se construyó una matriz binaria nm donde cada fila representa un registro de aceleración y cada columna corresponde a un evento sísmico único. Esta matriz permite separar el efecto individual de cada evento en el modelo.

Matriz de diseño para la primera inversión

$$G_1 = [nm \ H \ \log_{10}(H)] \quad 4.9$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} nm & H_1 & \log_{10}(H_1) \\ nm & H_2 & \log_{10}(H_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ nm & H_n & \log_{10}(H_n) \end{bmatrix} \quad 4.10$$

$$y_1 = \begin{bmatrix} \log_{10}(PGA)_1 \\ \log_{10}(PGA)_2 \\ \vdots \\ \log_{10}(PGA)_n \end{bmatrix} \quad 4.11$$

$$D_1 = \begin{pmatrix} \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{pmatrix} \quad 4.12$$

Donde: nm es el evento sísmico y H la distancia epicentral.

El sistema se resuelve con el vector de observaciones:

$$y_1 = \log_{10} PGA_{observado} \quad 4.13$$

La estimación de parámetros se obtiene resolviendo:

$$D_1 = (G_1^T G_1)^{-1} G_1^T y_1 \quad 4.14$$

D_1 contiene los términos gamma por evento (uno por columna de nm) así como el coeficiente lineal α_3 y el coeficiente logarítmico α_4 que describen la dependencia de la PGA con la distancia respectivamente.

4.2.2.1.2 Segunda etapa: dependencia con la magnitud

Modela la dependencia de γ con la magnitud de cada evento y se propone la relación lineal:

$$\gamma = \alpha_1 + \alpha_2 M \quad 4.15$$

Construyendo una nueva matriz de diseño

$$G_2 = \begin{bmatrix} 1 & M_1 \\ 1 & M_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & M_n \end{bmatrix}, y_2 = \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_n \end{bmatrix} \quad 4.16$$

Donde M_i es la magnitud del i-esimo evento y el sistema se resuelve nuevamente por mínimos cuadrados:

$$D_2 = (G_2^T G_2)^{-1} G_2^T y_2 \quad 4.17$$

El vector D_2 contiene los coeficientes α_1 y α_2 que representan la relación directa entre la magnitud y la PGA.

Para lograr obtener una inversión estable se utiliza la función *pinv* (*pseudo inversa*) de Matlab que utiliza el método de la descomposición en valores singulares SVD para resolver el sistema de forma estable. Lo que hace esta función es encontrar la solución de mínimos cuadrados con la norma euclidiana más pequeña, la más suave, no considerando las componentes que causan que los valores sean muy altos (valores cercanos a cero), forzando una solución estable y con coeficientes más pequeños.

4.2.2.1.3 Desviación estándar del modelo

Una vez obtenidos los coeficientes, se calculan los valores estimados de PGA mediante una ecuación GMPE completa:

$$\log_{10} PGA_{calculada} = \alpha_1 + \alpha_2 M + \alpha_3 H + \alpha_4 \log_{10} H \quad 4.18$$

Se obtienen los residuales, la diferencia entre el valor observado y el valor estimado por el modelo permitiendo saber si el modelo subestima o sobrestima el valor de la intensidad (PGA o SA).

$$\log_{10}(PGA_{observado_i}) - \log_{10}(PGA_{calculada_i}) \quad 4.19$$

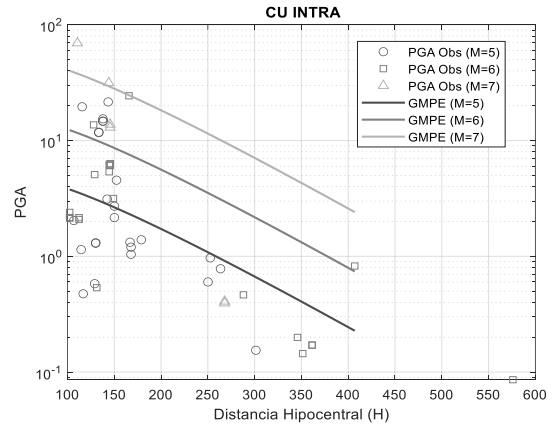
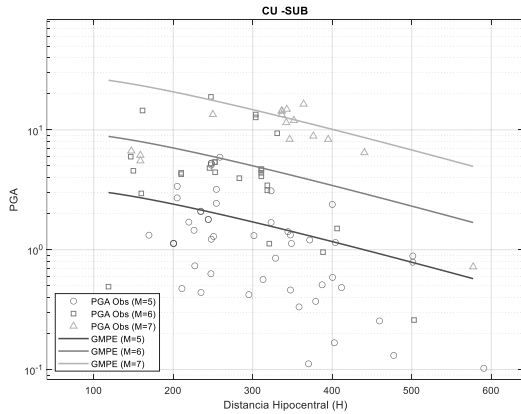
para evaluar la dispersión del modelo con respecto a los datos observados mediante el error cuadrático promedio entre los valores observados y calculados para estimar la desviación estándar poblacional:

$$\sigma_{poblacional} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log_{10}(PGA_{observado_i}) - \log_{10}(PGA_{calculada_i}))^2} \quad 4.20$$

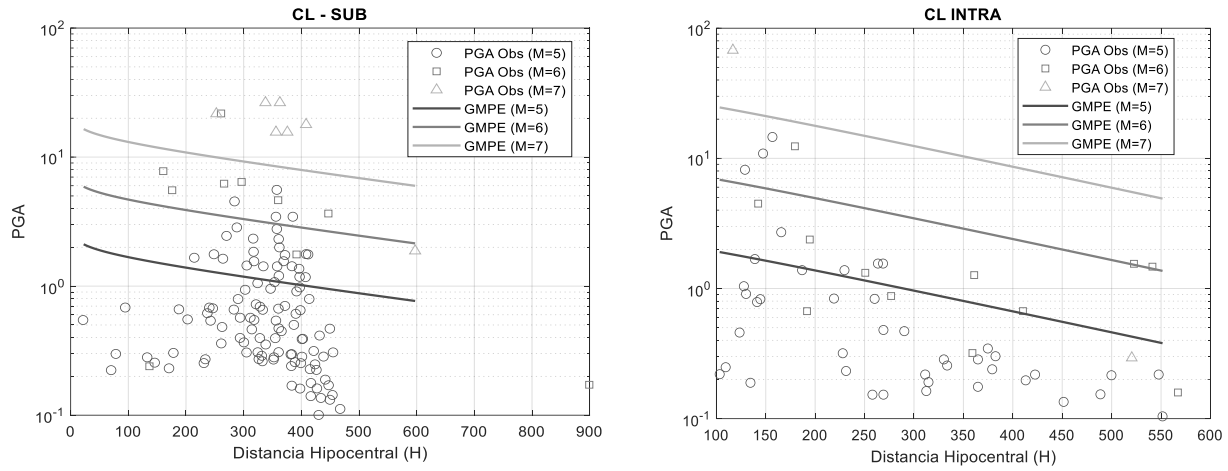
El valor de la desviación estándar (σ) es una métrica importante para cuantificar la incertidumbre asociada con las predicciones del modelo.

Este procedimiento también se realizó con todas las aceleraciones espectrales calculadas de 0.01, 0.03, 0.05, 0.07, 0.1 a 0.5 segundos, el cálculo se obtiene de manera independiente para los tres puntos diferentes: CU, CCUT en Campo libre y CCUT en Pozo, con el objetivo de obtener una ecuación de predicción del movimiento específica para cada sitio. Los resultados permiten analizar cómo varía la atenuación sísmica en función de la magnitud y la distancia epicentral en cada uno de estos lugares, proporcionando herramientas clave para la evaluación del peligro sísmico. Para el ajuste de las gráficas siguientes, en la regresión no se consideran el valor mínimo y el máximo.

CU



CL - CCUT



Pozo - CCUT

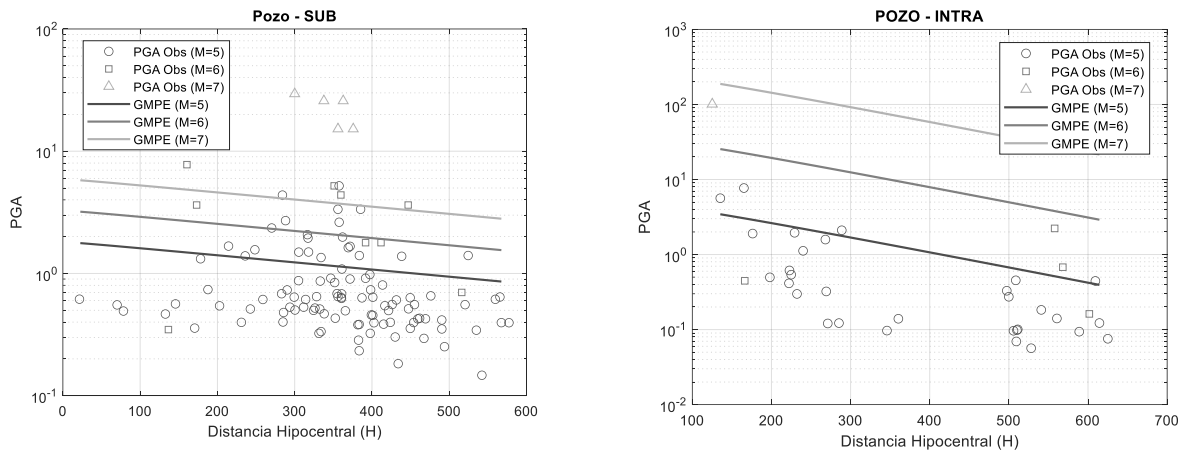


Figura 4.16 Ajustes de las GMPE evaluadas en las magnitudes 5,6 y 7 para cada estación considerando como fuente los sismos de subducción e intraplaca para cada estación.

A pesar de que la solución es matemáticamente razonable y aparentemente físicamente correcta, dichos coeficientes arrojan PGA que se pueden considerar bajas para lo conocido tomando como referencia la estación de CU.

Tabla coeficientes de PGA – inversión de dos pasos						
	α_1	α_2	α_3	α_4	σ modelo	Residuales
CU-sub	-2.7114	0.4684	-0.0020	0.2974	0.4140	0.0415
P-sub	-1.2890	0.2570	-0.0006	0.0060	0.3152	0.0000
CL sub	-2.2203	0.4462	-0.0005	-0.0890	0.3188	-0.0000

CU-intra	-3.0064	0.5127	-0.0050	0.5078	0.4925	0.0055
P-intra	-4.6273	0.8686	-0.0021	0.1124	0.3439	0.0000
CL- intra	-3.0304	0.5556	-0.0017	0.0750	0.3887	-0.0000

Tabla 4.4 correspondiente a los coeficientes obtenidos en la inversión de dos pasos para PGA. Los coeficientes α_1 y α_2 se obtienen de la segunda etapa de la regresión para eventos únicos donde describen la intersección con la escala y el coeficiente de magnitud respectivamente, α_3 la atenuación anelástica y α_4 la atenuación geométrica. Se muestran valores de PGA bajos a pesar de que su forma de atenuación sea correcta.

4.2.2.2 Inversión en un solo paso – mínimos cuadrados ordinarios

La inversión en un solo paso, o método de mínimos cuadrados ordinarios OLS, se empleó para obtener los coeficientes de la GMPE. Este método mantiene la misma forma funcional con la estructura log – lineal estándar de cuatro coeficientes.

El modelo predice el parámetro de aceleración Y (PGA o SA) a partir de la magnitud de momento y la distancia hipocentral.

4.2.2.2.1 Formulación Matricial

El problema se plantea como un modelo lineal de la siguiente forma:

$$y_i = \alpha_1 + \alpha_2 M_i + \alpha_3 H + \alpha_4 \log_{10} H + \sigma \quad 4.21$$

Que de manera matricial:

$$y = G\alpha + \epsilon \quad 4.22$$

Donde $y = \log_{10} PGA$ es el vector de observaciones transformadas, α es el vector de coeficientes del modelo $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4$ a determinar y ϵ es el vector de error aleatorio, que se supone tiene una distribución normal con media cero y desviación $\sigma(\epsilon \sim N(0, \sigma))$.

La matriz de diseño G se construye a partir de las variables predictivas y tiene una dimensión de $N \times 4$, donde N es el número de eventos empleados en la regresión.

$$G = \begin{bmatrix} 1 & M_1 & H_1 & \log_{10} H_1 \\ 1 & M_2 & H_2 & \log_{10} H_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & M_n & H_n & \log_{10} H_n \end{bmatrix} \quad 4.23$$

La primera columna representa al intercepto, la segunda la magnitud, la tercera la distancia hipocentral y la cuarta el logaritmo base 10 de la distancia hipocentral.

4.2.2.2.2 Solución de los Coeficientes

El vector solución D (contiene los coeficientes $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4$) se obtiene mediante la solución de mínimos cuadrados:

$$D = (G^T G)^{-1} (G^T y) \quad 4.24$$

4.2.2.2.3 Desviación estándar

La desviación estándar del modelo se calcula a partir de la suma de los residuales cuadráticos (representan la diferencia entre el valor observado y el predicho por la GMPE) y los grados de libertad.

Representa la dispersión total del modelo:

$$\sigma_{modelo} = \sqrt{\frac{\sum(residuales)^2}{N-4}}. \quad 4.25$$

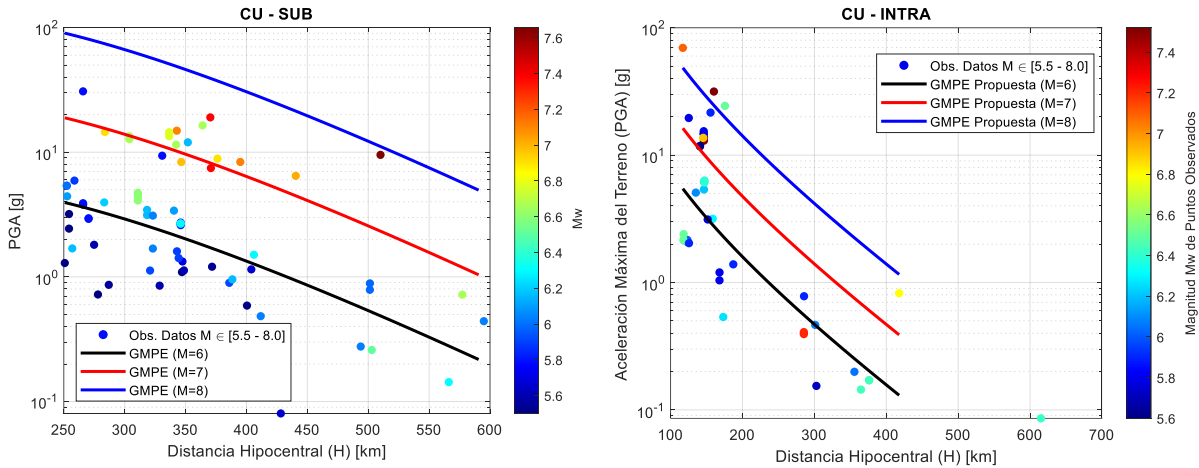
El término (N-4) en el denominador donde N es el número total de datos corresponde a los grados de libertad del sistema. Se resta 4 porque es el número de coeficientes que se estiman en el modelo.

En la Figura 4.17 se presentan los ajustes correspondientes a la PGA evaluadas en las magnitudes 6,7,8. Las gráficas comparan la GMPE propuesta (obtenidas por el método OLS en un solo paso) con los datos observados.

Se observa que la GMPE logra modelar la atenuación geométrica y la dependencia de la magnitud en el rango delimitado para subducción $H > 250$ & $M_w > 4$ (graficas izquierdas) y para intraplaca: $H > 50$ & $M_w > 4$ (graficas derechas).

En la mayoría de los casos la curva correspondiente a $M=6$ tiende a pasar el conjunto de puntos observados de menor magnitud (colores azul oscuro), mientras que las curvas $M=7$ Y $M=8$ muestran un incremento esperado en la intensidad para las distancias hipocentrales cercanas.

Los datos de subducción generalmente presentan una menor atenuación (pendientes menos inclinadas) en comparación de las intraplaca, donde la atenuación de la PGA con la distancia es más abrupta.



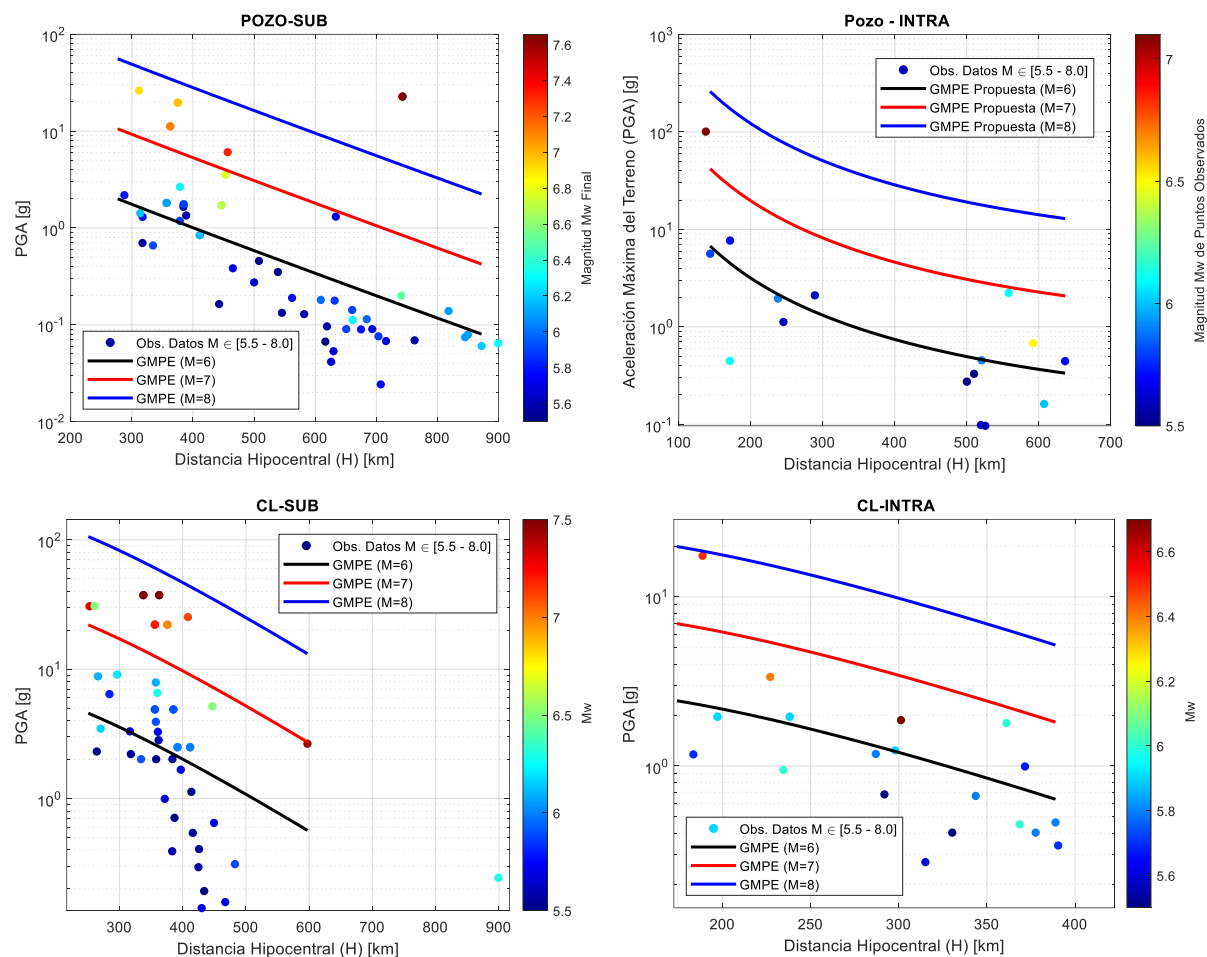


Figura 4.17 Curvas de atenuación GMPE propuestas para PGA correspondientes a CL: Campo Libre POZO: Sensor a 45m de profundidad. CU: Ciudad Universitaria. considerando como fuente los sismos de subducción e intraplaca. La regresión se ajustó tomando los datos validos SUBDUCCIÓN (Izquierda): Se considera la siguiente condición en los datos: $H > 250$ & $M > 4$ INTRAPLACA (Derecha): Se considera la siguiente condición en los datos: $H > 50$ & $M > 4$. Los ajustes que se presentan fueron evaluados en las magnitudes 6 (negro), 7 (rojo) y 8 (azul). El rango de la magnitud filtrada para todas las gráficas: $M \in [5.5, 8.0]$ y están coloreados según su magnitud (escala de colores a la derecha).

4.2.3 Espectro de Peligro Uniforme

El programa R-CRISIS se utilizó para llevar a cabo el Análisis Probabilístico de Peligro Sísmico (PSHA), con el objetivo de estimar la probabilidad de excedencia a diferentes niveles de movimiento del suelo inducido por sismos en una ubicación específica durante un periodo de tiempo determinado véanse (Ordaz y Salgado-Gálvez, (2020).

El análisis de peligro uniforme se basa en el teorema de la probabilidad total, en el que se integran el peligro considerando todas las posibles fuentes sísmicas, la probabilidad de los sismos que estas fuentes pueden generar y los movimientos del suelo resultantes.

La técnica PSHA, formalizada inicialmente por Cornell en 1968 y Esteva (1968), busca cuantificar la tasa o probabilidad de sobrepasar ciertos niveles de movimiento del suelo en un sitio o en un área geográfica, tomando en cuenta todos los sismos posibles.

R-CRISIS incorpora Modelos de Atenuación de Movimiento Fuerte del Suelo (GMPE) para predecir la intensidad del movimiento del suelo en función de las características del terremoto, la distancia y las condiciones del sitio. De acuerdo con Ordaz y Salgado-Gálvez (Caps. 2, 3), el software reconoce diversas familias de GMPE. Para este estudio usamos: tablas de GMPE, es decir, definidas por el usuario que especifican valores de intensidad para combinaciones particulares de magnitudes y distancias. En la figura 4.18 se ejemplifica de manera general los datos necesarios para crear las tablas en formato .atn, el cual es el solicitado por el software y la asignación de las tablas correspondientes a cada GMPE por tipo de fuente.

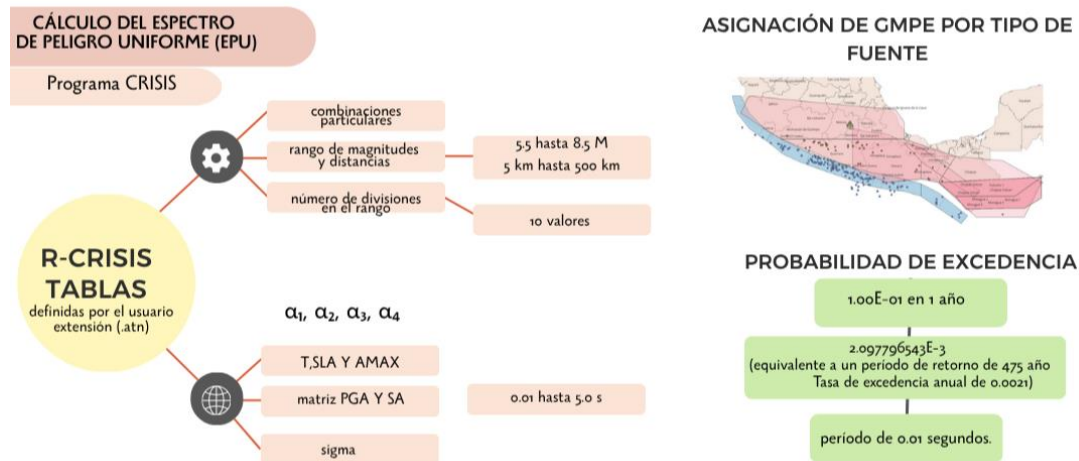


Figura 4.18 Metodología para la obtención de las tablas de atenuación para el programa R-CRISIS y esquema del cálculo del espectro de peligro Uniforme. La figura presenta un diagrama de flujo de la metodología utilizada para utilizar en el programa R-CRISIS con las GMPE calibradas y calcular el espectro de Peligro uniforme.

Como parte del desarrollo metodológico para obtener las curvas de peligro sísmico, se implementó un *script* en MATLAB. Este *script* se diseñó para generar los archivos con extensión (.atn) para cargar las tablas que requiere el programa R-CRISIS al momento de introducir la GMPE. La estructura de estos archivos debe incluir la definición de los siguientes parámetros: rango de magnitudes y el número de divisiones en este rango; rango de distancias y su correspondiente número de divisiones; los parámetros T, SLA y AMAX; y una matriz de valores de PGA y SA en formato ASCII. Los parámetros de dispersión del modelo se definieron de la siguiente manera.

Para un rango de magnitudes a partir de 4 hasta 8.5, discretizado en 10 valores. Las distancias epicentrales consideradas se encuentran entre 50 km y 500 km, divididas en 10 valores distribuidos de forma logarítmica. Los parámetros de las GMPE utilizadas utilizan los coeficientes obtenidos basados en la expresión:

$$\log_{10}(PGA) = \alpha_1 + \alpha_2 M + \alpha_3 R + \alpha_4 \log_{10}(R) \quad 4.26$$

donde: M_w : magnitud momento (M_w), R : distancia epicentral (km), α : coeficientes empíricos calibrados.

Las GMPE utilizadas corresponden a dos modelos específicos: uno para eventos de subducción y otro para eventos intraplaca. Ambos modelos fueron calibrados para las condiciones de sitio de Ciudad Universitaria y del Centro Cultural Universitario Tlatelolco, considerando registros en campo libre y en pozo. Los coeficientes ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$) de estas ecuaciones se determinaron previamente.

De manera general, lo que hace el *script* es que se cargan los coeficientes anteriormente calculados desde un Excel, definidos por periodos sísmicos (desde PGA y de SA de 0.01 hasta 5.0 segundos). Finalmente, exporta los resultados en formato. atn. Las fuentes empleadas para los cálculos son las siguientes:

Fuentes Subducción	Fuentes Intraplaca
Subducción Chiapas	Centro América
Subducción Brecha de Tehuantepec	Prof. Intermedio oeste
Subducción Oaxaca Este	Prof. intermedio Este nueva
Subducción Oaxaca 1	Eje volcánico
Subducción Oaxaca 2	Intraplaca
Subducción Oaxaca Oeste	
Subducción Ometepec	
Subducción San Marcos	
Subducción Guerrero	
Subducción Petatlán	
Subducción Michoacán	
Subducción Colima 1	
Subducción Brecha de Colima	
Subducción Jalisco	
Jalisco nuevo	
Gro-Mich nuevo	
Oaxaca nuevo	
Chiapas nuevo	

Tabla 4.5 Fuentes de subducción e intraplaca empleadas.

Se obtuvieron los espectros de peligro uniforme mediante el *software* R-CRISIS. Estos espectros se calcularon mediante la integral de Cornell-McGuire, la cual mostró la probabilidad de que una cierta intensidad de movimiento del suelo fuera excedida (expresada en 'g', para un periodo específico), considerando la contribución sísmica de cada zona (Figura 4.18) asignada a la GMPE para un conjunto determinado de periodos. El cálculo se basó en el teorema de probabilidad total, el cual sumó la probabilidad de que cada sismo exceda un determinado valor para el sitio, y empleó la interpolación logarítmica para generar el espectro de peligro uniforme continuo.

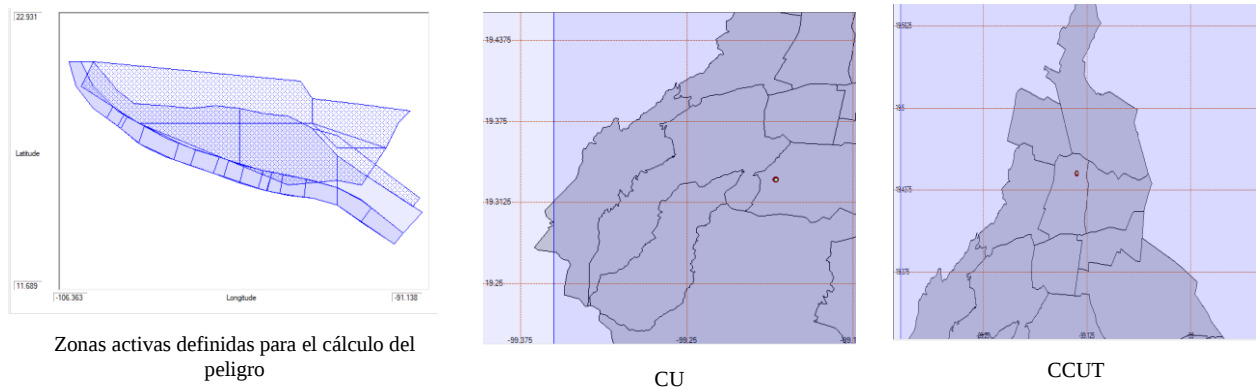


Figura 4.18 Fuentes activas y Área de interpolación para el cálculo de peligro. La figura muestra una serie de capturas de pantalla de la interfaz del programa R-CRISIS, ilustrando las configuraciones de entrada y los datos de salida para el análisis de peligro sísmico en CU. Izquierda: Zonas activas (Tabla 4.2) para el Cálculo del Peligro: Los polígonos azules delimitan las zonas activas consideradas en el modelo de peligro. A cada fuente se le asignó la GMPE específica. Derecha: Área de interpolación del Peligro: Área en la que se genera el peligro. El punto verde es la referencia de la ubicación de CU, se hizo lo mismo para CCUT-POZO y CCUT-CL.

Posteriormente, a partir de estas curvas y espectros, se modificó la probabilidad de excedencia, para un período de retorno de 475 años – Tasa de excedencia anual de 0.0021) para una intensidad específica de un período de vibración de 0.01 segundos.

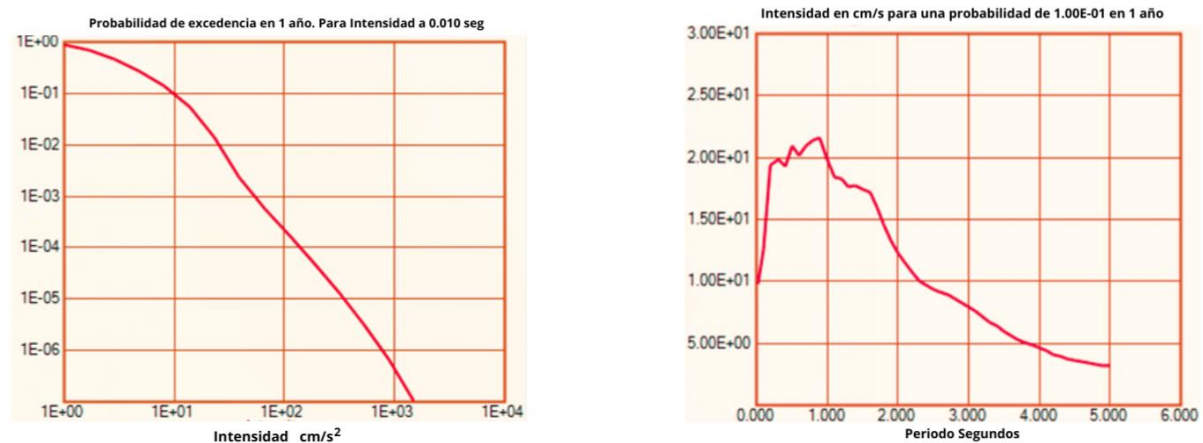


Figura 4.19 Visualización de los aportes y resultados obtenidos directamente del programa R-CRISIS para el cálculo del peligro sísmico en la estación CU. Gráfica izquierda: Curva de Peligro sísmico (Probabilidad de Excedencia) define la tasa de ocurrencia de una determinada intensidad del movimiento del terreno en el sitio de interés. Gráfica derecha: Espectro de peligro uniforme: Esta gráfica presenta la intensidad en g en función del periodo en segundos para una probabilidad de excedencia específica en este caso $1.00\text{E}-01$ en 1 año.

Integration parameters

Maximum integration distance km

Minimum triangle size km

Minimum Distance/Triangle Size ratio

CAV filter

Filter type

Time frame

1

Map return period (years)	PE in 1 years
47.5	2.08E-02
125	7.97E-03
250	3.99E-03
475	2.10E-03
2475	4.04E-04

Figura 4.20 parámetros de integración y selección del periodo de retorno para el cálculo de peligro sísmico en R-CRISIS. El panel superior izquierdo muestra los parámetros de Integración utilizados, la distancia máxima de integración es de 500 km. La tabla principal derecha muestra la equivalencia entre el periodo de Retorno (años) y la probabilidad de excedencia en un año. Para el cálculo del EPU para el sitio de interés se seleccionó el periodo de retorno de 475 años, cuya probabilidad de excedencia anual es de 2.10E-0.

Los resultados obtenidos mediante el software R-CRISI se presentaron en dos formatos: La curva de Peligro Sísmico y el Espectro de peligro uniforme. Estos resultados fueron obtenidos para los dos sitios: CU y CCUT (Pozo y Campo Libre).

Las siguientes gráficas muestran el EPU para un nivel de diseño basado en una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, lo que corresponde a un periodo de retorno típico de 475 años siendo un valor estándar en diseño sísmico para edificaciones comunes, ya que refleja la frecuencia esperada de eventos severos en la vida útil de una estructura. Es importante diferenciar que el periodo de retorno se refiere al intervalo promedio entre eventos de igual o mayor intensidad, mientras que el periodo de exposición corresponde al tiempo en el cual la estructura estará en servicio. La curva de Peligro Sísmico (observada en las gráficas izquierdas de las Figuras 4.21, 4.22 y 4.23) definió la tasa de ocurrencia de una determinada intensidad de interés en cada sitio de interés. El espectro de Peligro uniforme (graficas derechas) representó la intensidad (en unidades de g) en función del periodo para una probabilidad de excedencia específica antes mencionado.

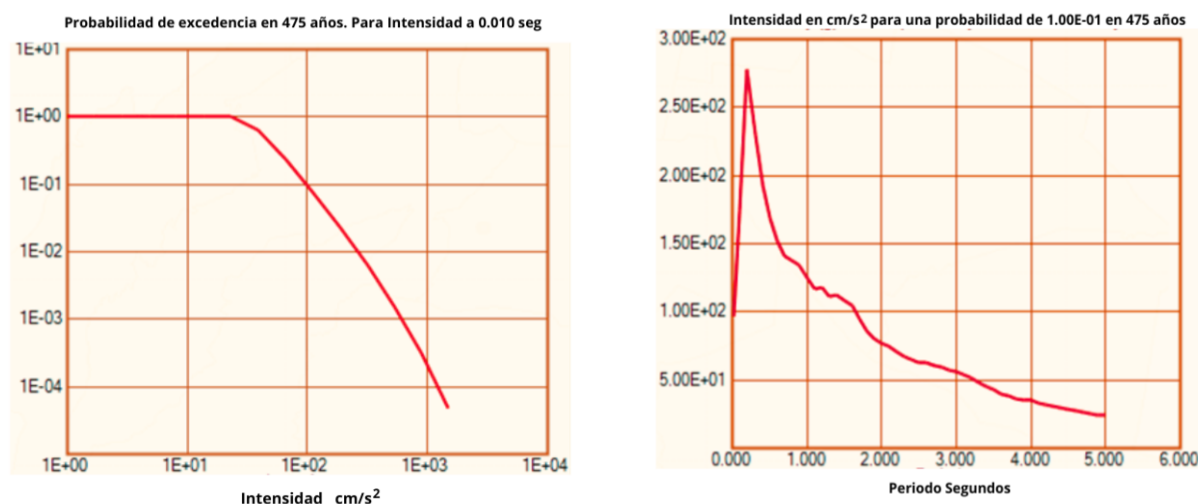


Figura 4.21 Visualización de los resultados obtenidos directamente del programa R-CRISIS para el cálculo del peligro sísmico en la estación CU. Gráfica izquierda: Curva de Peligro sísmico (Probabilidad de Excedencia) define la tasa de ocurrencia de una determinada intensidad del movimiento del terreno en el sitio de interés. Gráfica derecha: Espectro de peligro uniforme: Esta gráfica presenta la intensidad en g en función del periodo en segundos para una probabilidad de excedencia específica en este caso 1.00E-01 en 475 años.

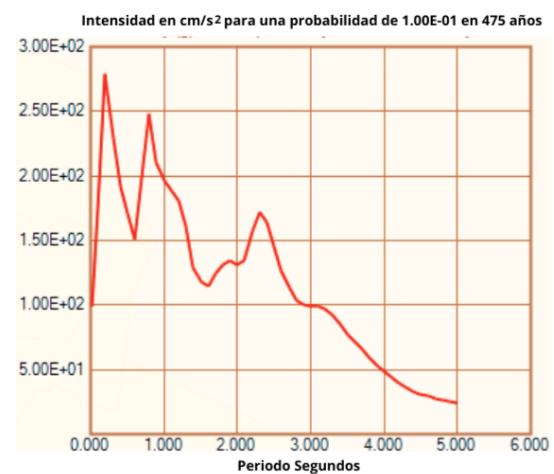
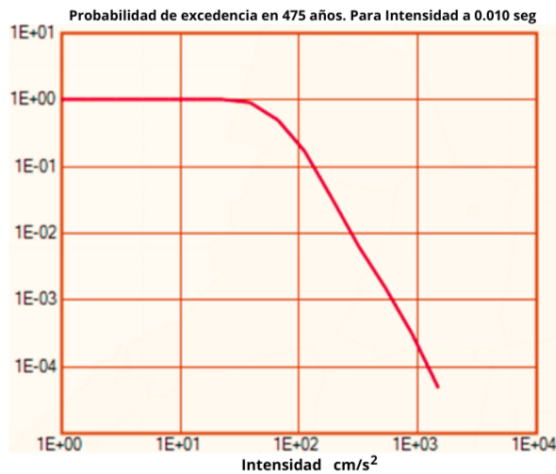


Figura 4.22 Visualización de los resultados obtenidos directamente del programa R-CRISIS para el cálculo del peligro sísmico en la estación CCUT-POZO. Gráfica izquierda: Curva de Peligro sísmico (Probabilidad de Excedencia) define la tasa de ocurrencia de una determinada intensidad del movimiento del terreno en el sitio de interés. Gráfica derecha: Espectro de peligro uniforme: Esta gráfica presenta la intensidad en g en función del periodo en segundos para una probabilidad de excedencia específica en este caso 1.00E-01 en 475 años.

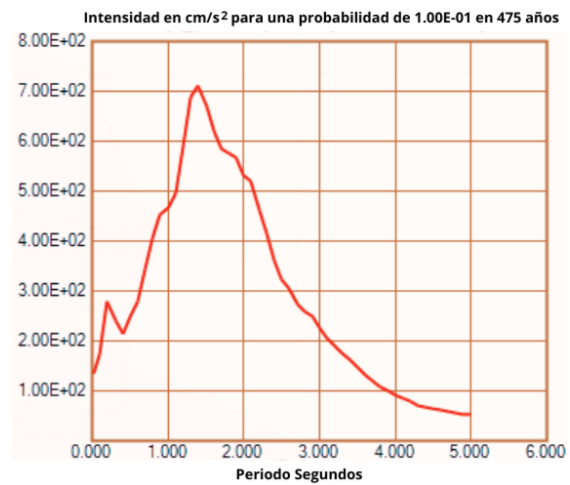


Figura 4.23 Visualización de los resultados obtenidos directamente del programa R-CRISIS para el cálculo del peligro sísmico en la estación CCUT-CL. Gráfica izquierda: Curva de Peligro sísmico (Probabilidad de Excedencia) define la tasa de ocurrencia de una determinada intensidad del movimiento del terreno en el sitio de interés. Gráfica derecha: Espectro de peligro uniforme: Esta gráfica presenta la intensidad en g en función del periodo en segundos para una probabilidad de excedencia específica en este caso 1.00E-01 en 475 años.

5 RESULTADOS

En este capítulo se presenta los resultados de la caracterización del peligro sísmico los dos sitios de la Ciudad de México: CU y CCUT. Los resultados se dividen en dos secciones: a) Los coeficientes de las GMPE calculados por regresión lineal simple y 2) Los EPU obtenidos mediante el proceso de Análisis probabilista. Un aspecto central es la diferenciación de la respuesta sísmica entre superficie y profundidad en la estación CCUT, donde se cuenta con un sensor en campo libre (superficie) y otro en pozo a 45 metros de profundidad.

5.1.1 Coeficientes de las GMPE

La estimación del peligro sísmico depende en críticamente de la calibración de las GMPE, las cuales constituyen la base analítica para los EPU propuestos. Estos coeficientes modelan la relación entre los parámetros de aceleración, magnitud, distancia y atenuación para las fuentes de subducción e intraplaca en cada sitio, incorporando la desviación estándar para cuantifica la incertidumbre del modelo. La Tabla 5.1 resume los coeficientes obtenidos para la PGA (coeficientes para otros periodos se detallan en el Apéndice).

Inversión un paso						
H > 250 & MW > 4						
PGA	α_1	α_2	α_3	α_4	σ modelo	Residual medio
CU-sub	-6.9950	0.6793	-0.0060	2.0919	0.3459	-0.0000
P-sub	-3.0459	0.7235	-0.0022	-0.1559	0.2849	0.0000
CL sub	-4.6207	0.6830	-0.0036	0.8640	0.2496	0.0000
H > 50 & MW > 4						
PGA	α_1	α_2	α_3	α_4	σ modelo	Residual medio
CU-Intra	0.5350	0.4744	-0.0034	-1.0868	0.4582	-0.0000
P-Intra	2.6528	0.5992	0.0011	-2.6944	0.3467	-0.0000
CL-Intra	-4.0866	0.4559	-0.0045	1.1284	0.2944	-0.0000

Tabla 5.1 Coeficientes obtenidos por el método ordinario para PGA. SUBDUCCIÓN (Azul): Se considera la siguiente condición en los datos: $H > 250$ & $M > 4$. Los ajustes fueron evaluados en las magnitudes 6,7 y 8. INTRAPLACA (Rojo): Se considera la siguiente condición en los datos: $H > 50$ & $M > 4$. Los ajustes que se presentan fueron evaluados en las magnitudes 6,7 y 8. Para CL se utiliza $H > 170$.

En los resultados, todos los valores observados para α_2 son positivos, indicando que aumenta proporcionalmente con la magnitud M_w (Figura 4.17). Respecto a la atenuación geométrica (coeficientes α_4), en CU-SUB (2.0919) y CL-SUB (0.3459) se observan valores positivos, compensados por un α_1 más negativo, lo que implica una atenuación más lenta comparada con Pozo-SUB, el cual presenta un valor negativo, indicando que la atenuación es más marcada. Para los coeficientes correspondientes a la fuente intraplaca, el valor más alto en α_2 corresponde a los datos del sensor de pozo, implicando una fuerte sensibilidad a la magnitud. Para los coeficientes α_4 CU y Pozo son negativos implicando una atenuación más rápida con la distancia, para CL-intra es positivo siendo la atenuación modelada por α_3 o α_1 .

Finalmente, el análisis de residuales en la Figura 5.1 demuestra que el residuo medio es nulo, garantizando un modelo inesgado. La distribución normal de los residuales normalizados y su dispersión aleatoria respecto a la distancia confirman que el modelo captura adecuadamente la física del fenómeno.

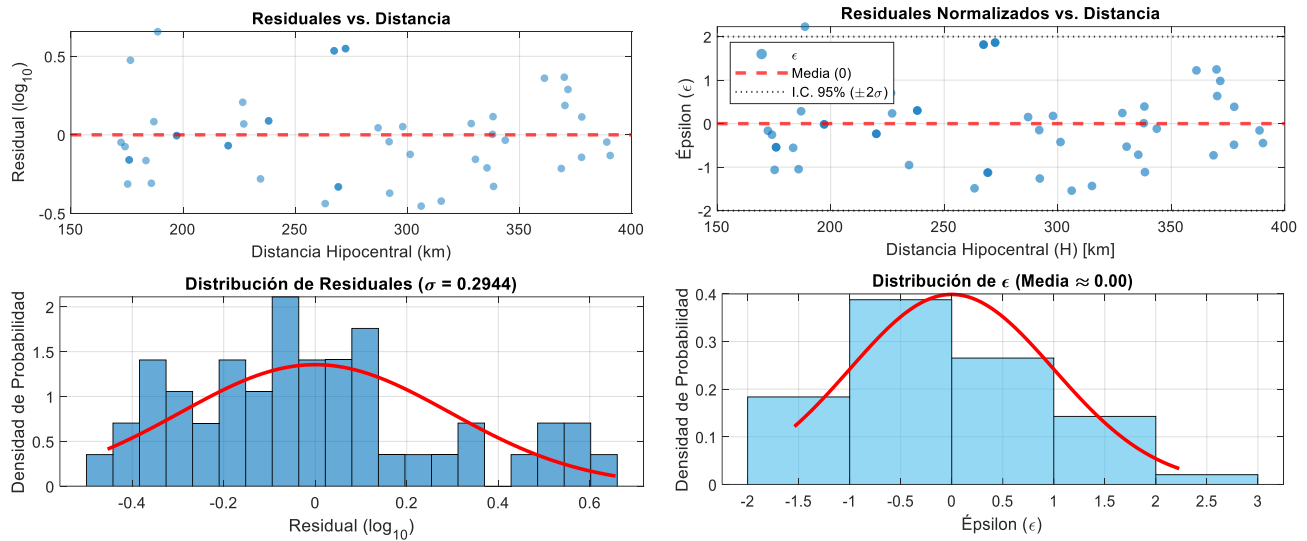


Figura 5.1 Análisis de residuales obtenidos para la estación CL-Intraplaca.

5.1.2 Espectro de Peligro Uniforme para los sitios investigados

El EPU para la estación de CU, representa la zona I o de loma/roca, se muestra en la Figura 5.1

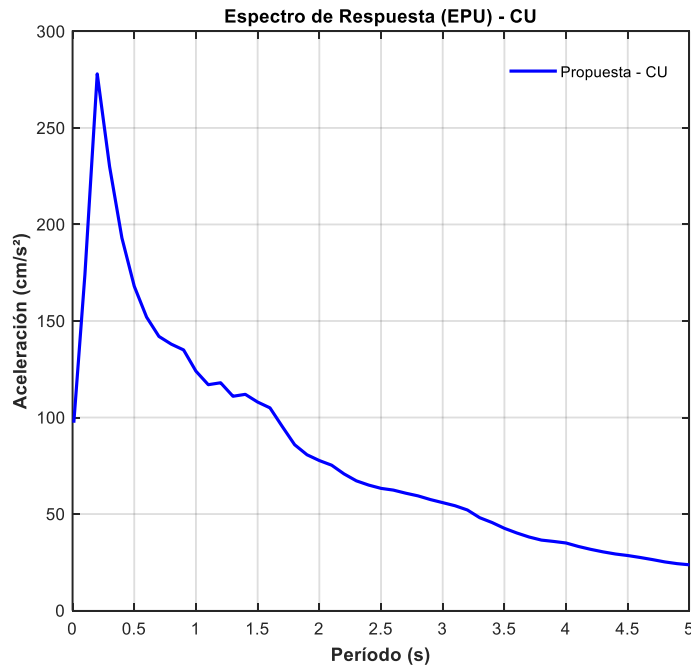


Figura 5.1 EPU propuesto para CU (Ciudad Universitaria, Zona de Loma/Roca). El pico de aceleración se presenta en el periodo de 0.25s alcanzando un valor de 275cm/s², su decaimiento es rápido a medida que el periodo aumenta después de 0.5s.

Este espectro muestra que en el rango de periodos cortos alcanzado un máximo en 280 cm/s^2 , y una atenuación rápida en periodos largos, siendo una característica de los sitios con suelo firme y establecer el nivel de referencia. El pico de aceleración se presenta en el periodo de 0.25s alcanzando un valor de 275 cm/s^2 , su decaimiento es rápido a medida que el periodo aumenta después de 0.5s

5.1.2.1 Espectro de Peligro Uniforme para la estación CCUT – POZO

EPU para la estación de CCUT- Pozo colocada a 45 m de profundidad en el estrato de suelo firme, se presenta en la Figura 5.2

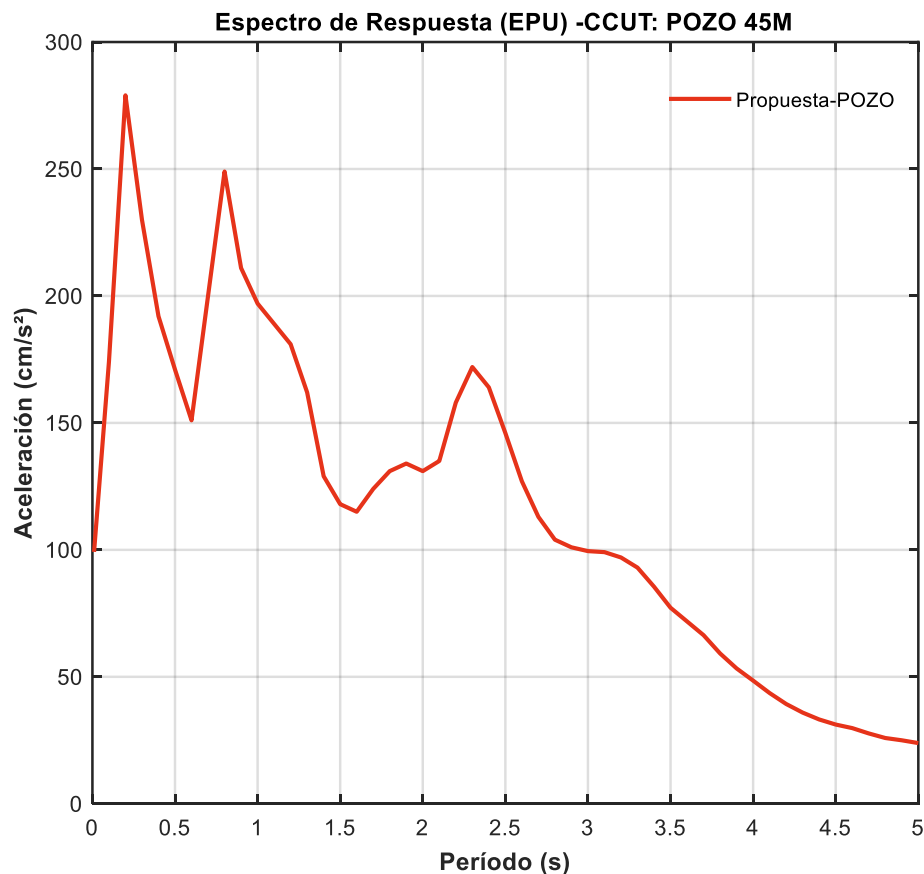


Figura 5.2 EPU propuesto para CCUT-POZO (Zona de Lago, sensor en suelo firme a 45 m de profundidad).

Este espectro muestra en $T=0.2s$ la aceleración máxima 279 cm/s^2 , A periodos largos decrece. La forma del espectro es similar a la de CU confirmando que el sensor está ubicado en suelo firme.

5.1.2.2 Espectro de Peligro Uniforme para la estación CCUT – Campo Libre (Superficie)

El EPU para la estación de CCUT- Campo Libre, ubicada en la superficie de Tlatelolco y representativa de la Zona III o lacustre, se observa en la Figura 5.3

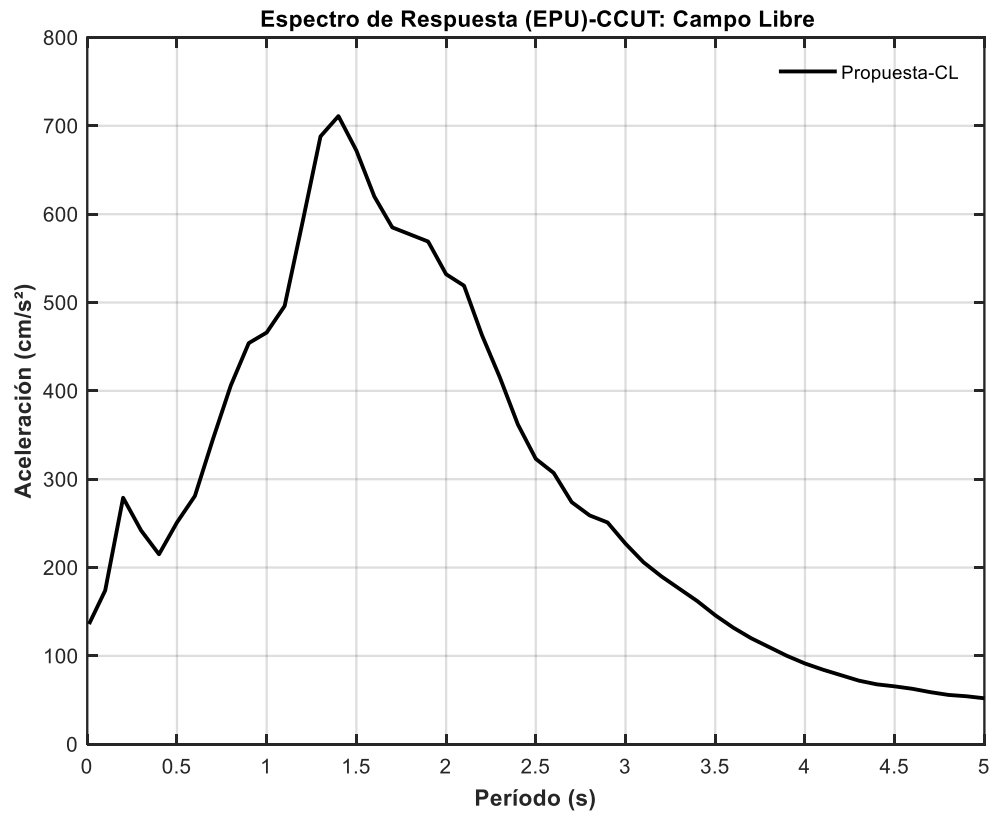


Figura 5.3 EPU propuesto para CCUT-Campo Libre

Este espectro tiene las máximas amplificaciones en el periodo 1.4 donde la aceleración máxima supera los 711 cm/s².

6 DISCUSIÓN

A pesar de la existencia de instituciones como el Sistema Nacional de Protección Civil (Sinaproc), el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) y el Consejo Nacional de Protección Civil (CNPC), las cuales han sido creadas con el fin de generar conocimiento en torno a los fenómenos naturales y antrópicos potencialmente peligrosos, persiste la necesidad de integrar un enfoque multidisciplinario que combine la geofísica y la ingeniería para abordar el peligro sísmico de manera integral.

6.1 Alcance general de los resultados

Los resultados obtenidos en este estudio muestran de forma consistente que el peligro sísmico en la Ciudad de México implica una dependencia ante las condiciones locales del sitio, incluso dentro de la misma región urbana y bajo la misma influencia de las mismas fuentes sísmicas regionales. En particular, la comparación entre CU y el CCUT evidencia como los efectos de sitio y la estratigrafía determinan la forma y amplitud de los EPU, aun cuando las fuentes sismogénicas sean las mismas y los modelos probabilistas sean equivalentes.

Los resultados de este trabajo abarcan la diferencia del peligro sísmico entre CU y CCUT, la similitud de respuesta entre CU y CCUT-Pozo ante el contraste con CCUT-Campo Libre; y las diferencias observadas respecto al EPU normativo. A partir de estos resultados se discuten las limitaciones metodológicas y sus implicaciones. A partir de lo mencionado, se discuten las limitaciones metodológicas del trabajo siendo la sensibilidad de la calibración de las GMPE y las implicaciones físicas y normativas de los resultados.

6.1.1 Limitaciones del catálogo sísmico y homogenización de magnitudes

Una de las principales fuentes de incertidumbre en el desarrollo de GMPE sitio-específicas es la calidad y consistencias del catálogo sísmico empleado. El catálogo del Servicio Sismológico Nacional (SSN) presenta heterogeneidad en los tipos de magnitud reportados, lo que introduce sesgos sistemáticos si no se realiza una homogenización adecuada. En este trabajo se evidenció que las relaciones empíricas de conversión a M_w pueden sobreestimar o subestimar la magnitud real dependiendo del rango de magnitudes, el tipo de fuente y el sitio, lo cual impacta directamente en las pendientes de las GMPE y en la estimación del peligro sísmico.

La implementación de funciones de calibración propias, utilizando regresión lineal ortogonal y la magnitud M_w del catálogo Global CMT como referencia, permitió reducir sesgos y generar un catálogo más consistente para la calibración de las GMPE. Sin embargo, el número limitado de eventos de gran magnitud y la diferencia en la duración de registros instrumentales entre CU (40 años) y CCUT (15 años) limitan la capacidad del estudio para capturar completamente la recurrencia de eventos de gran magnitud, especialmente aquellos que dominan el peligro en periodos largos.

La evaluación del peligro sísmico local, basada en el desarrollo de GMPE sitio-específicas, cuenta con desafíos en la calidad y la homogenización de los catálogos sísmicos. Son un factor importante, ya que estos registros, de acuerdo con su instrumentación, describirán las condiciones específicas del sitio, geología local, distancia al epicentro y la magnitud del sismo, factores que influyen directamente en la aceleración máxima y espectral y, a su vez, afecta la respuesta estructural. No obstante, el catálogo sísmico actual del SSN presenta desafíos significativos, particularmente en la consistencia de las magnitudes por lo que se optó por homogenizar los datos.

6.1.2 Justificación y alcance del Método OLS

Tras el planteamiento general sobre la necesidad de enfoques multidisciplinarios para el análisis del peligro sísmico, es pertinente discutir el alcance metodológico de las GMPE desarrolladas, particularmente en lo que respecta al método de ajuste empleado. El desarrollo de ecuaciones de predicción específicas por estación representa un cambio en el supuesto clásico de ergodicidad, común en muchos modelos normativos.

Si bien la literatura reciente favorece métodos de ajuste más robustos, como los enfoques de máxima verosimilitud o los modelos de efectos aleatorios, estos requieren bases de datos con múltiples estaciones registrando un mismo evento, lo que permite separar la variabilidad inter-evento e intra evento. En este trabajo al calibrarse para una sola estación con múltiples eventos, la aplicación de estos métodos condujo a problemas de inestabilidad numérica, con matrices cercanas a la singularidad debido a la dependencia lineal entre términos de atenuación, magnitud y variabilidad inter-evento impidiendo una interpretación física adecuada para los parámetros.

Por esta razón se optó por utilizar el método de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) como una solución transparente, reproducible y físicamente consistente para comparar la respuesta sísmica relativa entre sitios con condiciones geológicas contrastantes. Si bien el método OLS ha sido la base de la calibración de GMPEs, no separa explícitamente la variabilidad inter-evento e intra evento, su uso se considera adecuado dentro del alcance de este trabajo, cuyo objetivo no es desarrollar GMPE regionales transferibles, si no evaluar el impacto al emplear ecuaciones sitio-específicas en el cálculo del EPU. En este contexto, los coeficientes obtenidos deben interpretarse como representativos del comportamiento local del sitio y no como sustitutos directos de GMPE regionales desarrolladas bajo supuestos múltiples sitios y ergódicos.

La extrapolación de las GMPE es una limitación importante. Aplicar las ecuaciones a magnitudes superiores a las del conjunto de datos es poco fiable, lo que tiene implicaciones significativas para la predicción de eventos grandes y raros. Además, la evaluación de las curvas de GMPE contó una sensibilidad en las restricciones en la profundidad focal y la distancia Hipocentral. Lo cual nos dirige a tener una localización adecuada y regresa a importancia del catálogo utilizado. Esta sensibilidad resalta la importancia de la regionalización adecuada y la aplicación de restricciones bien definida para obtener las predicciones de los parámetros de aceleración confiables.

6.1.3 Análisis de las GMPEs

La estabilidad y confiabilidad de las GMPE calibradas en este estudio están ligadas a la calidad y distribución de los registros disponibles en términos de magnitud y distancia. En ese sentido la homogenización de las magnitudes a M_w constituye a uno de los puntos fuertes del trabajo, al mejorar en la consistencia física y estadística en la relación frecuencia-magnitud y el ajuste de los coeficientes de las GMPE

No obstante, la cobertura del catálogo no es homogénea entre sitios, la estación CCUT cuenta con un periodo de registro más corto y por lo tanto una menor cantidad de eventos grandes en comparación con CU, lo que limita la capacidad de restringir algunos coeficientes, especialmente aquellos relacionados con el escalamiento con magnitud y la atenuación a distancias cortas. Este factor introduce incertidumbre epistémica, reflejada en la dispersión del modelo, que debe ser considerada al interpretar los resultados. Esta limitación no invalida las GMPE desarrolladas, si no que resalta la importancia de entenderlas como modelos

empíricos condicionados al catálogo disponible y refuerza la necesidad de ampliar los registros instrumentales locales para mejorar su estabilidad en estudios futuros.

La evaluación de la GMPE propuesta se realiza mediante la comparación directa con modelos de atenuación previamente establecidos: García *et al.* (2005) y Jaimes *et al.* (2011). La figura 5.3 muestra la comparación para los datos de CU, separando ambas fuentes sísmicas: Subducción (lado izquierdo) e Intraplaca (lado derecho). En cada subfigura se presentan los datos de aceleración observados, coloreados según el intervalo de magnitud a la que pertenecen. Esta visualización permite comparar el comportamiento de las GMPE propuestas (líneas sólidas) en función de la magnitud y distancia hipocentral, y contrastar su atenuación con respecto a los modelos de referencia.

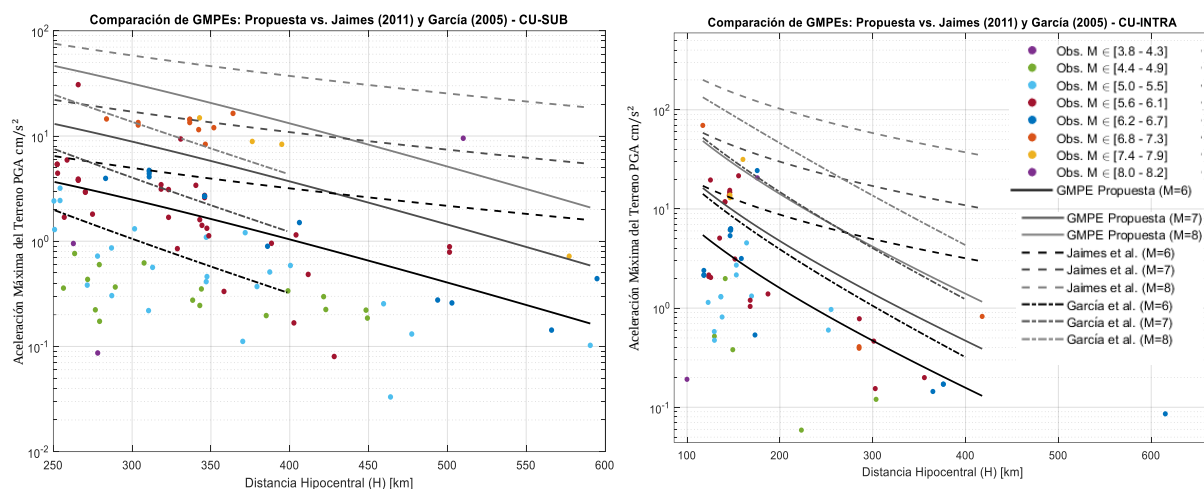


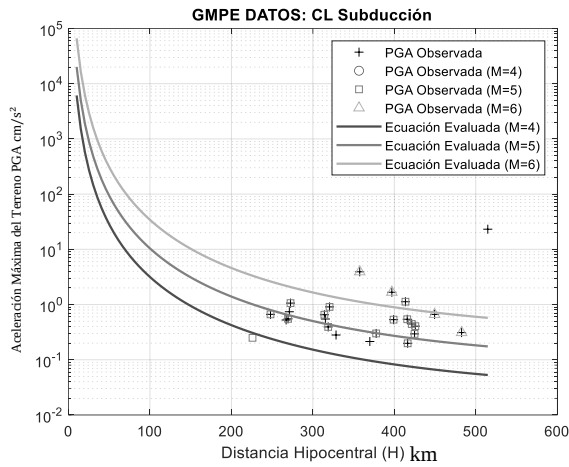
Figura 6.6 Comparación y validación de las GMPE propuestas para CU vs los modelos de García (2005) y Jaimes *et al.*, (2011). Izquierda: Sismicidad subducción. Izquierda: sismicidad Intraplaca. Las líneas sólidas representan la GMPE propuesta; las líneas discontinuas corresponden a Jaimes *et al.* (2011), y las líneas punteadas-discontinuas representan la GMPE de García *et al.* (2005). Los tres modelos fueron evaluados para las magnitudes $M_w = 6, 7$ y 8 . Los puntos de colores representan los datos de las PGA observadas en CU, agrupadas por intervalos de magnitud.

En el caso de la sismicidad Intraplaca (Figura 6.6, derecha), la GMPE propuesta muestra una atenuación y niveles de aceleración más cercanos a las curvas de García *et al.* (2005). Por otro lado, el modelo de Jaimes arroja consistentemente valores de aceleración más altos que la propuesta y el modelo de García, especialmente en las magnitudes altas. Es notable que para $M_w = 6$ la GMPE propuesta es la más baja de todas las GMPE graficadas, lo que sugiere aceleraciones menores para esa magnitud en CU.

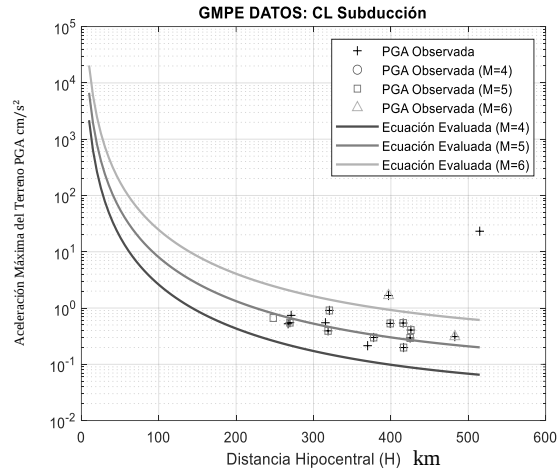
En la sismicidad correspondiente a los sismos de subducción (Figura 6.6, izquierda), el modelo propuesto se encuentra ubicado entre ambos modelos de referencia, pero su decaimiento es visiblemente más rápido en comparación de los modelos de Jaimes y García. El modelo propuesto predice, en general el mayor decaimiento con la distancia (pendiente más pronunciada). Esto implica que, a medida que el sismo está más lejos, la distancia se convierte en el factor dominara la aceleración, haciendo que la contribución de la magnitud (diferencia entre los sismos grandes) pierda peso relativo en la predicción final.

Sin embargo, agregar demasiados términos a la formula funcional puede llevar a un sobre ajuste, donde la GMPE solo funcione muy bien para ciertos datos, pero ya no funcione con nuevos, por lo que regularmente se utilizan validaciones cruzadas. Por otra parte, de una manera general o común es fijar una distancia y una magnitud de referencia.

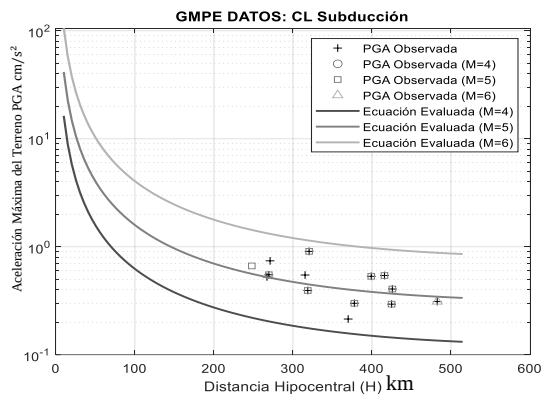
En esta grafica podemos observar que si no son iguales ya tiene un comportamiento adecuado con la única diferencia de usar una mejor conversión de Mw, usando la que mejor ajustara. Aunque a las de campo libre se les tuvo que hacer ajustes de acuerdo con la profundidad focal >45 pero <61.



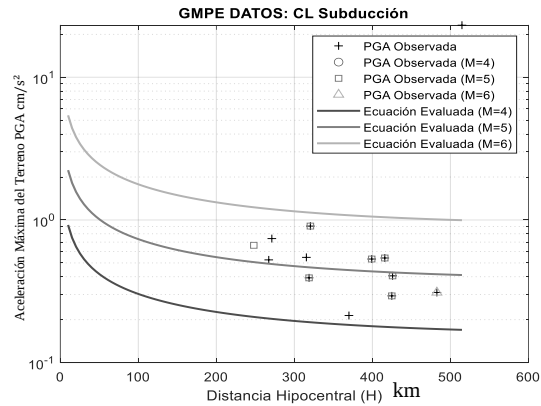
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 3; HASTA 35
PF MANTIENE EL MISMO COMPORTAMIENTO



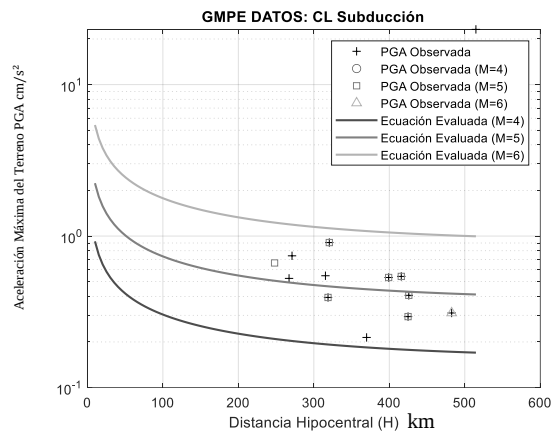
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 36



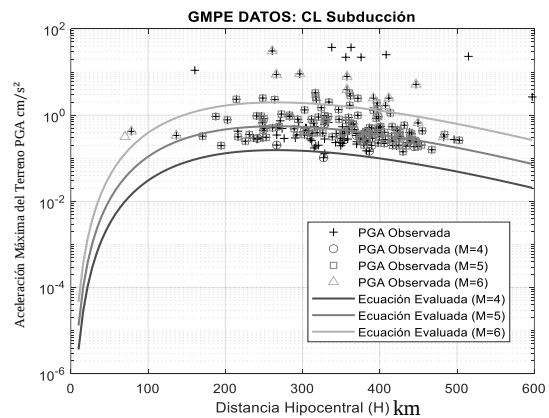
b) PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 37



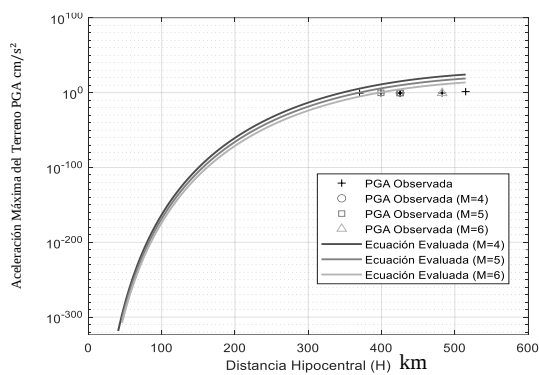
d) PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 38



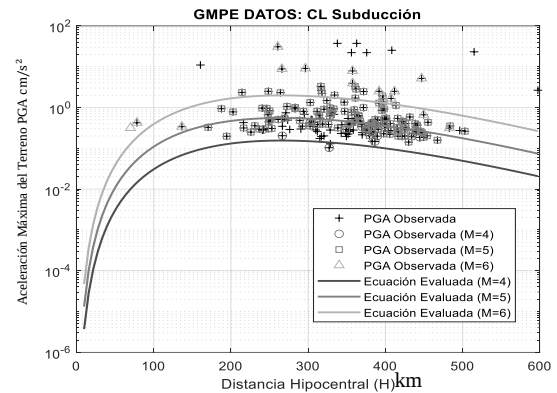
c) PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 39



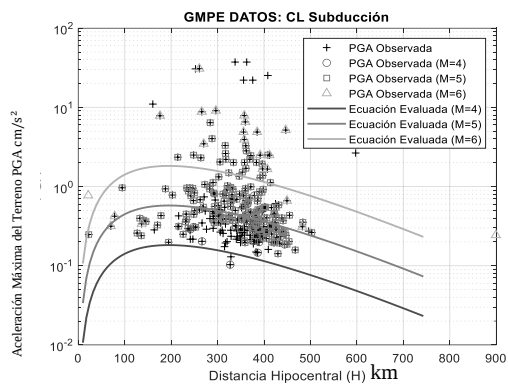
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 40



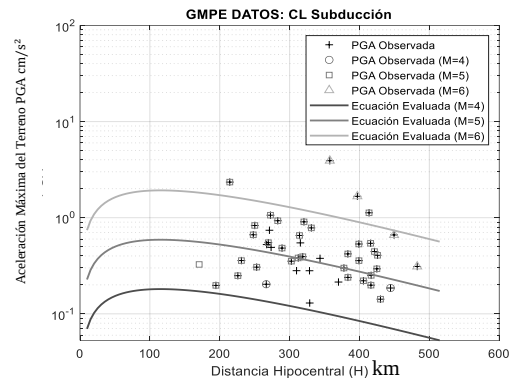
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 50



GA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 10



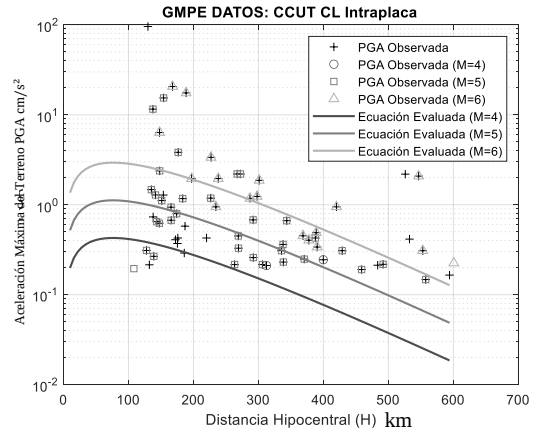
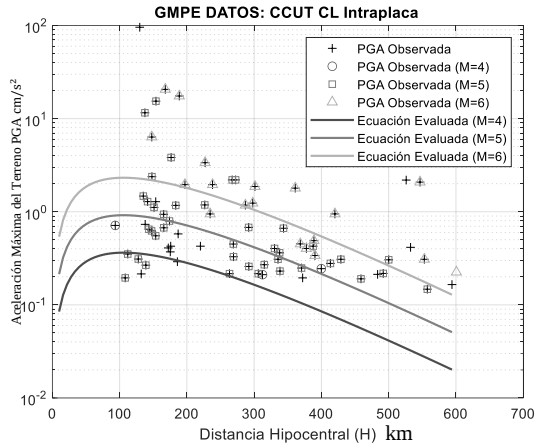
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 0



PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 20

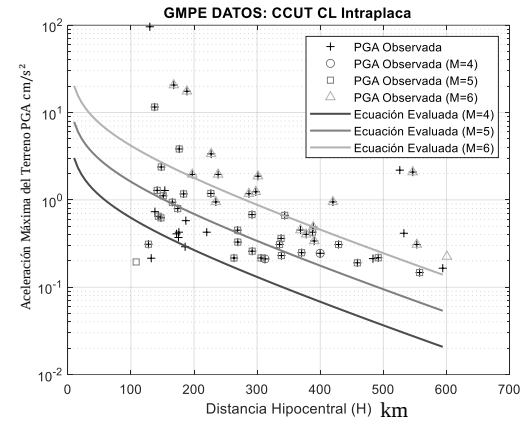
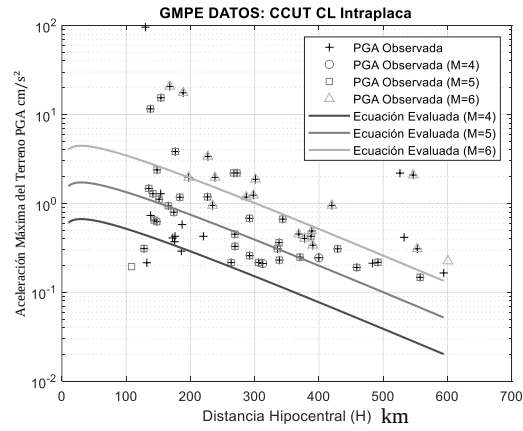
Figura 6.1 Figura correspondiente a GMP CL-SUBDUCCIÓN con variaciones en la Profundidad focal en la calibración

Podemos notar que para GMP CL-SUBDUCCIÓN considerando todos los datos no mostraban un comportamiento adecuado en la evaluación de las magnitudes 4, 5 y 6, se puede observar en la figura h) que sin ninguna restricción no cumple hasta considerar valores con profundidades focales mayores a 30 km a) que podríamos considerar que tiene el mayor número de datos, en la figura b) a pesar de cumplir los valores de aceleración son más bajos hasta los mayores de 40 km; con mayores profundidades a 50km los datos son menores pero igual no cumple nuevamente.



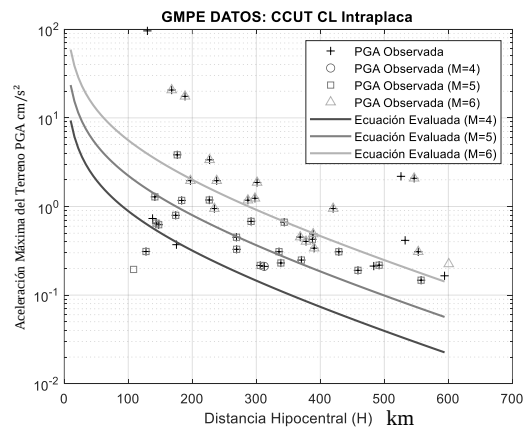
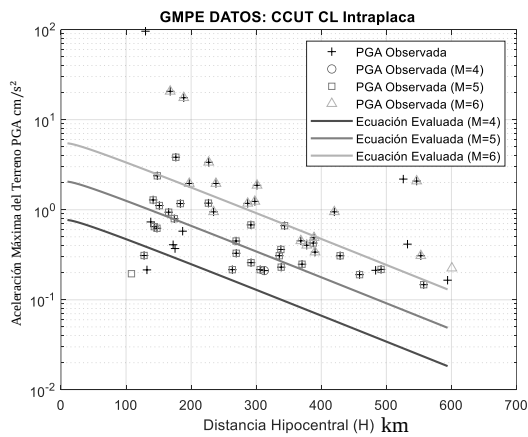
$\text{PGA} > 0 \ \& \ H > 0 \ \& \ M > 0 \ \& \ \text{PF} > 30$

$\text{PGA} > 0 \ \& \ H > 0 \ \& \ M > 0 \ \& \ \text{PF} > 30$



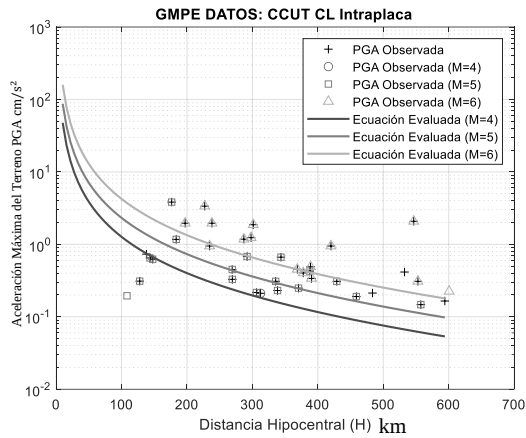
$\text{PGA} > 0 \ \& \ H > 0 \ \& \ M > 0 \ \& \ \text{PF} > 40$

$\text{PGA} > 0 \ \& \ H > 0 \ \& \ M > 0 \ \& \ \text{PF} > 45$

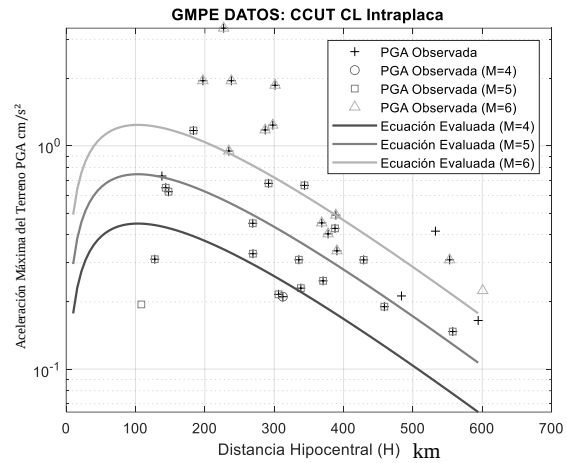


$\text{PGA} > 0 \ \& \ H > 0 \ \& \ M > 0 \ \& \ \text{PF} > 50$

$\text{PGA} > 0 \ \& \ H > 0 \ \& \ M > 0 \ \& \ \text{PF} > 55$



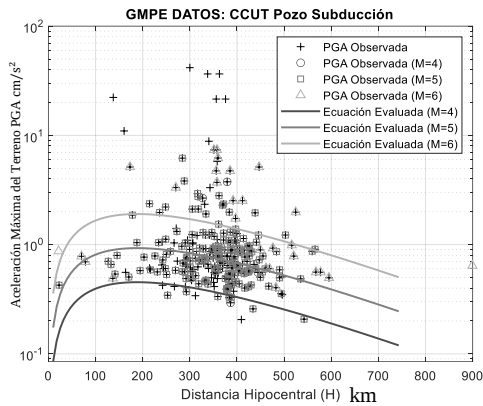
$PGA > 0 \ \& \ H > 0 \ \& \ M > 0 \ \& \ PF > 60$



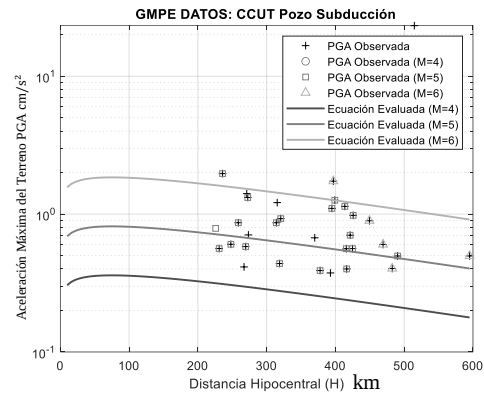
A PARTIR DE $PF > 61$ VUELVE A
PRESENTARSE EL MISMO COMPORTAMIENTO

Figura 6.2 correspondiente a GMP CL-Intraplaca con variaciones en la Profundidad focal.

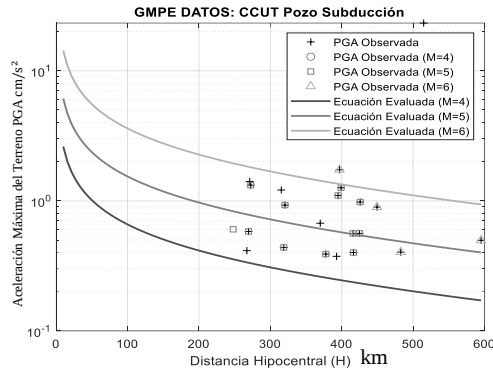
Para la base de datos CL-Intraplaca volvemos a notar que el comportamiento teniendo toda la base de datos no refleja el comportamiento físico decreciente esperado hasta mayores de 40 km de profundidad focal se empieza a comportar de una manera adecuada, pero con una profundidad focal mayor a 61 a pesar de contar con datos se vuelve con un comportamiento adecuado. También podemos apreciar que en mayores a 50 tiene el mayor comportamiento lineal al decrecer.



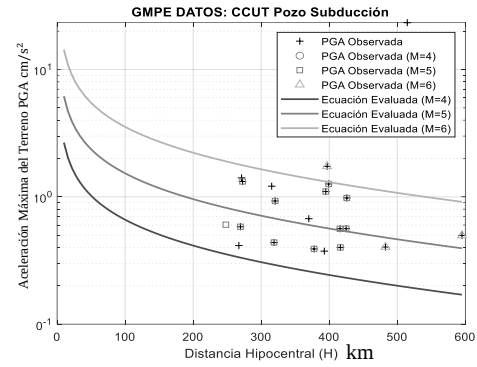
$PGA > 0 \ \& \ H > 0 \ \& \ M > 0 \ \& \ PF > 0$



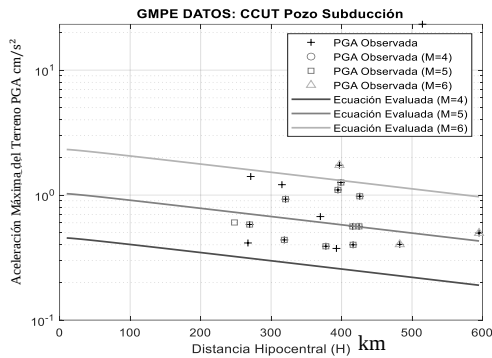
$PGA > 0 \ \& \ H > 0 \ \& \ M > 0 \ \& \ PF \geq 30$



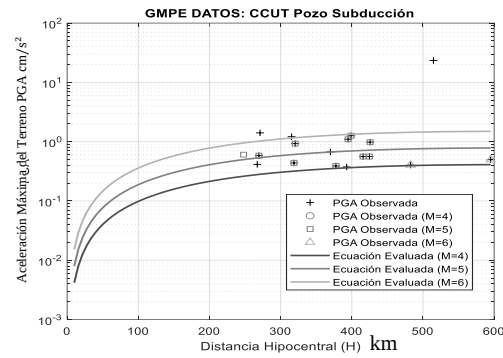
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF >=35



PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF >=36



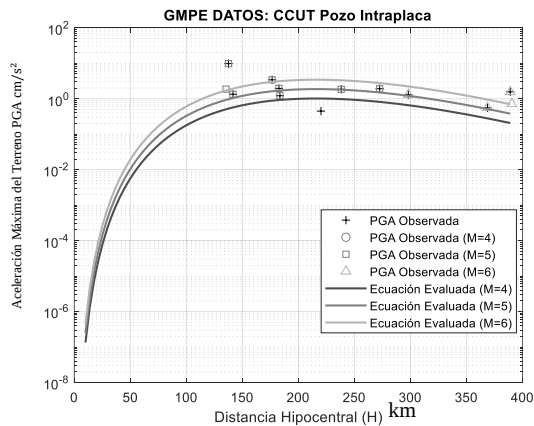
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF >=37



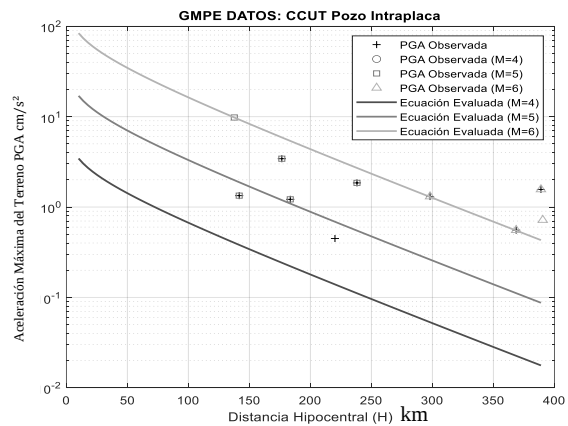
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF >=38

Figura 6.3 correspondiente a GMP Pozo – Subducción con variaciones en la Profundidad Focal.

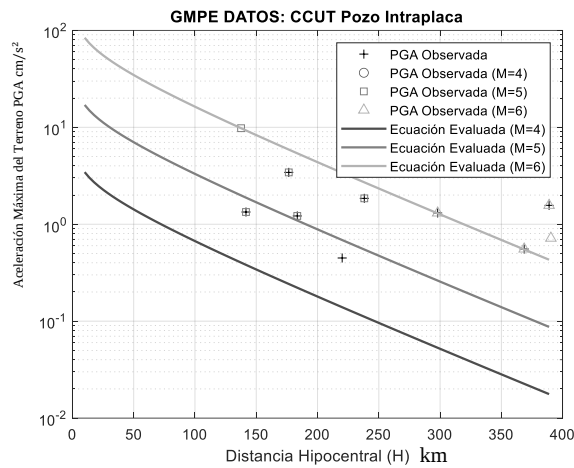
En estas graficas Figura 6.3 vemos nuevamente que cuando usamos toda la base de datos no tiene el comportamiento esperado si no hasta los valores iguales a 30 en la profundidad focal empieza a decrecer en relación con la distancia, y cuando son valores iguales o mayores a 35 y 36 tiene valores más aceptables al comportamiento, aunque cuando son iguales o mayores a 37 tiene un comportamiento más plano y a partir de 38 km de profundidad nuevamente tiene el comportamiento contrario.



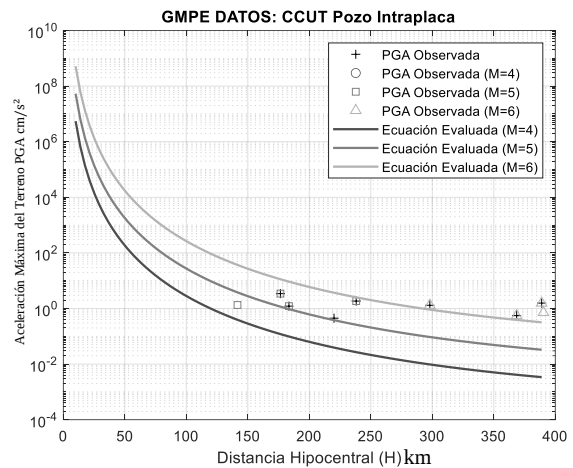
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF >=30



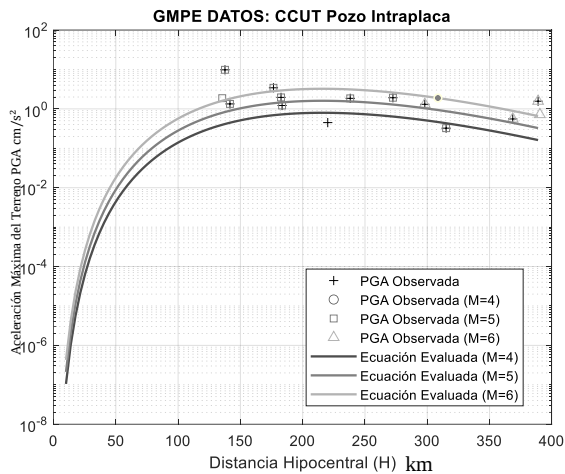
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF >45



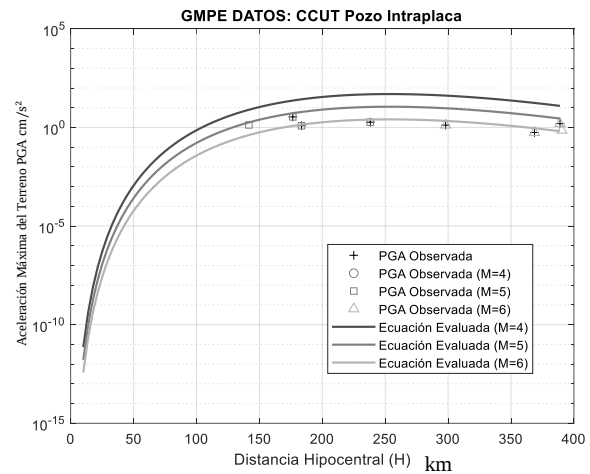
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF >=46 hasta 48 es similar



PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF >=49



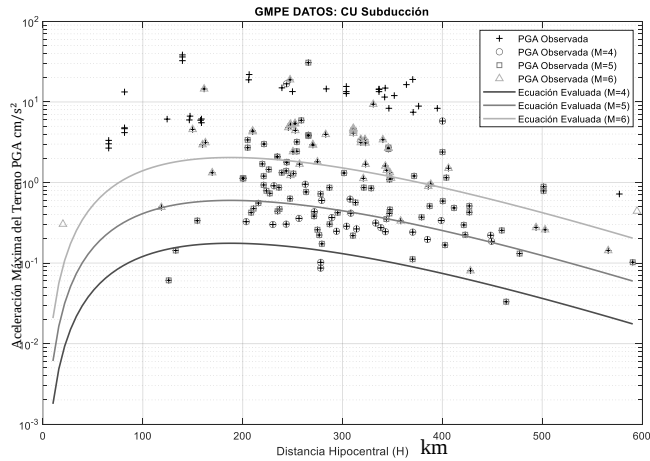
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 0



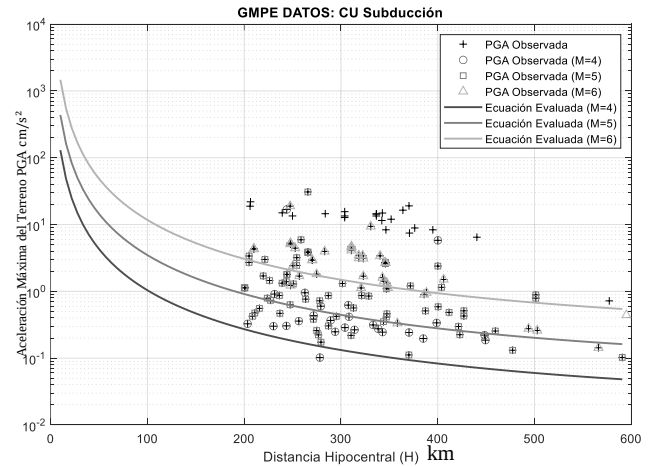
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF >=50

Figura 6.4 Grafica correspondiente a GMP Pozo-Intraplaca con variaciones en la Profundidad focal en la calibración

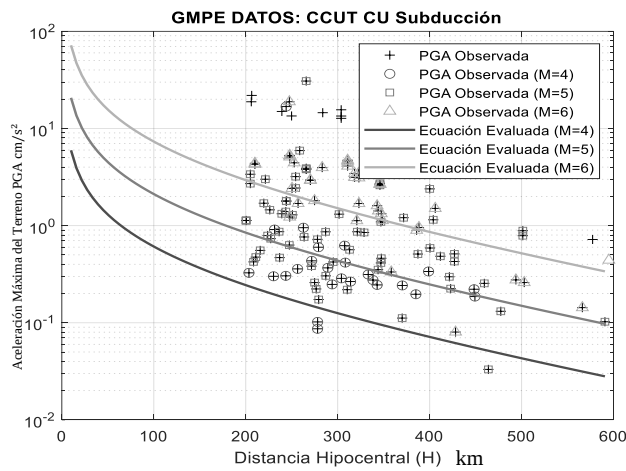
Para las GMP Pozo – Intraplaca con todos los datos empieza con valores muy pequeños aumentando hasta empezar a decrecer pero su comportamiento se ve más constante que un decaimiento esperado, este comportamiento cambia hasta considerar el conjunto de datos con profundidades focales ≥ 45 aunque en considerando profundidades focales mayores iguales a 49 tiene valores mucho más altos y su curva se ve un decaimiento exponencial aunque consideraríamos que tiene menos datos al estar más restringido.



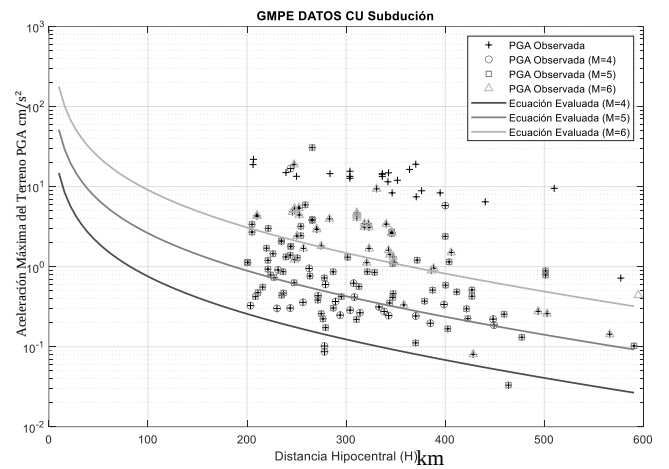
PGA > 0 & H > 0 & M > 0 & PF > 0 Tiene el mismo comportamiento hasta antes de 159 km de distancia



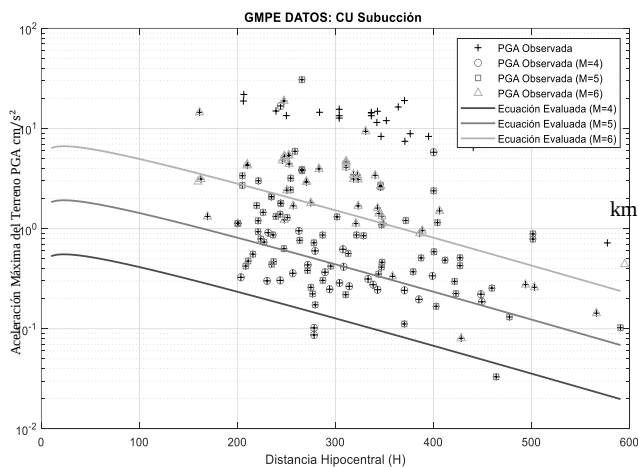
PGA > 0.1 & H > 180 & M > 0 & PF <= 40



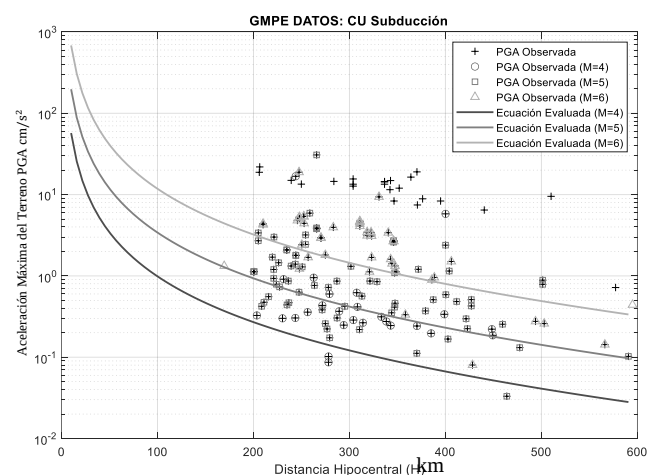
PGA > 0 & H > 180 & M > 0 & PF <= 40



PGA > 0 & H > 170 & M > 0 & PF > 0



PGA > 0 & H > 80 & M > 0 & PF > 0



PGA > 0 & H > 165 & M > 0 & PF > 0

A partir de H>160 empieza a tener este comportamiento.

Figura 6.5 correspondiente a GMP CU – Subducción con variaciones en la Profundidad Focal.

Para la base de datos de CU subducción podemos observar que si modificamos las restricciones $H > 165$ & $M > 0$ & $PF > 0$ Tiene un comportamiento esperado, el decaimiento de la aceleración con la distancia, lo cual es considerable ya que no hay sismos de subducción a una menor distancia, por otra parte si la restricción es de 80 km de distancia hipocentral empieza a tener el comportamiento decreciente y se observa una curva más lineal; Por otra parte si consideramos $H > 40$ & $PF \leq 40$ también cumplen con ser decreciente y mantiene ese decaimiento exponencial pero $PGA > 0$ & $H > 170$ & $M > 0$ & $PF > 0$ también lo cumple entonces el factor principal es la distancia a la que se encuentran.

Por lo que la evaluación de las curvas GMPE obtenidas para las magnitudes 4,5 y 6 muestra una sensibilidad en el conjunto de datos y las consideraciones en la restricción de los datos (PF), por lo que se resalta la importancia de la regionalización y la aplicación de restricciones adecuadas para obtener predicciones de PGA adecuadas y confiables.

6.1.4 Comparación con la normativa

La comparación entre los espectros del EPU mediante GMPE específicas del sitio y los espectros normativos proporcionados por el SASID muestra diferencias significativas, particularmente en la estación CCUT ubicada en la zona lacustre. Estas discrepancias son menos evidentes en la estación CU, lo cual es consistente con sus condiciones de sitio correspondientes a suelo firme, donde la respuesta sísmica tiende a ser mas cercana al comportamiento promedio regional.

Las diferencias observadas entre los EPU calculados en este trabajo y los obtenidos mediante el sistema SASID reflejan, el uso de las GMPE ergódicas promedio en la normativa y en contraste con las GMPE sitio-especificas empleadas. Si bien el enfoque normativo proporciona una herramienta practica para el diseño, los resultados sugieren que esta puede suavizar o subestimar efectos locales críticos, particularmente en zonas con condiciones geotécnicas distintas.

Dado lo anterior, la validación de los EPU propuestos Requiere un contraste con modelos de peligro sísmico previamente establecidos. En este trabajo dicha validación se realizó mediante la comparación de los espectros obtenidos a partir del SASID y PRODISIS como se muestra en la Figura 6.11 para la estación de CU y con los espectros del SASID en sus versiones 2017 y 2023 para el CCUT en la Figura 6. Esta comparación no solo evalúa la consistencia de los resultados, sino que también identifica las implicaciones de las diferencias metodológicas y de bases de datos consideradas en cada enfoque.

En particular, las discrepancias observadas en la estación CCUT refuerzan la importancia de considerar modelos no ergodicos que incorporen información local, ya que resultan mas sensibles a los efectos de sitio dominantes en zonas lacustres. En este sentido, los resultados no contradicen el enfoque normativo, sino que lo complementan, resaltando el valor de los análisis sitio-específicos como una herramienta adicional para una evaluación más detallada y realista del peligro sísmico.

6.1.4.1 Espectro de Ciudad Universitaria

El espectro de CU está caracterizado por tener el pico máximo en periodos cercanos a 0.1 a 0.4s característico de un suelo firme independientemente de la metodología usada de manera ergódicos, siento este el mayor aporte de los sismos intraplaca, luego decae, pero tiene ciertos máximos y mínimos correspondientes a los sismos de subducción. La Figura 6.11 presenta la comparación del EPU propuesto para CU (línea sólida negra), los espectros de SASID en línea naranja discontinua y PRODISIS (Línea azul claro discontinua). Se consideran los aportes de los sismos corticales y locales, además de los intraplaca y subducción para realizar una comparación justa.

El espectro de CU está caracterizado por tener el pico máximo en periodos muy cortos $< 0.5s$, lo cual es característico de un suelo firme. El pico de aceleración propuesto de CU, presenta su pico máximo en periodos muy cortos, $T=0.25s$ con un valor de 278 cm/s^2 siendo este el mayor aporte de los sismos intraplaca, posteriormente decae, pero se aprecian las pequeñas variaciones en los máximos y mínimos correspondientes a los sismos de subducción.

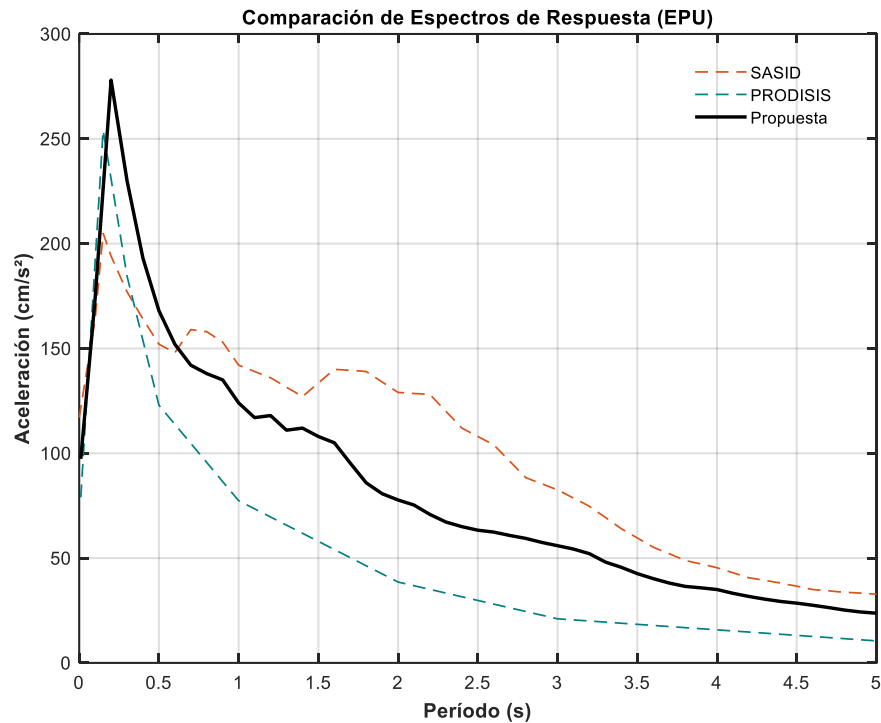


Figura 6.12 Espectros de Peligro Uniforme propuesto para Ciudad Universitaria y comparación con SASID Y PRODISIS.
La línea negra solida es el espectro propuesto para CU, SASID está representado por líneas discontinuas naranjas y PRODISIS (línea azul claro discontinua).

El espectro propuesto decae más rápido que el espectro del SASID, en todo el rango de periodos superiores a $0.7s$, pero se tienen aceleraciones intermedias a partir de $0.5s$ entre el espectro del PRODISIS (más bajo) y el SASID (más alto).

La Figura 6.13 permite la comparación entre los dos espectros pertenecientes al movimiento en suelo firme: CU y CCUT-POZO. Ambos espectros confirman la consistencia en los picos máximos dentro de los periodos cortos, validando la ubicación del sensor de pozo. El espectro de pozo muestra una aceleración superior en la aceleración máxima.

En el espectro de Pozo se puede apreciar que el primer pico es igual que el obtenido en CU, mientras que después de 0.6 existe una variación considerable, siendo una posible causa la influencia del sitio en el que está ubicado, una zona de lago.

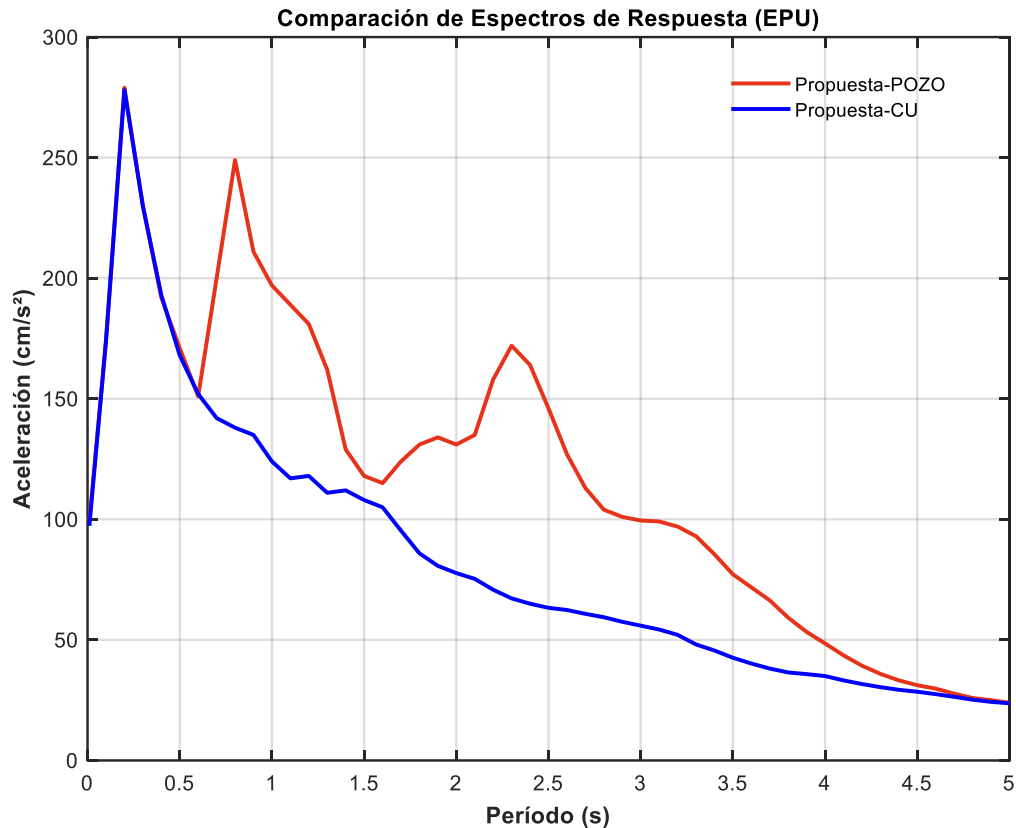


Figura 6.13 Espectros de Peligro Uniforme para sensores en roca/suelo firme.

El periodo fundamental en las zonas de lago y las curvas del SASID se encuentra en el rango de 1.5 a 2.0s mientras que el pico aparece en 1.4s para CL.

La Figura 6.14 muestra la comparación de los espectros de peligro para el sitio CCUT, contrastado con las propuestas de CL Y POZO con las versiones del SASID correspondientes a los años 2017 y 2023.

Se muestra una evidencia en la amplificación dentro de un mismo sitio a diferentes características geológicas. La propuesta CL tiene aceleraciones superiores a las de Pozo, ya que el medio arcilloso causa la amplificación en los periodos más largos.

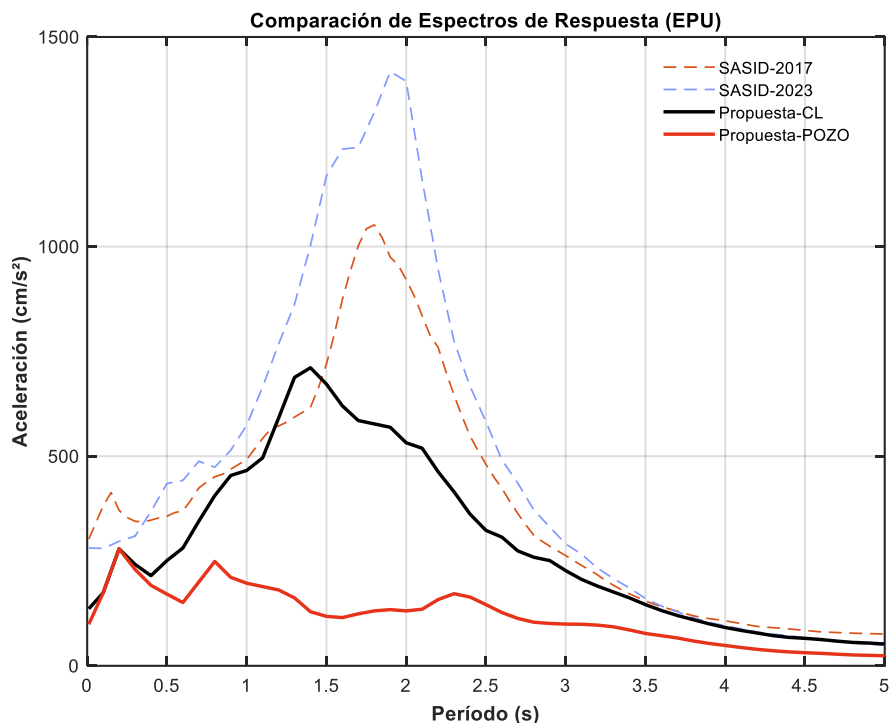


Figura 6.14 Espectros de Peligro Uniforme - CCUT. Las graficas muestra la comparación de los espectros de peligro para el sitio CCUT, comparando con los obtenidos directamente del SASID correspondientes a los años 2017 y 2023 con dos propuestas: Propuesta CL (Campo Libre) y Propuesta- Pozo (Sensor de Pozo a 45m).

Estas diferencias muestran el efecto de amplificación dentro de un mismo sitio a diferentes características geológicas. La propuesta CL tiene aceleraciones superiores a las registradas en Propuesta Pozo, marcando aceleraciones menores en periodos largos, ya que el medio blando es el que causa la amplificación.

El EPU propuesto en CCUT- CL resalta la principal diferencia entre la propuesta y la normativa en la zona de Lago. Las curvas del SASID (2017 y 2023) concentran la máxima amplificación en el rango de periodos intermedios ($T_s=1.5$ a $T_s=2.0s$), en cambio la línea negra solida se desplaza a $T_s=1.4$, lo cual se considera una afectación directa debido a la metodología de los coeficientes o a alguna implicación distinta en los cálculos del SASID, los niveles de aceleración son significativamente menores. Sin embargo, a pesar de que los valores de aceleración sean menores siguen la forma del primer pico igual que en el espectro del SASID (2027).

La metodología del SASID influye directamente en sus resultados al ser el promedio de diferentes estaciones ubicadas las zonas consideradas de ese tipo (es decir un enfoque ergódicos). Esta generalización, si bien simplifica la zona, no captura las particularidades del efecto de sitio no ergódicos que presenta una estación como CCUT-CL.

Es importante considerar la evolución de SASID y su estricta relación a las Normas Técnicas Complementarias (NTC) mexicanas. SASID, que ha tenido cambios de versiones pre-2017 a dos ediciones digitales (la más reciente de **2023** y una anterior para las normas **2017/2020**, la cual genera EPU con periodos de retorno fijos y utiliza parámetros como T_s para identificar la mayor ordenada espectral, aunque éstos no son directamente para espectros de diseño. Por otro lado, CRISIS tiene predeterminado un periodo de retorno y es más versátil al permitir la elección de los periodos espectrales que quieres emplear, así como la aceleración máxima y mínima en el intervalo de por ordenada espectral teniendo un mayor control sobre el resultado esperado. PRODISIS no da como tal un EPU, si no el periodo de retorno se puede mantener ya que

depende de la estructura ya que esta calibrado, igual que el SASID. Cada metodología influye en los resultados finales distintos ya que trabaja con diferentes bases de datos, sin embargo, son útiles y los resultados no divergen tanto unos de otros.

6.1.5 Diferencias entre subducción e intraplaca y su impacto en el peligro

El análisis de los registros y de las GMPE calibradas confirma que los sismos de subducción y los intraplaca contribuyen de manera distinta al peligro sísmico dependiendo del rango de periodos considerado. En CU, el peligro en periodos cortos está dominado principalmente por sismos intraplaca cercaos, caracterizados por sismos intraplaca cercanos, caracterizados por mayores valores de PGA a desfinancias menores. En cambio, en CCUT-Campo Libre los periodos largos del EPU están controlados por la combinación de sismos de subducción lejanos y la amplificación asociada a los suelos lacustres.

Esta diferencia por tipo de fuente y periodo estructural resalta la importancia de considerar modelos que capturen explícitamente los efectos de sitio y la no ergodicidad, especialmente en entornos urbanos con fuertes contrastes geotécnicos como la Ciudad de México.

6.1.6 Comparación entre superficie y profundidad en el CCUT

Se observa entre los espectros de CCUT-Pozo y CU, a pesar de encontrarse en ubicaciones geográficas distintas. Esta coincidencia confirma que el sensor ubicado a 45 m de profundidad en el CCUT registra una respuesta representativa de un estrato en roca, atenuando de manera significativa los efectos de amplificación característica de los depósitos lacustres superficiales.

En contraste, el EPU obtenido para CCUT-Campo Libre muestra amplificaciones marcadas en periodos largos ($T=2-3s$), con aceleraciones considerablemente mayores que las observadas en CU y CCUT-Pozo. Este resultado expone la relevancia de la estratigrafía y la profundidad del sensor en la evaluación del peligro sísmico, incluso dentro de un mismo sitio.

6.1.7 Espectros de Peligro Uniforme (EPU)

La figura 6.7 presenta la comparación de los EPU propuestos, resultado las diferencias que confirman la influencia del efecto de sitio.

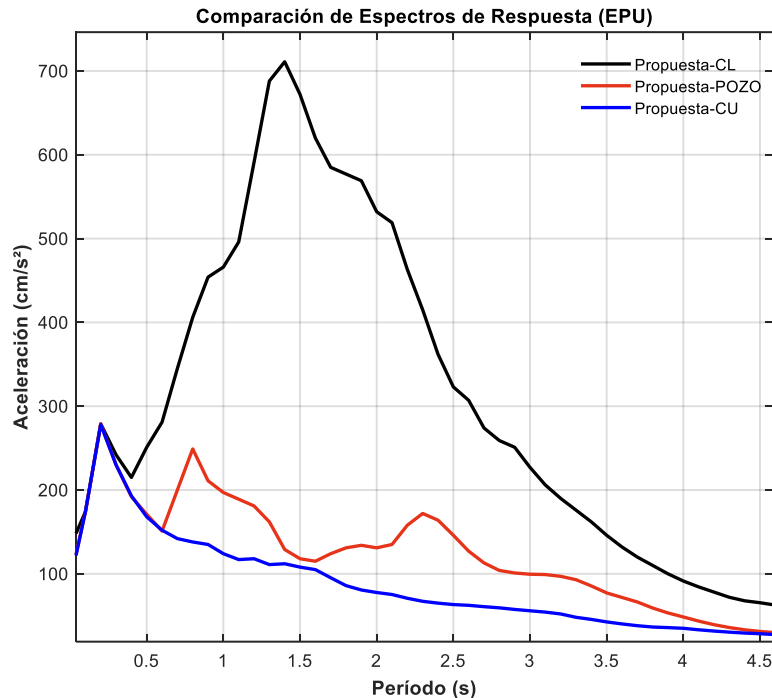


Figura 6.7 Espectros de Peligro Uniforme propuestos para los dos sitios: CU y CCUT: Campo Libre CL (estación en superficie) y Pozo (45m de profundidad). Los EPU representan la aceleración del terreno esperada con una probabilidad de excedencia uniforme en el tiempo para cada periodo. Se muestran los espectros para CL (NEGRO): Estación superficial en el CCUT Tlatelolco (Típica Zona de Lago, Suelo Blando). Propuesta -Pozo (Rojo): Estación a 45 m de profundidad en el CCUT Tlatelolco colocado en un estrato de Suelo firme/Roca. Propuesta CU (azul): Estación superficial en Ciudad Universitaria (Zona de Loma/Roca, suelo firme). La diferencia entre CL y Pozo en la misma ubicación ilustra claramente el efecto de amplificación del suelo blando superficial en periodos largos. CU y Pozo comparten el patrón de aceleraciones altas en periodos cortos, CU presenta aceleraciones más bajas de las tres gráficas, lo que establece una consistencia en los resultados.

La Figura 6.7 compara los espectros de Peligro Uniforme propuestos, evidenciando como las condiciones geológicas o efectos de sitio definen la respuesta dinámica del terreno. El EPU de Propuesta-CU (azul), ubicación en la Zona I o de Lomas (firmes o roca) el reglamento de construcción del D.F presenta los niveles de aceleración más bajos y un periodo dominante en el rango corto $T < 0.5s$, lo cual es característico de un sitio con una mínima amplificación de las ondas sísmicas. Por el contrario, la Zona II o Lacustre (Estación CCUT) favorece la amplificación de las ondas sísmicas. Se observa en el espectro CL (negro), que alcanza el pico de aceleración más alto 711 cm/s^2 en un periodo $T=1.4s$. El espectro de Pozo ubicado en el estrato duro a 45m de profundidad, muestra su pico en el rango corto y reduce la amplificación en periodos largos, demostrando que los efectos de sitio generan variaciones notables no solo entre diferentes ubicaciones (CU y CCUT) sino también a diferentes profundidades. En esencia, la forma de los EPU está condicionada por los periodos dominantes del terreno.

De acuerdo con Rosenblueth (véase Pozos *et al.*, 2014:33), los eventos locales afectan sólo una pequeña zona, y los eventos que impactarían cualquier ubicación de la Ciudad de México tienen períodos de retorno significativamente mayores a aquellos correspondientes a la región completa. Pozos *et al.*, 2014). Asimismo, los eventos continentales están asociados con períodos de retorno superiores a los 1,000 años.

Para la estación CU se observa en la figura 6.7 que para un periodo de vibración menor el cual es aproximadamente de 0.5 segundos, el peligro sísmico es dominado por sismos intraplaca y que los sismos interplaca dominan el peligro sísmico para periodos de vibración mayores que éste. Para la costa del Pacífico, el peligro sísmico es dominado por sismos interplaca, y por sismos intraplaca e interplaca para zonas alejadas de la costa (Pozos *et al.*, 2014).

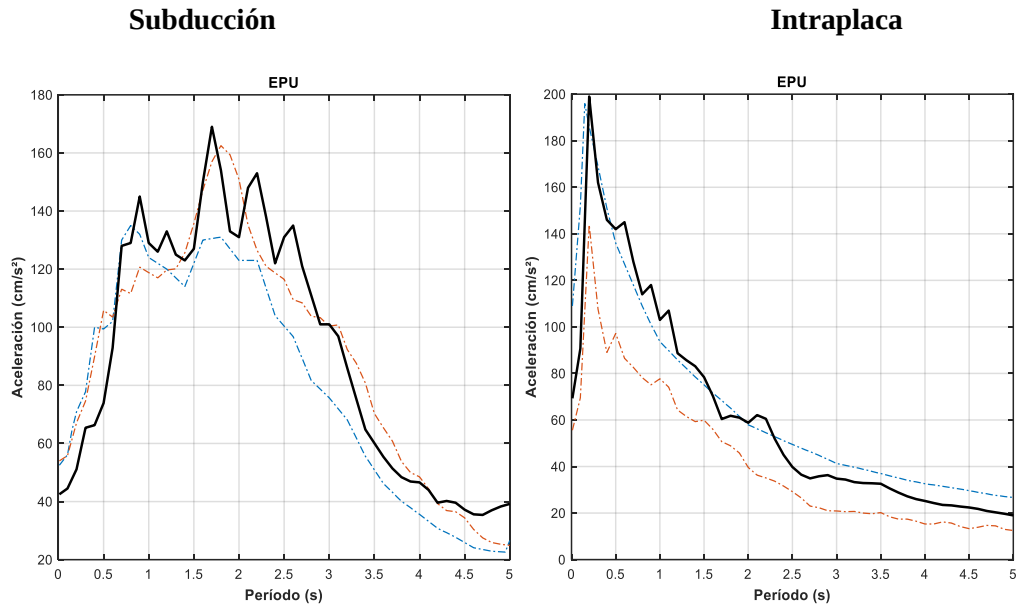


Figura 6.8 EPU Por fuente sísmica para CU. Las líneas azules son obtenidas con el SASID correspondientes al año 2017 y las naranjas al año 2023. Para el aporte intraplaca en CU es el dominante en los periodos cortos $T > 0.5s$ con aceleraciones de 200 para la línea negra sólida obtenidas con las GMPE cargadas en el software CRISIS: Cortical- Fourier genética, Locales Fourier Omega-2, Inslab -Jaimes 2015, Interfase- Jaimes 2005.

En la estación CU, los sismos intraplaca dominan el peligro para periodos de vibración cortos (aproximadamente 0.7 segundos), mientras que los sismos interplaca lo hacen para periodos más largos. Esta distinción es crucial para la zonificación sísmica tridimensional, donde las zonas de subducción se modelan como planos con variaciones en las probabilidades de magnitud e intensidad, y donde la distancia de referencia es clave. En el campo cercano, especialmente para la sismicidad local (distancias menores a 150-200 km, donde las zonas sismogénicas de subducción no son predominantes), se requiere un término integral que capture este efecto, ya que la mayoría de los datos disponibles corresponden a campo medio a cercano.

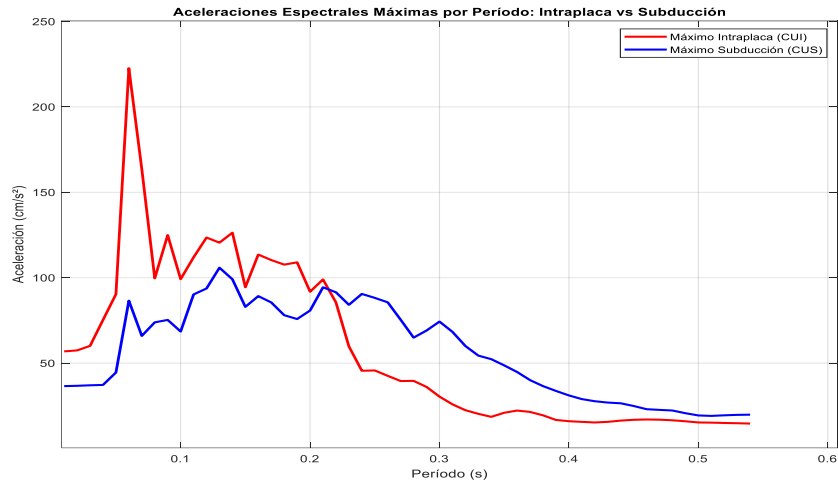


Figura 6.9 Aceleraciones máximas para CU. En Azul Subducción e Intraplaca en rojo.

Sin embargo, en la Figura 6.9 se aprecian las aceleraciones máximas, estas muestran que el primer pico aparece en el periodo 0.2 y corresponde a las fuentes cercanas como es de esperarse, con los intraplaca, aunque en el RMS el pico es de 166 cm/s^2 en el periodo 0.2 y que las aceleraciones más altas después de 1.7s son provenientes de los sismos de subducción.

En CCUT se puede apreciar la diferencia entre las aceleraciones registradas para los registros en Campo Libre y en un sensor de Pozo ubicado en un estrato firme, por lo que si influye en la obtención de una GMPE de manera ergódica a no ergódica.

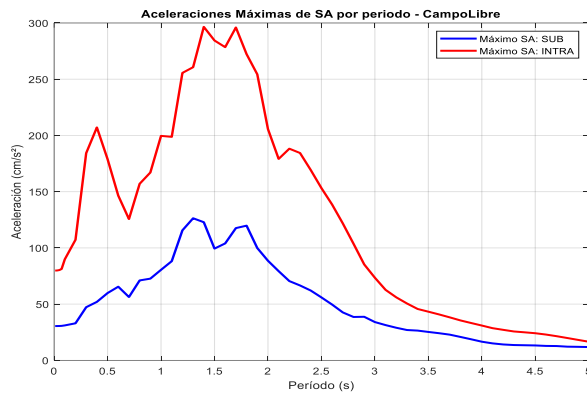


Figura 6.10 Aceleraciones máximas de cada periodo en Campo Libre - CCUT Tlatelolco. En los periodos de 4.0s en adelante parecería que los datos están incompletos porque no se ve una curva suavizada.

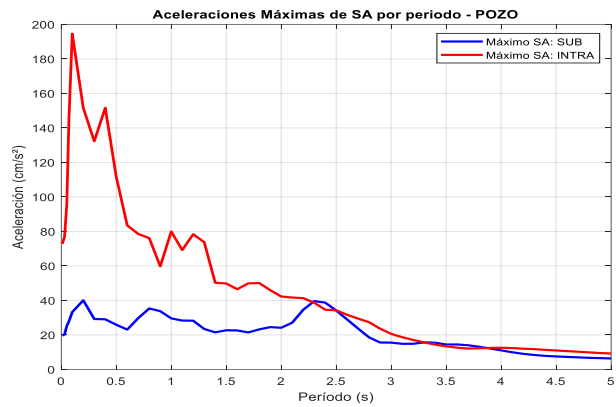


Figura 6.11 Aceleraciones máximas de cada periodo en Pozo - CCUT Tlatelolco.

7 CONCLUSIÓN

En este trabajo se obtuvieron los Espectros de Peligro Uniforme para las estaciones en CU y CCUT, mediante ecuaciones de predicción del movimiento no ergódicas desarrolladas de manera específica para cada sitio, cumpliendo con el objetivo general establecido.

Los resultados muestran que la incorporación de GMPE sitio. Específicas tiene un impacto significativo en la estimación del peligro sísmico probabilista, particularmente en entornos con condiciones geológicas contrastantes. En ese sentido, se observó que la estación CU presenta un comportamiento característico de suelo firme con máximo de aceleración concentrados en periodos cortos, mientras que CCUT-Pozo presenta una respuesta sísmica similar, confiando la influencia dominante del estrato competente a profundidad. Por lo contrario CCUT-CL muestra amplificaciones importantes en periodos largos, asociados a depósitos superficiales y los efectos de sitio.

La comparación entre los EPU obtenidos y aquellos correspondientes al sistema SASID evidenció que los modelos ergódicos empleados en la normativa pueden no capturar plenamente estas variaciones locales. Si bien dichos enfoques continúan siendo adecuados para el diseño general, los resultados resaltan la conveniencia de complementar la evaluación normativa con análisis sitio específicos en proyectos localizados en zonas de alta heterogeneidad geológica.

A pesar de las limitaciones relacionadas con la cantidad de los registros instrumentales y la heterogeneidad del catálogo sísmico, el análisis realizado demuestra que el uso de modelos no ergódicos permite una representación más realista del peligro sísmico local. En conjunto, este trabajo contribuye a una mejor comprensión del papel de los efectos de sitio y de la no ergodicidad en la Ciudad de México, y marca su relevancia en el análisis y diseño sismorresistente de la infraestructura urbana.

En particular, los resultados obtenidos muestran que la estimación del Espectro de Peligro Uniforme es sensible a la elección del modelo de predicción del movimiento del suelo, y que el uso de GMPE no ergódicas y sitio-específicas permite identificar diferencias locales que no siempre son capturadas por enfoques normativos promedio. De este modo, el trabajo aporta evidencia cuantitativa sobre la relevancia de los efectos de sitio y la no ergodicidad en la evaluación del peligro sísmico en la Ciudad de México, incluso a escala local.

En términos prácticos, los resultados obtenidos subrayan la relevancia de incorporar información instrumental local y modelos no ergódicos en la evaluación del peligro sísmico, particularmente en contextos urbanos con alta heterogeneidad geológica como la Ciudad de México. Si bien el objetivo de este trabajo no es sustituir los enfoques normativos vigentes, los resultados muestran que las GMPE-sitio específicas constituyen una herramienta complementaria valiosa para refinar las estimaciones de peligro en proyectos específicos, especialmente en zonas lacustres donde los efectos de sitio dominan la respuesta sísmica.

8 ANEXO

ELEMENTO FÍSICO	DESCRIPCIÓN
Magnitud (M)	Representa la cantidad de energía liberada por el sismo. Influye directamente en la intensidad del movimiento del suelo.
Distancia fuente-sitio (R)	Distancia desde el epicentro o la fuente de ruptura hasta el sitio de interés. Afecta la atenuación de las ondas sísmicas.
Tipo de fuente sísmica	Puede ser cortical, subducción interplaca o intraplaca. Cada una tiene características diferentes de radiación y energía.
Profundidad del hipocentro	Influye en la propagación de las ondas y en el área afectada por el sismo.
Condiciones del sitio	Propiedades geológicas locales como el tipo de suelo, que pueden amplificar o reducir las ondas sísmicas.

Tabla 8.1 Elementos físicos y su descripción

Elemento	Símbolo / Representación	Descripción
Evento objetivo	B	Evento cuya probabilidad se desea conocer. Ej.: que se exceda cierta aceleración sísmica en un sitio.
Eventos base (partición)	$A_1, A_2, \dots, A_n$	Conjunto de eventos mutuamente excluyentes y exhaustivos (cubren todas las posibilidades) que descomponen el espacio muestral.
Probabilidad condicional	$P(B A_i)$	Probabilidad del evento B dado que ocurrió A_i .
Probabilidad de los eventos base	$P(A_i)$	Probabilidad de ocurrencia de cada escenario A_i .
Fórmula del teorema	$P(B) = \sum P(B A_i) \cdot P(A_i)$	Probabilidad total del evento B como suma ponderada de probabilidades condicionales.

Tabla 8.2 Elementos Probabilísticos del teorema de probabilidad total.

CU - ROCA		
Tipo de Fuente	Periodos a considerar	Justificación
Intraplaca	$T \leq 0.5$	Dominan las respuestas en periodos cortos (altas frecuencias)
Subducción	$T \geq 1.0$	Dominan en periodos largos
CCUT - LAGO		
Tipo de Fuente	Periodos a considerar	Justificación
Intraplaca	Periodo dominante del suelo T entre 1.4 o 2.0s	Originalmente los sismos tienen contenido de alta frecuencia por lo que excitan el suelo blando pero su atenuación es rápida.
Subducción	T entre 1.0 y 3.0s	Coincide en el periodo fundamental de resonancia de un suelo blando dependiendo de la profundidad de la arcilla.

Tabla 8.3 Periodos relevantes a considerar según el tipo de fuente y sitio.

Cálculo de distancias epicentrales

Para determinar la distancia epicentral entre cada estación sismológica y el epicentro del sismo, se utilizó la fórmula de Haversine, utilizada en geodesia y geofísica.

Esta fórmula permite calcular la distancia a lo largo de un gran círculo sobre una esfera, considerando las coordenadas geográficas (latitud y longitud) de dos puntos.

Las coordenadas geográficas de las estaciones y del hipocentro fueron convertidas de grados a radianes para su uso en las funciones trigonométricas. Posteriormente, se calculó el valor de **a** utilizando la fórmula de Haversine, la cual representa el cuadrado del seno de la mitad de la distancia angular entre los dos puntos.

La fórmula de Haversine se expresa de la siguiente manera:

$$a = \sin^2(\Delta\phi/2) + \cos \phi_1 \cos \phi_2 \sin^2(\Delta\lambda/2) \quad 8.1$$

A partir de **a**, se obtuvo el ángulo central **c** mediante la función arco tangente de dos argumentos:

$$c = 2 * \operatorname{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad 8.2$$

Finalmente, se calculó la distancia epicentral **d** multiplicando el ángulo central por el radio de la Tierra (6371 km):

$$d = R * c \quad 8.3$$

Donde:

ϕ : Latitud en radianes, λ : Longitud en radianes, Δ : Diferencia entre dos valores

R: Radio medio de la Tierra (6371 km), a, c: Términos intermedios y d: Distancia epicentral en kilómetros.

Este procedimiento fue implementado en el software Matlab y los resultados se expresan en kilómetros. Aunque la fórmula de Haversine asume una Tierra perfectamente esférica, esta simplificación no introduce errores significativos para las distancias involucradas en este trabajo.

8.4 COEFICIENTES CIUDAD UNIVERSITARIA - SUBDUCCIÓN					
	alpha1	alpha2	alpha3	alpha4	stdv
PGA	-10.35525752	0.524132723	-0.008497643	4.097156902	0.3503
0.01	-11.08957614	0.5276488	-0.008915262	4.406476091	0.3497
0.03	-10.6208871	0.52010206	-0.008540225	4.192065555	0.3466
0.05	-8.880173951	0.474335929	-0.007069977	3.438382122	0.3402
0.07	-9.692975642	0.461984427	-0.007555877	3.869502277	0.3312
0.1	-9.933691576	0.492616231	-0.008183219	3.978277951	0.3445
0.2	-13.24111476	0.504761975	-0.011644597	5.773144399	0.3824
0.3	-14.86178361	0.515914903	-0.012492252	6.516629829	0.3726
0.4	-14.0056133	0.535224029	-0.011785057	6.029049944	0.3803
0.5	-14.9323149	0.544536156	-0.0121687	6.446649094	0.3781
0.6	-13.04879923	0.560790864	-0.0109362	5.486722417	0.3706
0.7	-14.44383393	0.570153998	-0.011415255	6.089014008	0.3668
0.8	-14.55817265	0.582613153	-0.011460885	6.112055961	0.3605
0.9	-15.20329831	0.584372024	-0.011704429	6.398868616	0.3618
1	-15.14473164	0.584032042	-0.01126874	6.30333831	0.3693
1.1	-14.82477763	0.58951286	-0.010891499	6.097283813	0.3694
1.2	-14.2481043	0.603099667	-0.010461474	5.770786127	0.3784
1.3	-14.31992095	0.599192604	-0.010318295	5.784269732	0.3848
1.4	-15.2603179	0.60081016	-0.01077631	6.215009814	0.397
1.5	-15.00054404	0.601092205	-0.01049339	6.069103334	0.4002
1.6	-15.83467506	0.600032638	-0.010831209	6.445070861	0.4081
1.7	-16.04740319	0.593490606	-0.010724878	6.523263038	0.417
1.8	-15.45251701	0.589605819	-0.010238411	6.219102329	0.4238
1.9	-14.70820111	0.592200583	-0.00982267	5.845749329	0.4318
2	-14.54433096	0.601693565	-0.009741515	5.728292447	0.4447
2.1	-15.15130701	0.608743824	-0.010046222	5.976124834	0.4584
2.2	-15.1908393	0.610250482	-0.009990901	5.963350063	0.47
2.3	-15.40052593	0.614603673	-0.010014186	6.024170624	0.4771
2.4	-16.15208836	0.622198077	-0.010354927	6.339068778	0.4787
2.5	-17.2218308	0.62921858	-0.010868222	6.806204821	0.4827
2.6	-18.18215593	0.636968788	-0.01131752	7.221014921	0.4871
2.7	-18.75378102	0.640998038	-0.011541883	7.460385706	0.4923
2.8	-19.46772652	0.645586307	-0.011840211	7.764501717	0.4982
2.9	-19.98455757	0.648737017	-0.012078033	7.985582994	0.5036

3	-20.17413902	0.652549941	-0.012100033	8.045865042	0.509
3.1	-20.00056937	0.657080116	-0.011998827	7.942198633	0.5179
3.2	-19.71155362	0.659117825	-0.011833707	7.789139988	0.5253
3.3	-19.54931064	0.658251186	-0.011718513	7.701017492	0.5304
3.4	-19.19852476	0.658781039	-0.011469945	7.517001378	0.5358
3.5	-18.97066645	0.658334073	-0.011298708	7.392741374	0.5413
3.6	-18.84340761	0.657790833	-0.011195902	7.317627792	0.5447
3.7	-18.59367373	0.658638359	-0.01101224	7.180519934	0.5492
3.8	-18.13419478	0.662267393	-0.010686854	6.935592018	0.5543
3.9	-17.73654131	0.665256397	-0.010417323	6.724863525	0.5605
4	-17.56932851	0.667482227	-0.010297629	6.627289596	0.5662
4.1	-17.09324622	0.668719994	-0.009959392	6.380646422	0.5722
4.2	-16.50353001	0.669488425	-0.009520529	6.077109946	0.5775
4.3	-16.03009281	0.670180926	-0.009149312	5.82989522	0.5817
4.4	-15.60602594	0.669904111	-0.008808291	5.60929874	0.583
4.5	-15.31255741	0.670108082	-0.008534651	5.448971256	0.5834
4.6	-15.08405808	0.671603436	-0.008308609	5.318042599	0.5839
4.7	-15.08484383	0.673737096	-0.008235008	5.297053153	0.584
4.8	-15.06273809	0.674796381	-0.008121669	5.264426157	0.5835
4.9	-15.10326627	0.675361772	-0.00804989	5.26332919	0.5834
5	-15.07874029	0.677101847	-0.007947274	5.228998481	0.5839

Tabla 8.4 Coeficientes correspondientes a Ciudad Universitaria para los eventos de subducción en todos los periodos utilizados para obtener los EPU.

8.4 COEFICIENTES CIUDAD UNIVERSITARIA - INTRAPLACA					
Ts	alpha1	alpha2	alpha3	alpha4	stdv
PGA	0.535036218	0.474400469	-0.003392986	-1.086769459	0.4582
0.01	0.53026151	0.475263353	-0.003439588	-1.119092703	0.4531
0.03	0.601158567	0.471348458	-0.00328078	-1.148230541	0.4495
0.05	1.353583416	0.438659787	-0.002115165	-1.466934462	0.4373
0.07	2.041250926	0.441343955	-0.001580979	-1.812707301	0.4409
0.1	1.275698838	0.432231935	-0.003171591	-1.281785565	0.4574
0.2	-1.157448304	0.441560279	-0.006228749	0.117352641	0.5229
0.3	-0.762237251	0.460602722	-0.005487653	-0.186329801	0.473
0.4	-0.359854035	0.525899627	-0.004972461	-0.599814767	0.461
0.5	-1.06996403	0.525478497	-0.005382282	-0.240950725	0.4717
0.6	-0.405998012	0.540879464	-0.004656836	-0.658673195	0.4662
0.7	-1.057723307	0.562282741	-0.004818203	-0.424279155	0.4552
0.8	-0.992337968	0.57594085	-0.004432558	-0.535956757	0.4274
0.9	-1.119432121	0.588794804	-0.00427871	-0.539996351	0.4331
1	-0.856309322	0.598791283	-0.003748793	-0.743570287	0.444
1.1	-0.373673834	0.619578522	-0.003022467	-1.096738429	0.4434
1.2	-0.427404116	0.642070355	-0.003065518	-1.15053155	0.4444
1.3	-0.647581288	0.649499717	-0.00322998	-1.075199379	0.4579
1.4	-0.538069101	0.653492093	-0.002923334	-1.16894354	0.4651
1.5	-0.103772158	0.658000755	-0.002342601	-1.430915216	0.4578
1.6	-0.607783024	0.658049616	-0.002728316	-1.183254644	0.4654
1.7	-1.348894819	0.667413981	-0.003349959	-0.840725417	0.4704
1.8	-1.519053372	0.681188437	-0.003416115	-0.817894518	0.476
1.9	-1.386647608	0.685914274	-0.003123561	-0.936152275	0.4743
2	-1.146756027	0.69873983	-0.002783383	-1.126584705	0.4793
2.1	-0.499109212	0.702227435	-0.002218443	-1.491671232	0.4896
2.2	0.305686305	0.689131528	-0.001659391	-1.877996263	0.4963
2.3	1.017071438	0.678556923	-0.001052946	-2.235402665	0.5014
2.4	1.461947231	0.680748378	-0.000574458	-2.497279811	0.5061
2.5	1.26635116	0.684442318	-0.000651832	-2.431642103	0.5054
2.6	0.925460974	0.691690898	-0.000743041	-2.304020469	0.5049
2.7	0.822461598	0.695542453	-0.000659936	-2.288092774	0.5067
2.8	0.555606331	0.698572964	-0.00072514	-2.184684096	0.509
2.9	0.445352575	0.694494067	-0.000777041	-2.131233318	0.5109
3	0.214900823	0.689593119	-0.001077068	-2.000640103	0.5102
3.1	0.275736494	0.690160471	-0.001021918	-2.042627309	0.5147
3.2	0.399542134	0.693630079	-0.000845105	-2.13103307	0.5201
3.3	0.550547801	0.697003506	-0.000657795	-2.232610384	0.5232

3.4	0.708088455	0.694097727	-0.000538017	-2.315866707	0.5205
3.5	0.855207721	0.690019725	-0.000410857	-2.391389679	0.5172
3.6	0.932467293	0.686753307	-0.000314033	-2.436039375	0.5191
3.7	1.097460766	0.683768741	-0.000133149	-2.52794328	0.5235
3.8	1.256812656	0.686612738	3.82843E-05	-2.632380021	0.5269
3.9	1.314782408	0.694612189	0.000165574	-2.699491093	0.5285
4	1.437628975	0.698268862	0.000306162	-2.783290304	0.528
4.1	1.542069606	0.699636665	0.000457243	-2.853714635	0.5274
4.2	1.603394987	0.704602526	0.000596885	-2.912643807	0.5256
4.3	1.721088993	0.708341425	0.000761528	-2.994814118	0.5219
4.4	1.691001212	0.709567987	0.000797482	-2.993120544	0.5177
4.5	1.774908077	0.71119809	0.000897807	-3.049338517	0.5149
4.6	1.910958676	0.713329964	0.001069814	-3.138191583	0.513
4.7	2.06646445	0.711132394	0.001238768	-3.223066925	0.5124
4.8	2.07934307	0.710621607	0.001249531	-3.235005943	0.5142
4.9	2.15536042	0.711865234	0.001317182	-3.284697216	0.5172
5	2.224890404	0.713661855	0.001369572	-3.331545042	0.5217

Tabla 8.5 Coeficientes correspondientes a Ciudad Universitaria para los eventos de intraplaca en todos los periodos utilizados para obtener los EPU.

8.6 COEFICIENTES CCUT EN POZO - SUBDUCCIÓN					
Ts	alpha1	alpha2	alpha3	alpha4	stdv
PGA	-3.045898703	0.72347056	-0.002217082	-0.155853264	0.2849
0.01	-3.581588016	0.717776055	-0.00233913	0.044452644	0.2751
0.03	-3.562780964	0.696212914	-0.002256804	0.078821855	0.2873
0.05	-4.362339391	0.619409999	-0.002180818	0.584166361	0.2949
0.07	-4.099457826	0.591849548	-0.00194281	0.518258591	0.2864
0.1	-3.300439379	0.641460944	-0.001780682	0.06713395	0.2904
0.2	1.374744634	0.710886956	-0.001032754	-1.989807808	0.2769
0.3	1.542955548	0.680636903	-0.001238725	-1.918529996	0.2587
0.4	-2.123361252	0.666875053	-0.00267041	-0.240246877	0.2637
0.5	-2.171842051	0.690614022	-0.002736592	-0.26420775	0.2643
0.6	-3.664640666	0.727192768	-0.002834914	0.219389475	0.2606
0.7	-6.296129886	0.761750855	-0.004067088	1.403170982	0.271
0.8	-6.782242772	0.788722898	-0.004268421	1.576041983	0.2681
0.9	-6.792184443	0.787158351	-0.004055445	1.534967843	0.2694
1	-7.883584372	0.794889581	-0.004327455	1.967835345	0.2697
1.1	-7.926002626	0.802316997	-0.004191275	1.935265598	0.2683
1.2	-7.96647793	0.818751364	-0.00405733	1.873748699	0.2615
1.3	-6.955647641	0.815954827	-0.003506302	1.386057354	0.2597
1.4	-6.796600519	0.814972463	-0.003268726	1.259663276	0.2594
1.5	-7.001981844	0.821627879	-0.003147128	1.285651316	0.2526
1.6	-7.524922835	0.828507493	-0.003212094	1.477472529	0.2438
1.7	-8.63923082	0.843427312	-0.003513432	1.929235704	0.2462
1.8	-9.792249012	0.853374493	-0.00389208	2.416294216	0.2459
1.9	-9.483631589	0.859151414	-0.003717135	2.258397268	0.2464
2	-9.504495239	0.865159721	-0.00361895	2.229898189	0.2487
2.1	-9.975294322	0.880399163	-0.003727174	2.386551208	0.2481
2.2	-9.61748751	0.906414411	-0.003562711	2.161405375	0.2541
2.3	-9.739605003	0.920304018	-0.003649041	2.184590378	0.2614
2.4	-9.205241514	0.925789892	-0.003380692	1.912008874	0.2651
2.5	-9.520356799	0.930406303	-0.003378549	2.006444465	0.267
2.6	-9.824636236	0.930751247	-0.003404224	2.108424181	0.2646
2.7	-10.17737721	0.928618872	-0.00348637	2.242934522	0.2633
2.8	-10.307184	0.927869394	-0.003464784	2.274327048	0.2638
2.9	-10.16952685	0.932753764	-0.003353149	2.179637499	0.2675
3	-10.28708106	0.942902415	-0.00334609	2.189797659	0.2688
3.1	-10.57570323	0.954477795	-0.003430171	2.278181669	0.2714
3.2	-10.82397226	0.9606192	-0.003476164	2.357977881	0.2735
3.3	-11.08804584	0.962077398	-0.003537308	2.456013403	0.2755

3.4	-11.30543073	0.960474132	-0.003578652	2.540330821	0.2765
3.5	-11.47276363	0.957326256	-0.003610155	2.606896036	0.2754
3.6	-11.59885981	0.956443334	-0.003617615	2.649413095	0.2766
3.7	-11.9007928	0.953685492	-0.003700715	2.774536084	0.278
3.8	-12.28157491	0.946261643	-0.003811691	2.94223983	0.2772
3.9	-12.42586545	0.938237834	-0.003827768	3.00473758	0.2757
4	-12.41652267	0.931014422	-0.00377397	2.997112029	0.2743
4.1	-12.35822094	0.924413424	-0.003709515	2.96855512	0.2743
4.2	-12.37127552	0.919875852	-0.003673471	2.968097061	0.2752
4.3	-12.13285158	0.916084175	-0.003554009	2.856487	0.2769
4.4	-12.01042452	0.909755778	-0.003473581	2.800973669	0.2797
4.5	-12.02963744	0.904910261	-0.003450104	2.806407151	0.2822
4.6	-12.1688316	0.902682281	-0.003488513	2.86310061	0.2858
4.7	-12.42198283	0.898421526	-0.003588303	2.977700878	0.289
4.8	-12.81756965	0.894387855	-0.003753772	3.158043467	0.2901
4.9	-13.174669	0.893798416	-0.003911762	3.315969085	0.2911
5	-13.33914964	0.89017246	-0.00398122	3.39175201	0.2911

Tabla 8.6 Coeficientes correspondientes al CCUT- Pozo para los eventos de subducción en todos los periodos utilizados para obtener los EPU

8.7 COEFICIENTES CCUT EN POZO - INTRAPLACA					
Ts	alpha1	alpha2	alpha3	alpha4	stdv
0.001	2.65288972	0.599290976	0.001170561	-2.69446625	0.3467
0.01	2.457164107	0.576171445	0.001058822	-2.585186434	0.3347
0.03	3.557801908	0.569853637	0.001757339	-3.097616631	0.3395
0.05	4.06281719	0.520047818	0.002202426	-3.197890497	0.344
0.07	6.085092702	0.48023537	0.003246411	-4.047213103	0.3471
0.1	5.510249688	0.484758067	0.002836587	-3.786602976	0.3342
0.2	5.054460848	0.508433128	0.001666624	-3.484603961	0.3199
0.3	1.51893139	0.541747315	-0.000237896	-1.82873801	0.3025
0.4	0.277315274	0.610566944	-0.000684421	-1.4084226	0.3411
0.5	-0.413338508	0.591363315	-0.000921146	-1.062301136	0.3355
0.6	-2.29173594	0.631549227	-0.001648058	-0.330844319	0.3309
0.7	-5.075418824	0.662558079	-0.002870658	0.912244499	0.3458
0.8	-5.457863745	0.648349481	-0.003061788	1.128830478	0.3485
0.9	-6.100801836	0.691518502	-0.00312039	1.28981207	0.3242
1	-7.684861256	0.7152471	-0.003852549	1.960322082	0.3129
1.1	-5.55651551	0.653717475	-0.00268916	1.054983846	0.3131
1.2	-4.671804346	0.640921517	-0.002174291	0.633395809	0.3056
1.3	-3.859436298	0.621442006	-0.001730328	0.265897583	0.3068
1.4	-4.374476517	0.634110489	-0.001831177	0.424409934	0.3081
1.5	-4.185378368	0.635112468	-0.001613997	0.295203126	0.308
1.6	-4.140101945	0.635197706	-0.001352027	0.226633176	0.315
1.7	-4.969343356	0.654241527	-0.001672342	0.563909281	0.3322
1.8	-4.481781917	0.634898225	-0.001346784	0.367406675	0.3326
1.9	-4.885396174	0.631811922	-0.001561138	0.56080427	0.3297
2	-6.118394629	0.650155241	-0.002171942	1.100254126	0.3299
2.1	-6.314802165	0.659920885	-0.002226029	1.153978188	0.3328
2.2	-6.683845033	0.679542624	-0.002297272	1.255116553	0.3344
2.3	-6.460301691	0.699835813	-0.00219329	1.096256178	0.327
2.4	-6.689938836	0.722687834	-0.002336954	1.14541861	0.3142
2.5	-6.059601177	0.703304591	-0.002000556	0.87456698	0.3151
2.6	-5.342142184	0.69876174	-0.001507639	0.512045675	0.3304
2.7	-4.998788463	0.711966986	-0.001215479	0.284827091	0.3368
2.8	-4.762870229	0.718039196	-0.000983944	0.127117876	0.3272
2.9	-4.437264185	0.719860005	-0.00072315	-0.059190678	0.3215
3	-4.387911699	0.726243738	-0.000648585	-0.113559292	0.319
3.1	-4.884769266	0.744460947	-0.000906824	0.070897033	0.3167
3.2	-5.314882396	0.75535004	-0.001155912	0.240772028	0.3152
3.3	-5.32405209	0.7479812	-0.00117565	0.252016786	0.3217

3.4	-5.848757763	0.751405007	-0.001466129	0.485577765	0.3301
3.5	-5.897520708	0.754688374	-0.001504191	0.494690854	0.3349
3.6	-5.589744836	0.744459615	-0.001343321	0.361782991	0.3373
3.7	-5.13213726	0.733846459	-0.001059783	0.153264241	0.339
3.8	-4.736628036	0.721892349	-0.000811753	-0.02325988	0.3373
3.9	-4.060676583	0.712294901	-0.000439919	-0.333479516	0.3382
4	-3.125165747	0.699560473	6.16975E-05	-0.760586321	0.3384
4.1	-2.467536928	0.686584993	0.000402495	-1.052482912	0.3362
4.2	-2.161517446	0.677834404	0.000562891	-1.186273584	0.3322
4.3	-1.946956663	0.674365059	0.000664503	-1.286757719	0.3286
4.4	-1.759585967	0.674496964	0.000763167	-1.383593417	0.3274
4.5	-1.629015363	0.674077147	0.000831133	-1.451127305	0.3282
4.6	-1.250015614	0.661865485	0.001003905	-1.607768967	0.3293
4.7	-1.135984752	0.646741369	0.00102354	-1.630799916	0.3301
4.8	-1.134153426	0.634086962	0.000989999	-1.607400727	0.33
4.9	-1.257489864	0.625108378	0.00091194	-1.537346546	0.3285
5	-1.363028443	0.61500045	0.000851646	-1.475268703	0.3271

Tabla 8.7 Coeficientes correspondientes al CCUT- Pozo para los eventos de intraplaca en todos los periodos utilizados para obtener los EP.

8.8 COEFICIENTES CCUT EN CAMPO LIBRE - SUBDUCCIÓN					
Ts	alpha1	alpha2	alpha3	alpha4	stdv
PGA	-4.620749053	0.68295085	-0.003553483	0.864023325	0.2496
0.01	-3.780131249	0.695148248	-0.003195264	0.429091507	0.2455
0.03	-3.957607514	0.690201848	-0.00324048	0.517688082	0.2442
0.05	-5.268723507	0.651250824	-0.003564422	1.178666487	0.2346
0.07	-5.431199058	0.55729582	-0.003147083	1.426346092	0.229
0.1	-3.761047648	0.545570796	-0.002238449	0.673915823	0.2379
0.2	-3.261241444	0.646703958	-0.003183954	0.373064232	0.2394
0.3	-2.40069613	0.643492938	-0.003479769	0.139116283	0.2498
0.4	-2.103433202	0.627959043	-0.003536754	0.078267799	0.2663
0.5	-1.866260646	0.660803962	-0.003447577	-0.092995034	0.2786
0.6	-1.977120143	0.700347451	-0.003304487	-0.162288775	0.27
0.7	-2.747874879	0.738338613	-0.003539231	0.096744933	0.2682
0.8	-3.602177999	0.762875776	-0.003835253	0.422164076	0.2707
0.9	-3.60981155	0.778765788	-0.003656744	0.371176124	0.2649
1	-5.343315236	0.78510272	-0.004088759	1.103779973	0.2722
1.1	-6.424071382	0.784114818	-0.004481805	1.600890913	0.2776
1.2	-6.76892728	0.801846408	-0.004549162	1.725715099	0.2843
1.3	-6.261078232	0.817715183	-0.004282822	1.461492729	0.2852
1.4	-6.050421873	0.833428692	-0.003888505	1.283619	0.2793
1.5	-6.725530626	0.838424927	-0.00396846	1.539926127	0.2735
1.6	-6.631013192	0.830468818	-0.003907626	1.504963899	0.2711
1.7	-6.620572094	0.824998244	-0.003842715	1.49622412	0.2757
1.8	-6.037592298	0.821675892	-0.003612321	1.243437333	0.2745
1.9	-5.135166032	0.824230015	-0.003122823	0.808630179	0.2733
2	-4.664835743	0.831581769	-0.002892585	0.552409632	0.273
2.1	-4.954603618	0.849629689	-0.00304565	0.624136462	0.2757
2.2	-4.642111628	0.859591193	-0.002867093	0.430278013	0.2718
2.3	-4.955998017	0.869200021	-0.00296688	0.520004904	0.269
2.4	-4.955583194	0.87368794	-0.002920759	0.476992387	0.2641
2.5	-5.078223715	0.875570247	-0.002907123	0.493366538	0.2609
2.6	-5.390911949	0.884995711	-0.003018506	0.589195121	0.2609
2.7	-5.761975817	0.890885728	-0.003198951	0.72609322	0.261
2.8	-6.147859136	0.901555067	-0.003424154	0.866222542	0.2618
2.9	-6.45794521	0.914560429	-0.003538205	0.957181154	0.2622
3	-6.471963022	0.917719165	-0.003482716	0.929067202	0.2638
3.1	-6.083182881	0.918733085	-0.003179588	0.714714322	0.2628
3.2	-5.834558886	0.92012521	-0.002973895	0.569270767	0.2594
3.3	-5.74102749	0.919697245	-0.002872195	0.504740846	0.2591

3.4	-5.814077157	0.917159922	-0.002858666	0.522550176	0.26
3.5	-6.120448281	0.914907238	-0.002989937	0.651897176	0.2615
3.6	-6.397221703	0.914347057	-0.003091451	0.762258161	0.2618
3.7	-6.562817287	0.914030178	-0.003110802	0.817632829	0.2609
3.8	-6.443569828	0.913095095	-0.002968243	0.739413687	0.2614
3.9	-6.292928944	0.911653713	-0.002809191	0.647454499	0.2626
4	-6.246100167	0.908849724	-0.002714531	0.608281766	0.2643
4.1	-6.204508289	0.906694037	-0.002663165	0.577045672	0.264
4.2	-6.278570986	0.903720316	-0.002677427	0.603206999	0.2646
4.3	-6.222842144	0.899239521	-0.002597783	0.568720879	0.2649
4.4	-6.514826872	0.898341291	-0.002718952	0.691799182	0.2649
4.5	-6.721784802	0.900046162	-0.002817454	0.773635794	0.2668
4.6	-6.948168145	0.901672488	-0.002919674	0.864034078	0.2677
4.7	-6.955812143	0.901383554	-0.002889885	0.854541078	0.2685
4.8	-7.024160208	0.901178348	-0.002886067	0.873143676	0.2685
4.9	-7.330210973	0.90304879	-0.003024989	1.00127332	0.2685
5	-7.395367716	0.902975889	-0.003059839	1.024220234	0.2686

Tabla 8.8 Coeficientes correspondientes al CCUT- CL para los eventos de subducción en todos los periodos utilizados para obtener los EPU.

8.9 Coeficientes CCUT en Campo Libre - Intraplaca					
Ts	alpha1	alpha2	alpha3	alpha4	stdv
PGA	-4.086691014	0.455928048	-0.004546589	1.128449008	0.2944
0.01	-2.718677209	0.482455565	-0.003359977	0.339784933	0.311
0.03	-2.818151849	0.478851624	-0.00343615	0.399831106	0.3081
0.05	-2.597129654	0.457677177	-0.002940549	0.320746324	0.2798
0.07	-0.013207895	0.412734618	-0.000241882	-0.908919458	0.2488
0.1	0.497312065	0.40360024	-0.000154606	-1.089912312	0.2697
0.2	-2.176121066	0.39621307	-0.004322398	0.485526165	0.3097
0.3	-4.474522297	0.447058133	-0.006607914	1.628927252	0.3288
0.4	-2.02042115	0.462560167	-0.004303078	0.337723178	0.3401
0.5	-2.535836687	0.448523129	-0.004354772	0.590674136	0.3427
0.6	-4.595349707	0.505036942	-0.00523711	1.399023741	0.3543
0.7	-6.817591779	0.48237018	-0.0070067	2.571144603	0.3363
0.8	-4.623346425	0.550841727	-0.00475646	1.24700482	0.3114
0.9	-4.770277015	0.562360794	-0.004751243	1.283555859	0.2963
1	-5.712431925	0.579789259	-0.004678786	1.629340398	0.2839
1.1	-2.68190169	0.581751221	-0.001900073	0.067488568	0.2818
1.2	-2.816633101	0.612145183	-0.001647843	0.043571564	0.3022
1.3	-3.9346636	0.630973386	-0.002390305	0.552999785	0.3076
1.4	-4.900458881	0.652199804	-0.00308677	0.98641014	0.3058
1.5	-2.777946558	0.646243813	-0.001151673	-0.100987613	0.3082
1.6	-1.951836731	0.640271133	-0.000301603	-0.534422688	0.3038
1.7	-1.527428794	0.647073538	0.000210044	-0.795018489	0.3047
1.8	-0.451172216	0.648369726	0.001036	-1.336664444	0.2878
1.9	0.350768826	0.650186801	0.001902393	-1.776434689	0.2913
2	-1.159325764	0.669774206	0.000682019	-1.078313459	0.2972
2.1	0.198983676	0.676661753	0.001777033	-1.809896254	0.2984
2.2	2.085923604	0.693248391	0.003546029	-2.856459858	0.297
2.3	2.693423856	0.702589935	0.004207641	-3.231428657	0.2934
2.4	2.5588112	0.703242378	0.004140913	-3.197534387	0.2911
2.5	1.496112233	0.700434002	0.003357948	-2.687835524	0.2895
2.6	0.691473125	0.700165358	0.002794947	-2.31260804	0.2886
2.7	1.032662786	0.695414939	0.003096413	-2.501278633	0.2901
2.8	1.972838071	0.70257406	0.003987946	-3.032843592	0.2913
2.9	1.978050116	0.710431993	0.004172916	-3.097269134	0.2951
3	2.139744971	0.711442215	0.004464387	-3.219710115	0.297
3.1	1.887754888	0.703685208	0.004330801	-3.104064841	0.3043
3.2	1.436795241	0.708825472	0.004014124	-2.912273729	0.3045
3.3	1.055161915	0.718848979	0.003675038	-2.755498609	0.3069

3.4	0.674174933	0.723815078	0.003394162	-2.591622795	0.3053
3.5	0.57739565	0.723667239	0.003362359	-2.561922962	0.3038
3.6	0.529551336	0.723626938	0.003365036	-2.55730172	0.3037
3.7	0.27556622	0.727018086	0.003235184	-2.459877284	0.3042
3.8	0.065189759	0.729371332	0.003138993	-2.380292451	0.3071
3.9	0.308894567	0.731534371	0.00342138	-2.530702123	0.3141
4	1.102234579	0.730991332	0.004145904	-2.95158375	0.3203
4.1	1.228897701	0.722045627	0.004172587	-2.996816585	0.3198
4.2	1.239783575	0.707640372	0.004101765	-2.970290234	0.316
4.3	1.093220803	0.698746202	0.003947344	-2.882000478	0.3148
4.4	0.948460644	0.693702018	0.003854544	-2.810643591	0.3144
4.5	1.306275096	0.692908918	0.004224485	-3.008808412	0.316
4.6	1.411127424	0.688754253	0.004295734	-3.059878823	0.3167
4.7	1.91801419	0.68254713	0.004754927	-3.31613965	0.3149
4.8	2.195420267	0.674747439	0.0049633	-3.446478882	0.3126
4.9	2.284253566	0.672523786	0.005008655	-3.492251042	0.3097
5	2.005039078	0.671790037	0.004783783	-3.359401933	0.3089

Tabla 8.9 Coeficientes correspondientes al CCUT- Pozo para los eventos de intraplaca en todos los periodos utilizados para obtener los EPU.

Análisis de Sesgo (Desviación Promedio) por Rangos			
POZO SUBDUCCIÓN			
Rango M	N	Sesgo promedio	Desviación estándar:
3.0 - 5.0	4	0.076	0.096
5.0 - 7.0	76	0.096	0.167
7.0- 8.5	4	0.033	0.033
POZO INTRAPLACA			
Rango M	N	Sesgo promedio	Desviación estándar:
5.0 - 7.0	7	0.085	0.161
CU SUBDUCCIÓN			
Rango M	N	Sesgo promedio	Desviación estándar:
3.0 - 5.0	1	-0.516	0.000
5.0 - 7.0	79	0.157	0.307
7.0- 8.5	23	0.018	0.223
CU INTRAPLACA			
Rango M	N	Sesgo promedio	Desviación estándar:
5.0 - 7.0	39	0.160	0.394
7.0- 8.5	5	0.021	0.195
CL SUBDUCCIÓN			
Rango M	N	Sesgo promedio	Desviación estándar:
3.0 - 5.0	9	0.107	0.084
5.0 - 7.0	90	0.285	0.147
7.0- 8.5	3	0.171	0.050
CL INTRAPLACA			
3.0 - 5.0	2	0.017	0.095
5.0 - 7.0	37	0.232	0.143
7.0- 8.5	1	0.205	0.000

Tabla 8.10 Análisis de Sesgo (Desviación Promedio) por Rangos

9 BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamson, N. A., Silva, W. J., & Kamai, R. (2014). Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1025–1055.
- AcademiaLab (2025). “Aceleración máxima del suelo”. Revisado el 26 de mayo del 2025. Disponible en <https://academia-lab.com/enciclopedia/aceleracion-maxima-del-suelo/>
- Ariza, J. J. S. (2009). *Estudio geofísico en el sector centro-occidental del cinturón volcánico transmexicano: graben de Chapala*. Disertación doctoral, Instituto Politécnico Nacional. Disponible en https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=es&user=b-hIHA4AAAAJ&citation_for_view=b-hIHA4AAAAJ:u5HHmVD_uO8C
- Arroyo, D., Ordaz, M., & Rueda, R (2014). On the Selection of Ground-Motion Prediction Equations for Probabilistic Seismic-Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*.
- Bautista, Luis. (2021). *Regresión lineal bajo el enfoque Bayesiano*. RPubS. Recuperado de <https://rpubs.com/lbautista/regresionbayesiana>
- Baker, Jack W. (2013). Introduction To Probabilistic Seismic Hazard Analysis. *White Paper Version 2.0*, 79 pp. Disponible en https://scits.stanford.edu/sites/g/files/sbiybj22081/files/media/file/baker_2013_intro_psha_v2_0.pdf
- Boore, D. M. & Atkinson, G. M. (2008). Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01s and 10.0s. *Earthquake Spectra*, 24(1), 99-138. Doi: 10.1193/1.2830434
- Boore, D. M., Joyner, W. B., & Fumal, T. E. (1997). “Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: a summary of recent work”, *Seismological Research Letters*, 68(1), pp. 128-153. Disponible en <https://pubs.usgs.gov/publication/70020212>
https://www.daveboore.com/pubs_online/boore_et_al_srl_1997_with_erratum.pdf
- Buckreis, T. E., & Stewart, J. P. (eds.). (2025). GIRS-2025-07: Data Resources for NGA_West3 Project. B. John Garrick Institute for the Risk Sciences, UCLA. <https://doi.org/10.34948/N3D30R>
- California Institute of Technology, 2009. El inusual caso de la zona de subducción mexicana. Tectonics Observatory. Disponible en www.tectonics.caltech.edu/outreach/highlights/
- Cárdenas Briceño, C. M., Garzón Prado, Y. D., Santa Guzmán, L. F., y Castillo Méndez, L. E. (2010). Modelo de Poisson para la ocurrencia y magnitud espacio -temporal de los sismos en Colombia. *UD y la Geomática*, (4), pp. 28–43. Disponible en <https://doi.org/10.14483/23448407.3655>
- Cárdenas Briceño, Christian Michael; Garzón Prado, Yineth Daniela; Santa Guzmán, Luis Fernando; Castillo Méndez, Luis Eduardo. (2010). Modelo de Poisson para la ocurrencia y magnitud espacio-temporal de los sismos en Colombia. *UD y la Geomática*. 24 de octubre, pp. 28-43.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED. (2021). *Identificación de peligro sísmico a nivel municipal que permita contar con información básica para el desarrollo posterior de atlas municipales en todo el país. Informe de características de la CFE 2015*. CENAPRED-CNCP-SEGURIDAD. Disponible en

https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2021/1er_Trimestre/FRACCION_XLI/R/S/210420_Informe_RS_CaracteristicasCFE2015.pdf

- Chiou, B. S. J. & Youngs, R. R. (2014). Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra. *Earthquake Spectra*, 30(3), 1117–1153. DOI: 10.1193/072813eqs219m
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Pearson. <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/dynamics-of-structures-theory-and-applications-to-earthquake-engineering/P200000003487/9780134555126>
- CICESE, Departamento de Sismología del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada [en línea]. Disponible en: <https://resnom.cicese.mx/sitio/preguntas>
- Consejería Jurídica y de Servicios Legales de la Ciudad de México. (n.d.). Norma técnica complementaria sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*. Recuperado de https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf
- Cotton, F., Frank, S., Julian, B. y Hilmar, B. (2006). Criteria for selecting and adjusting ground-motion models for specific target regions: Application to Central Europe and rock sites, *Journal Seismology*, 10(2), 9 de mayo de 2006, pp. 137–156. DOI: [10.1007/s10950-005-9006-7](https://doi.org/10.1007/s10950-005-9006-7)
- Cruz López, Manuel. (2007). *Determinación experimental de los efectos de las interacciones suelo-estructura en dos edificios localizados en la Ciudad de México*. Tesis de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, UNAM. Disponible en <https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000618265/3/0618265.pdf>
- Delgado Granados, Hugo; Molinero, Ricardo; Nieto Obregón, Jorge; Lozano-Santacruz, Rufino; González, Héctor; Silva-Romo, Gilberto; Cervantes, Pablo & Mendoza-Rosales, Claudia. (1998). Geology of Xitle volcano in southern Mexico City - A 2000-year-old monogenetic volcano in an urban area. *Revista Mexicana De Ciencias Geológicas*, ISSN 1026-8774, Vol. 15, Núm.. 2, 1998. 15.
- Dirección General de Comunicación Social, UNAM. (2022). “Impulsan conservación del geopatrimonio de la UNAM a través de geosenderos”, *Boletín UNAM-DGCS-872*, 23 de octubre, 2022. https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2022_872.html
- Douglas, John. (2011). *Ground-motion prediction equations 1964–2010*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER, núm. 102, abril de 2011, PEER-BRGM, en https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/webpeer-2011-102-john_douglas_published_jointly_by_brgm.pdf
- Earth Quake Solutions. *Palm Spring Earthquake*. Disponible en <https://quakemanager.eqsols.com/index.htm?context=300>
- Encino de la Vega, S. (1979). Las lavas del pedregal de San Ángel, *Ciencia y Desarrollo*, núm. 25, pp. 89-93.
- Esteva, L., & Rosenblueth, E. (1964). Espectros de temblores a distancias moderadas y grandes. *Boletín Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, (2), 1–18.

- Esteva, Leopoldo. (1970). *Regionalización Sísmica de México para fines de ingeniería*. Instituto de Ingeniería, UNAM, Núm. 246., 229 - 246. Disponible en <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/ConsultasSPII/DetallePublicacion.aspx?id=152>
- Esquivel-Salas, Luis & Díaz, Víctor. (2016). Metodología propuesta para ejecutar y procesar mediciones de vibraciones ambientales utilizando acelerógrafos triaxiales en edificios de concreto reforzado de menos de 100m de altura. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, (21), 61-77.
- Field, Edward H. (n.d.). “Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA): A Primer”, Disponible en https://opensha.org/resources/PSHA_Primer_v2_0.pdf
- Fukushima Y. & T. Tanaka (1990). A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80, 757-783. Disponible en: <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/80/4/757/102395/A-new-attenuation-relation-for-peak-horizontal?redirectedFrom=fulltext>
- García, D., Singh, S. K., Herráiz, M., Ordaz, M., & Pacheco, J. F. (2005). Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 95(6), 2272–2282.
- García-Acosta, V. (2004). Historical earthquakes in Mexico: Past efforts and new multidisciplinary achievements. *Ann. Geophys.* 47, 487–496
- García Jiménez, Daniel. (2001). *Atenuación sísmica. aplicación a terremotos intraplaca en México central*. Tesis de Doctorado. Universidad Complutense de Madrid Facultad de Ciencias Físicas. Disponible en <https://www.fundaciongarciasineriz.es/wp-content/uploads/attachments/DGarcia.pdf>
- _____ (2006). *Estimación de parámetros del movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en México central*. Tesis de Doctorado, Universidad Complutense de Madrid. Disponible en <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/7ecc7fe6-81e0-4d20-a957-1d922f140913/content>
- García Palomo, A., Siebe, C., & Macías, J. L. (2020). “The Xitle Volcano, Southern Mexico City: A Monogenetic Volcano in an Urban Area”, en *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(2), pp. 179-196.
- Disponible en <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.37.2.1084>
- García Soto, Adrián David, Pozos-Estrada, Adrián, Hong, Hanping, & Gómez Martínez, Roberto. (2012). Estimación del peligro sísmico debido a sismos interplaca e inslab y sus implicaciones en el diseño sísmico. *Ingeniería sísmica*, (86), 27-54. Recuperado en 07 de octubre de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2012000100002&lng=es&tlng=es.
- Ghahari, F, Abazarsa F, Ebrahimian H, Zhang W, Arduino P, Taciroglu E. (2022). Identification of Nonlinear Soil Properties from Downhole Array Data Using a Bayesian Model Updating Approach. *Sensors (Basel)*, 14 de diciembre de 2022, 22(24):98482022. Disponible en <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9782295/> DOI: 10.3390/s22249848.

- Gobierno de México. (2014). *Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones. Tomo II Análisis para Diseño por SISMO 2.1.* https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/105406/Tomo_II_An_lisis_para_Dise_o_por_SISMO_2.1.pdf
- Gobierno de México. (2015). *Bases técnicas para el cálculo de la prima de riesgo y la pérdida máxima probable para los seguros de terremoto (Anexo 5.1.5-a).* Disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/73489/ANEXO_5.1.5-a.pdf
- Gobierno de la Ciudad de México. (2020). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo con Comentarios.* Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Disponible en:
https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/1d5e89dc4af705e74147078a93484290.pdf
- Gobierno de la Ciudad de México. (2023). *Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo 2023.* Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Disponible en
https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/b3c4f4ff37241d0a93cc6742a8b0bf2f.pdf
- González Cuevas, O. (2022). Una revisita en su centenario a los reglamentos de construcción de la Ciudad de México. (1ª ed.) Universidad Autónoma Metropolitana. Disponible en
<https://casadelibrosabiertos.uam.mx/gpd-una-revisita-en-su-centenario-a-los-reglamentos-de-construccion-de-la-ciudad-de-mexico.html>
- Gujarati, D. N., Porter, D. C., y Gunasekar, S. (2012). *Basic Econometrics* (5ª ed.). McGraw Hill Education (India) Private Limited.
- Hancock, Jonathan, Jennie Watson-Lamprey, Norman A. Abrahamson, Julian J. Bommer, Alexandros Markatis, Emma Mccoy y Rishmila Mendis (2006). An Improved Method of Matching Response Spectra of Recorded Earthquake Ground Motion Using Wavelets, *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 10. NS 01, pp. 67-89.
- Hanks, Thomas C. y Kanamori, Hiroo. (1979). A Moment Magnitude Scale, en *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, Núm. B5, 10 de mayo de 1979, pp. 84, 2348-2350.
<https://www.resolutionmineeis.us/sites/default/files/references/hanks-kanamori-1979.pdf>
- Hernández, E. R. (2016). *Derivadas parciales y direccionales.* Facultad de Ciencias, UNAM. https://sistemas.fciencias.unam.mx/~erhc/calculo3_20171/derivadas_parciales_direccionales_2016_1_2.pdf
- Herrera González, Reyes Indira, Saba Rodríguez, Mikhail Samir, Mendoza Cordero, Eleinys Andreina, & Ugel Garrido, Ronald David. (2016). Vulnerabilidad sísmica de un edificio aporticado de concreto armado de cinco niveles, con irregularidad en planta y variaciones en el diafragma de piso” *Saber*, 28(2), pp. 304-311. Disponible en
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-01622016000200013&lng=es&tlng=es.
- Hossain, A. S. M. F., Saeidi, A., Salsabili, M., Nastev, M., Suescun, J. R., & Bayati, Z. (2025). A Review of Parameters and Methods for Seismic Site Response, *Geosciences*, 15(4), 128. Disponible en
<https://doi.org/10.3390/geosciences15040128>

<https://www.mdpi.com/2076-3263/15/4/128>

Impulsan conservación del geopatrimonio de la UNAM a través de geosenderos, DGCS-UNAM, 23 de octubre de 2022. Disponible en https://unamglobal.unam.mx/global_revista/impulsan-conservacion-del-geopatrimonio-de-la-unam-a-traves-de-geosenderos/.

Jaimes, M. A. & 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.

Jaimes, M. A., Lermo, J. y García-Soto, A. D. (2016). Ground-Motion Prediction Model from Local Earthquakes of the Mexico Basin at the Hill Zone of Mexico City, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 106, No. 6, diciembre, pp. 2532-2544. DOI: 10.1785/0120150283106, 2532–2544.

Jaimes, M. A., Ramirez-Gaytán, A., & Reinoso, E. (2015). Ground-Motion Prediction Model From Intermediate-Depth Intraslab Earthquakes at the Hill and Lake-Bed Zones of Mexico City. *Journal of Earthquake Engineering*, 19(8), 1260-1278.

Joyner, William B. y Boore, David M. (1981). Peak Horizontal Acceleration and Velocity from Strong-Motion Record Including Records from the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 71, 6, 2011-20138.

Jung, J., Lee, J., Kim, D., & Lee, H. (2018). Development of a high-resolution regional climate model for the Korean Peninsula. *Geoscientific Model Development*, 11(8), pp. 3071-3090. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-11-3071-2018>

Kanamori, Hiroo. (1977). “The energy released in earthquakes”, en *Journal of Geophysical Research*, Vol. 82, Issue 20: Solid Earth and Planets, 10 de julio de 1977, pp. 2981-2987. Disponible en <https://doi.org/10.1029/JB082i020p02981>

Kramer, Steven L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, 653, NJ.

Disponible en: <https://es.scribd.com/document/364223305/Geotechnical-Earthquake-Engineering-Kramer-1996-pdf>

Lermo-Samaniego, Javier F., Miguel A. Jaimes, Francisco J. Sánchez-Sesma, Cristian Campuzano-Sánchez, Hugo Cruz-Jiménez y José Oscar Campos. (2020). “Ground Motion Prediction Model for Southeastern Mexico Removing Site Effects Using the Earthquake Horizontal-To-Vertical Spectral Ratio (Ehvsr)”, *Geofísica Internacional*, 59-4, pp. 257-272, en <https://www.scielo.org.mx/pdf/geoint/v59n4/0016-7169-geoint-59-04-257.pdf>

Leonardo, M. (2013). *PSM2012: Aplicación web para la difusión y consulta de datos de peligro sísmico*. Tesis de Maestría. Instituto de Ingeniería-UNAM, Ciudad de México.

López Levi, Liliana & Toscana Aparicio, Alejandra. (2016). Vulnerabilidad en Tlatelolco a tres décadas de los sismos de 1985, *Política y cultura*, (45), 125-152. Recuperado 08 de febrero de 2025. Disponible en http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-77422016000100125&lng=es&tlng=es.

Marsal, Raúl J. y Mazari, M. (2016). *El subsuelo en la Ciudad de México 1*. Instituto de Ingeniería-UNAM.

Martínez Mendoza, Rutman. (2015). *Análisis comparativo de las normas de diseño sismo-resistente en los países latinoamericanos colindantes al Cinturón de Fuego*. Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Facultad de Ingeniería de Minas, Geología y Civil.

Masuda, T. & M. Ohtake (1992). Comment on "A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan", by Y. Fukushima and T. Tanaka. *Bull. Seism. Soc. Am.* 82, 521-522.

Disponible en <https://repositorio.unsch.edu.pe/server/api/core/bitstreams/11b1c2db-34f8-471a-846c-50ef7bb1fbba/content>

McCann, M. W. & Echezwia, H. 1984. Investigating the uncertainty in ground motion prediction, *Proceedings of Eighth World Conference on Earthquake Engineering*, vol. II, 297–304.

Martínez Mendoza, R. (2015). Análisis comparativo de las normas de diseño sismo-resistente en los países latinoamericanos colindantes al cinturón de fuego [Tesis de pregrado]. Repositorio Institucional UNSCH.

<https://repositorio.unsch.edu.pe/bitstreams/11b1c2db-34f8-471a-846c-50ef7bb1fbba/download>

Montgomery, D. C., Peck, E. A. & Vining, G. G. (2021). Introduction to linear regression analysis (6a ed.). John Wiley & Sons. Disponible en: https://www.kwcsangli.in/uploads/3--Introduction_to_Linear_Regression_Analysis__5th_ed._Douglas_C._Montgomery__Elizabeth_A._Peck_and_G._.pdf

Normas Técnicas Complementarias. (2020). *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*. Junio, CDMX. Disponible en

https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/1d5e89dc4af705e74147078a93484290.pdf

Ordaz, M., Jara, J. M. y Singh, S. K. (1989), Riesgo sísmico y espectros de diseño en el Estado de Guerrero, *Mem. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Acapulco, México, pp. D40-D56.

Ordaz M. y Salgado-Gálvez M.A. (2020). *R-CRISIS v20 Validation and Verification Document. ERN Technical Report*. Mexico City, Mexico. Chap. 2. Theoretical background of the methodologies and models implemented in R-CRISIS. Recuperado de

<http://www.r-crisis.com/Content/files/R-CRISIS%20V AND V%20Document V1%20Chapter%202.pdf>

Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER. "PEER leads Global Ground Motion Prediction Equations development for GEM", en *PEER.d* Disponible en <https://peer.berkeley.edu/peer-leads-global-ground-motion-prediction-equations-development-gem-0>

Palacio Prieto, José Luis & Guilbaud, Marie-Noëlle. (2015). Patrimonio natural de la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel y áreas cercanas: sitios de interés geológico y geomorfológico al sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), 227-244. Recuperado en 29 de julio de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222015000200008&lng=es&tlng=es.

Paredes Estacio, J. L., & De Risi, R (2025). Historical evolution of the input parameters of ergodic and non-ergodic ground motion models (GMMs): A review. *Earth-Science Reviews*.

Pinzón, Luis A., Eduardo D. Hernández, Miguel A. Mánica. (2023). Time-domain deconvolution procedure for elastoplastic materials: Application to the Treasure Island site during the 1989 Loma Prieta earthquake, *MethodsX*, Vol. 11, Diciembre 2023, 102386, ISSN 2215-0161, en

<https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102386> y

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016123003825>

Pozos Estrada, A., Gómez Martínez, R., & Hanping, H. (2014). Desagregación del peligro sísmico para algunos sitios seleccionados de México, *Revista Ingeniería Sísmica*, (91), julio-diciembre, pp. 31–53. Disponible en <https://doi.org/10.18867/ris.91.178>

Ramírez, L., Jaimes, M., & Aguirre, J. (2016). *Sistemas de Generación de Señales Sintéticas y Correcciones de Acelerogramas para el Diseño y Evaluación Estructural en la Ciudad de México*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería.

Ramírez Valverde, G. & Ramírez Valverde, B. (2006). Colinealidad y mínimos cuadrados ponderados. *Revista Venezolana de Análisis de Coyuntura*, 12(1), 283-296. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/364/36412113.pdf>

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. (2004). Administración Pública del Distrito Federal, Jefatura de Gobierno. Disponible en:

www.transparencia.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/5d3/620/ed4/5d3620ed48300396327208.pdf

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. (2017). *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*. Diciembre, CDMX. Disponible en:

www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf

Reinoso, Eduardo, & Jaimes, Miguel A. (2009). Criterios para obtener acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas usando como ejemplo el caso de terreno firme de la Ciudad de México, *Ingeniería Sísmica*, (81), pp. 1-18. Recuperado en 22 de abril de 2025, disponible en

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2009000200001&lng=es&tlng=es

Salinas-Rodríguez, Aarón, Ricardo Pérez-Núñez & Leticia Ávila-Burgos. (2006). Modelos de regresión para variables expresadas como una proporción continua. *Salud Pública de México*, 48(5), pp. 395-404. Recuperado en 23 de mayo de 2025, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0036-36342006000500006&lng=es&tlng=es.

SASID, Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño, UNAM. Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México 2023. Disponible en <https://sasid.unam.mx/webnormascdmx/>

Sawires, R., Santoyo, M. A., Peláez, J. A., & Corona Fernández, R. D. (2019). An updated and unified earthquake catalog from 1787 to 2018 for seismic hazard assessment studies in Mexico. *Sci. Data*, 6(1), 241.

Schmidt-Díaz, Víctor. (2014). Ecuaciones predictivas del movimiento del suelo para América Central, con datos de 1972 a 2010. *Rev. Geol. Amér. Central.*, Núm. 50, junio-julio, San Pedro Montes de Oca. Disponible en

Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). (2008). *Bases técnicas para el cálculo de la prima de riesgo y la pérdida máxima probable para los seguros de terremoto*. ANEXO 5.1.5-a. Disponible en:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/73489/ANEXO_5.1.5-a.pdf

www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0256-70242014000100001

- Servicio Geológico Mexicano, SGM. (2017, 22 de marzo). Sismología de México. Recuperado de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>
- Servicio Sismológico Nacional. *¿Cuál es la magnitud máxima que se espera en México?* Servicio Sismológico Nacional-UNAM-Geofísica UNAM. Recuperado de <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/sismoMayor.pdf>
- Servicio Sismológico Nacional. (2017). Reporte especial del sismo del 19 de septiembre de 2017 (RE:17-09-19). Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.ssn.unam.mx/jsp/reportesEspeciales/sismoMayor.pdf>
- Schmitter, E. (1953). Investigación petrológica en las lavas del Pedregal de San Ángel, *Memorias del Congreso Científico Mexicano*, Núm. 3, pp. 218-237.
- Scordilis, E.M. (2006). Relaciones globales empíricas que convierten M_s y m_b a magnitud de momento, *Revista de Sismología*, 10(2), pp. 225-236. DOI: 10.1007/s10950-006-9012-4. Disponible en <https://link.springer.com/article/10.1007/s10950-006-9012-4>
- Siebe, Claus. (2009). La erupción del volcán Xitle y las lavas del Pedregal hace 1670 +/-35 años AP y sus implicaciones, en *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel*, UNAM, México, pp. 43-50 *Geofísica Internacional*, pp. 43-49. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/260183243_La_erupcion_del_volcan_Xitle_y_las_lavas_d_el_Pedregal_hace_1670_35_anos_AP_y_sus_implicaciones
- Siemens Community. *Shock Response Spectrum* (SRS). Disponible en <https://www.google.com/imgres?imgurl=https://community.sw.siemens.com/servlet/rtaImage?eid%3Dka6KZ00000002IH%26feoid%3D00N4O000006Yxpf%26refid%3D0EM4O00000113vS&tbid=LBWouvKORtc6dM&vet=1&imgrefurl=https://community.sw.siemens.com/s/article/shock-response-spectrum-srs&docid=inKNLdB0fjCoGM&w=808&h=620&hl=es-US&source=sh/x/im/m6/4&kgs=0f0d5c4060c22ecc>
- Stein, Seth & Wysession, Michael. (2003). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*, Blackwell Publishing, Oxford. Disponible en <https://doi.org/10.1017/S0016756803318837>
- Stewart, J. P., J. Douglas, M. Javanbarg, Y. Bozorgnia, N. A. Abrahamson, D. M. Boore, K. W. Campbell, E. Delavaud, M. Erdik, y P. G. Stafford. (2015). Selection of Ground Motion Prediction Equations for the Global Earthquake Model, *Earthquake Spectra*, 31(1), pp. 19-45. DOI: <https://doi.org/10.1193/013013EQS017M>
- Strasser, F. O., Abrahamson, N. A. & Bommer, J. J. (2009) Sigma: Issues, Insights, and Challenges, *Seismological Research Letters*, 80(1), 40–56. DOI: 10.1785/gssrl.80.1.40
- Suárez, Miguel Leonardo. (2024). *Análisis de peligro y vulnerabilidad sísmica de estructuras ubicadas en la zona de Mixcoac*, Ciudad de México. [No publicado.]
- Udías, Agustín y Bufo, Elisa. (1999). *Principles of Seismology*. Cambridge University Press, Reino Unido. Disponible en https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781108548557_A31909480/preview-9781108548557_A31909480.pdf

- Unda López, José Antonio. (2016). *Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Villalón, Madelin & Palau Clares, Raúl. (2018). Relaciones empíricas entre las magnitudes mb/Ms, Ms/Mw y mb/Mc para el área de Cuba, Jamaica y La Española, *Minería y Geología*, Núm. 34, pp. 167 - 176.
- Wooldridge, J. M. (2016). *Introductory econometrics: A modern approach* (6ª ed.). Cengage Learning.
- Zhao, J. X., Jiang, F., Shi, P., Xing, H., Huang, H., Hou, R. *et al.* (2016). Ground-motion prediction equations for subduction slab earthquakes in Japan using site class and simple geometric attenuation functions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(4), 1535–1551. DOI: 10.1785/0120150056.
- Zhao, X., Zhang, Jianjing, A., Asano, Ohno, Oouchi, Taishi T., Takahashi, H., Ogawa, Irikura, Kojiro, Thio, Hong, Somerville, Paul & Fukushima, Yasuhiro. (2006). Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 96. 898-913.
- Zúñiga R., Suárez G., Ordaz M. y García-Acosta V. (1997), “Peligro Sísmico en Latinoamérica y el Caribe”, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, México. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/258696944_Peligro_Sismico_en_Latinoamerica_y_el_Caribe_Capitulo_2_Mexico
- Zúñiga, F., Suárez, Gerardo, Figueroa-Soto, A. & Mendoza-Ponce, Avith. (2017). “A first-order seismotectonic regionalization of Mexico for seismic hazard and risk estimation”. *Journal of Seismology*. 1, pp.1-28. DOI: 10.1007/s10950-017-9666-0.