

# Análisis del peligro sísmico: una aproximación cartográfica para el municipio de Toluca, Estado de México\*

Fernando Sánchez Carmona<sup>€</sup>

Alexis Ordaz Hernández<sup>#</sup>

Luis Miguel Espinosa Rodríguez<sup>¶</sup>

Elkin de Jesús Salcedo Hurtado<sup>Ω</sup>

## Resumen

La ciudad de Toluca se caracteriza por un ordenamiento territorial que incorpora mínimamente la amenaza sísmica, lo que limita el alcance de la sostenibilidad urbana y, en particular, de la seguridad. En este contexto, se realiza una evaluación probabilista del peligro sísmico que consiste en: (i) definir las fuentes sismotectónicas que afectan a la ciudad; (ii) asignar relaciones de atenuación a cada fuente y magnitudes máximas probables de acuerdo con el ambiente tectónico; y (iii) emplear el método de sismicidad suavizada de Gutenberg-Richter para determinar los parámetros de sismicidad por fuente. A partir de esta aplicación metodológica, se obtiene la cartografía probabilista de aceleración máxima de suelos y rocas para un periodo de retorno de 475 años. La cartografía resultante, constituye una herramienta para la gestión del riesgo a escala municipal. La incorporación de estos resultados en los procesos constructivos y de ordenamiento territorial contribuiría a reducir pérdidas humanas y económicas frente un posible sismo de magnitud moderada a alta, fortaleciendo así la resiliencia del municipio.

**Palabras clave:** aceleración, gestión, Gutenberg-Richter, peligro sísmico, resiliencia urbana, riesgo, Toluca.

**Ideas destacadas:** artículo de investigación que aborda una temática modular para los entornos urbanos, especialmente para aquellos ubicados en zonas con actividad sísmica. El resultado más relevante consiste en la elaboración de una cartografía que representa el peligro sísmico para el municipio de Toluca (Méjico).



RECIBIDO: 27 DE ABRIL DE 2023. | EVALUADO: 17 DE OCTUBRE 2023. | ACEPTADO: 03 DE JULIO DE 2024.

## CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO

Sánchez-Carmona, Fernando; Ordaz-Hernández, Alexis; Espinosa Rodríguez, Luis Miguel; Salcedo Hurtado, Elkin. 2025. "Análisis del peligro sísmico: una aproximación cartográfica para el municipio de Toluca, Estado de México". *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 34 (2): 438-455. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v34n2.108571>.

- \* El presente proyecto es financiado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt), forma parte de una investigación del Doctorado en Geografía y Desarrollo Geotecnológico de la Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.
- € Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca – México. ✉ [fsanchezc169@alumno.uaemex.mx](mailto:fsanchezc169@alumno.uaemex.mx) – ORCID: 0000-0002-0217-5782.
- # Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca – México. ✉ [aordazh@uaemex.mx](mailto:aordazh@uaemex.mx) – ORCID: 0000-0002-6788-650X.
- Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca – México. ✉ [lmespinosar@uaemex.mx](mailto:lmespinosar@uaemex.mx) – ORCID: 0000-0002-9545-400X.
- ¶ Universidad del Valle, Santiago de Cali – Colombia. ✉ [elkin.salcedo@correounalvalle.edu.co](mailto:elkin.salcedo@correounalvalle.edu.co) – ORCID: 0000-0002-6753-7094.
- ✉ Correspondencia: Alexis Ordaz-Hernández, Facultad de Geografía, Cerro de Coatepec s/n Ciudad Universitaria, Toluca Estado de México C.P. 50110, México.

# Seismic Hazard Analysis: A Cartographic Approach For the Municipality of Toluca, State of Mexico

## Abstract

The city of Toluca is characterized by a land use planning that minimally incorporates seismic hazard, which limits the scope of urban sustainability and, in particular, safety. In this context, a probabilistic seismic hazard assessment is performed consisting of: (i) defining the seismotectonic sources affecting the city; (ii) assigning attenuation ratios to each source and probable maximum magnitudes according to the tectonic environment; and (iii) employing the Gutenberg-Richter smoothed seismicity method to determine the seismicity parameters per source. From this methodological application, the probabilistic mapping of maximum acceleration of soils and rocks for a return period of 475 years is obtained. The resulting cartography constitutes a tool for risk management at the municipal scale. The incorporation of these results in the construction and land use planning processes would contribute to reduce human and economic losses in the event of a possible moderate to high magnitude earthquake, thus strengthening the resilience of the municipality.

**Keywords:** acceleration, management, Gutenberg-Richter, seismic hazard, urban resilience, risk, Toluca.

**Highlights:** research article that addresses a central issue for urban environments, especially for those located in areas with seismic activity. The most relevant result consists in the elaboration of a cartography that represents the seismic hazard for the municipality of Toluca (Mexico).

# Análise de risco sísmico: uma abordagem cartográfica para o município de Toluca, Estado do México

## Resumo

A cidade de Toluca é caracterizada por um planejamento de uso do solo que incorpora minimamente o risco sísmico, o que limita o escopo da sustentabilidade urbana e, em particular, a segurança. Nesse contexto, é realizada uma avaliação probabilística do risco sísmico, que consiste em: (i) definir as fontes sismotectônicas que afetam a cidade; (ii) atribuir taxas de atenuação a cada fonte e magnitudes máximas prováveis de acordo com o ambiente tectônico; e (iii) empregar o método de sismicidade suavizada de Gutenberg-Richter para determinar os parâmetros de sismicidade por fonte. A partir dessa aplicação metodológica, é obtido o mapeamento probabilístico da aceleração máxima de solos e rochas para um período de retorno de 475 anos. A cartografia resultante constitui uma ferramenta para o gerenciamento de riscos em escala municipal. A incorporação desses resultados nos processos de construção e planejamento do uso da terra contribuiria para reduzir as perdas humanas e econômicas no caso de um possível terremoto de magnitude moderada a alta, fortalecendo assim a resiliência do município.

**Palavras-chave:** aceleração, gerenciamento, Gutenberg-Richter, perigo sísmico, resiliência urbana, risco, Toluca.

**Ideias destacadas:** artigo de pesquisa que aborda uma questão fundamental para ambientes urbanos, especialmente para aqueles localizados em áreas com atividade sísmica. O resultado mais relevante consiste na elaboração de uma cartografia que representa o risco sísmico para o município de Toluca (México).

## Introducción

Según datos del Grupo Banco Mundial aproximadamente 4.400 millones de habitantes (el 56 % de la población mundial) viven actualmente en ciudades, y esta cifra puede continuar en aumento (Grupo Banco Mundial 2023). Este fenómeno justifica la necesidad de desarrollar investigaciones orientadas a garantizar entornos urbanos seguros. No obstante, los daños provocados por fenómenos de origen natural en el contexto latinoamericano (REDLAC 2003; SGR 2016; CENAPRED 2020) evidencian patrones de crecimiento urbano desordenados que generan impactos negativos y desequilibrios ecológicos.

En el caso específico de la ciudad de Toluca, se reporta una población aproximada de 900.000 habitantes (INEGI 2020). Su perímetro urbano concentra una serie de elementos expuestos, entre los que destacan vialidades, hospitales, escuelas, zonas comerciales y turísticas (Gobierno Municipal de Toluca 2022). Estos elementos sociales y de infraestructura justifican la necesidad de retomar estudios relacionados con el peligro sísmico, con el fin de aportar nuevos criterios para el ordenamiento urbano a nivel municipal.

El presente trabajo busca contribuir al Programa Nacional Estratégico de Seguridad Humana, impulsado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías de México. Como objetivo principal, se plantea analizar el peligro sísmico al que está expuesto el municipio de Toluca, utilizando como medida de intensidad la aceleración máxima del suelo. Se espera que la cartografía generada, junto con la información cuantitativa que la respalda, tenga un impacto directo en la justificación técnica de nuevas normas y reglamentos de diseño sísmico para el municipio. Asimismo, se aspira a que constituya una herramienta útil para el plan de desarrollo urbano y para la mejora del atlas municipal de riesgos.

## Área de estudio

El municipio de Toluca (Figura 1) limita al norte con Zinacantepec y Ocoyoacac; al sur, con Metepec y Calimaya; al este, con San Mateo Atenco y Mexicalzingo; y al oeste, con Lerma. Se ubica a una altitud promedio de 2.639 m.s.n.m. y cuenta con una superficie aproximada de 89,6 km<sup>2</sup> (SEDATU 2020). Según el Sistema Estatal de Información Urbana, Metropolitana y Vivienda (SEIM 2019), en su territorio se localizan 264 localidades, de las cuales más de la mitad corresponden a asentamientos humanos de carácter urbano. En ellas predominan edificaciones de entre dos y cinco pisos.

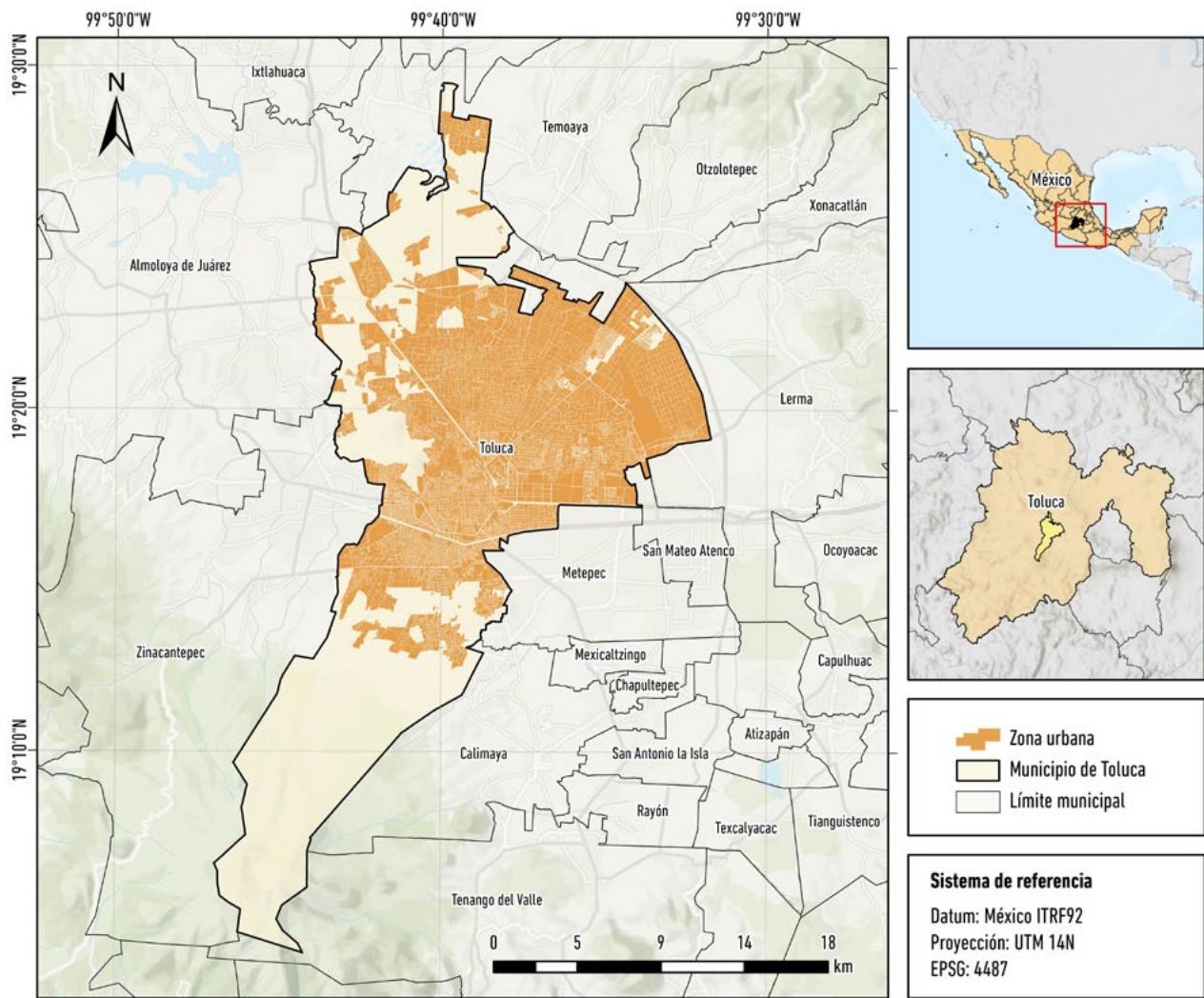
La dinámica poblacional del municipio muestra un crecimiento sostenido desde la década de los setenta. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2020), la población total asciende a 910.068 habitantes. Este crecimiento se ve impulsado, en gran parte, por la acelerada migración campo-ciudad derivada del proceso de metropolización. Asimismo, el terremoto de 1985, ocurrido en las costas de Michoacán y con efectos devastadores en la Ciudad de México, también favorece un flujo migratorio hacia Toluca (Allier-Montaño 2018).

## Marco teórico

El grupo de investigación liderado por el Dr. Luis Esteva Maraboto, de la Universidad Nacional Autónoma de México, ha estudiado en profundidad los elementos probabilísticos relacionados con los movimientos del suelo generados por terremotos, así como la frecuencia de ocurrencia de dichos eventos en el territorio mexicano (Esteva et ál. 2002). En este marco, el equipo publicó los primeros mapas probabilísticos de peligrosidad sísmica basados en zonas sismotectónicas de México. Estos mapas se expresan en términos de intensidad de Mercalli Modificada, aceleración máxima del suelo asociada a la aceleración pico del terreno (PGA) y períodos de retorno. Se fundamentan en nociones probabilistas de ocurrencia de terremotos y constituyen los primeros mapas de este tipo elaborados para el país.

Los antecedentes señalados y los objetivos del presente estudio sitúan esta investigación en el campo de la geografía de los riesgos socionaturales, conforme al enfoque propuesto por Lavell (2003), el cual enfatiza la relación entre sociedad y entorno natural como fuente potencial de situaciones de riesgo de desastre, agravadas por la intensidad de los fenómenos naturales peligrosos, como los terremotos. En este sentido, se busca aportar al análisis del peligro sísmico como componente esencial del riesgo sísmico, con la intención de ofrecer fundamentos técnicos sólidos para la futura gestión municipal.

A continuación, se presentan los principales elementos teóricos que sustentan el diseño metodológico desarrollado. Se toma como referencia el trabajo pionero de Cornell (1968), quien considera los tipos de movimiento del suelo para inferir la intensidad descriptiva y la intensidad instrumental (PGA). Cornell realiza dos aportes fundamentales: (i) calcular la atenuación de las ondas sísmicas y (ii) incorporar la distribución



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio.

Datos: Gobierno de México (2024).

de la magnitud de los terremotos junto con la distribución temporal de los eventos sísmicos. Supone que las magnitudes sísmicas se distribuyen conforme a la relación frecuencia-magnitud propuesta por Gutenberg y Richter (1942; 1956).

No obstante, el modelo de Cornell (1968) excluye la variabilidad del movimiento del suelo, abordada previamente por Rosenblueth (1964), quien destaca la dificultad de predecir el movimiento exacto del suelo en un sitio específico y plantea que, en el mejor de los casos, dicho movimiento puede estimarse a través de su valor esperado y su distribución. Esteva (1970) incorpora esta variabilidad, describiéndola mediante una distribución gaussiana, lo que le permite cuantificar la incertidumbre aleatoria del movimiento del suelo. Actualmente, la

integración de la dispersión del movimiento a partir de residuos distribuidos log-normal en la ecuación de atenuación se considera un estándar.

La obra de Cornell (1968) es reconocida como el origen del formalismo de la Evaluación Probabilista del Peligro Sísmico (PSHA, por sus siglas en inglés). Otro aporte clave al desarrollo de este formalismo proviene de McGuire (1976), quien desarrolló el código informático EQRISK, ampliamente utilizado en la primera década del siglo XXI antes de la aparición de OpenQuake (Pagani et al. 2020).

Cabe señalar que ninguno de los autores del procedimiento Esteva-Cornell-McGuire abordó en detalle la evaluación de los parámetros de recurrencia necesarios para aplicar el modelo PSHA. Estos parámetros incluyen

la tasa de actividad media, los valores de la relación frecuencia-magnitud de Gutenberg-Richter y la magnitud máxima esperada por fuente sismotectónica. Tal como advierten Alamilla, Rodríguez y Vai (2020), la metodología PSHA no puede aplicarse adecuadamente en ausencia de estos parámetros, cuya evaluación resulta especialmente crítica cuando los catálogos sísmicos son incompletos o presentan incertidumbre.

A lo largo del tiempo, diversos investigadores han centrado su atención en la evaluación de los parámetros de recurrencia para catálogos de eventos sísmicos, tanto completos como incompletos (Aki 1965; Utsu 1965; Molchan Keilis-Borok y Vilkovich 1970; Rosenblueth y Ordaz 1987; Kijko y Sellevoll 1989; Marzocchi y Sandri 2003; Kijko 2012; McClure et ál. 2017; Ordaz y Giraldo 2018). Estos estudios se han enfocado principalmente en la estimación de la tasa de actividad media, así como de los parámetros sísmicos lambda ( $\lambda$ ) y beta ( $\beta$ ) correspondientes al modelo de Gutenberg-Richter.

La estimación de la magnitud máxima esperada ( $M_{max}$ ) suele abordarse por separado, ya que su naturaleza compleja varía de acuerdo con las características propias de cada región sismotectónica. Por esta razón, se aplican técnicas distintas a las empleadas para la evaluación de  $\beta$  y  $\lambda$  (Beirlant et ál. 2019).

En el presente estudio se calcularán los parámetros de sismicidad del modelo Gutenberg-Richter, bajo el supuesto de que los eventos siguen un proceso de Poisson. Este proceso se modela mediante una distribución de probabilidad discreta que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de un número determinado de terremotos en un intervalo de tiempo futuro (Gurjar y Basu 2022). En particular, para la estimación de los parámetros  $\beta$  y  $\lambda$  se utilizarán las ecuaciones de sismicidad suavizada propuestas por Xu (2019), las cuales se basan en la teoría de máxima verosimilitud.

En cuanto a la estimación del valor de  $m_{max}$ , este se definirá como el límite superior de magnitud por zona sismotectónica. Para ello, se tomará como referencia el valor de la magnitud máxima registrada en cada fuente, a partir de los datos del catálogo sísmico del Servicio Sismológico Nacional (SSN 2022) y del catálogo de sismos históricos compilado por Suárez (2022).

## Metodología

En la estimación probabilista del peligro sísmico para el municipio de Toluca se emplea el enfoque clásico de evaluación

probabilista, desarrollado por Esteva (1968) y Cornell (1968). Para llevar a cabo el análisis, es necesario definir las fuentes sísmicas, asumiendo una sismicidad uniforme en cada una de ellas. Estas fuentes se modelan mediante relaciones de recurrencia que incorporan distribuciones de magnitud y frecuencia. Además, las fuentes sísmicas pueden subdividirse en segmentos más pequeños, en los que la sismicidad se distribuye de forma proporcional.

Posteriormente, mediante el uso del software R-CRISIS, es posible calcular las probabilidades de excedencia de diferentes niveles de intensidad del movimiento del suelo (aceleración máxima del suelo), asociadas a la ocurrencia de terremotos con una determinada magnitud y distancia desde un punto de interés (Ordaz y Salgado-Gálvez, 2018).

Dada la extensión de las regiones sismotectónicas que influyen en el municipio de Toluca, se emplea una resolución gruesa, la cual consiste en: (i) definir las regiones sismotectónicas con influencia sísmica sobre el municipio; (ii) asignar relaciones de atenuación específicas a cada fuente, así como establecer una magnitud máxima probable según su entorno tectónico; y (iii) aplicar la metodología de sismicidad suavizada para estimar los parámetros de sismicidad correspondientes a cada fuente sismotectónica.

Los cálculos descritos en esta metodología fueron realizados utilizando la versión 20.3 del software R-CRISIS. En este caso, se sigue parcialmente el flujo metodológico propuesto por Ordaz et ál. (2013), representado en la Figura 2.

### Catálogo sísmico

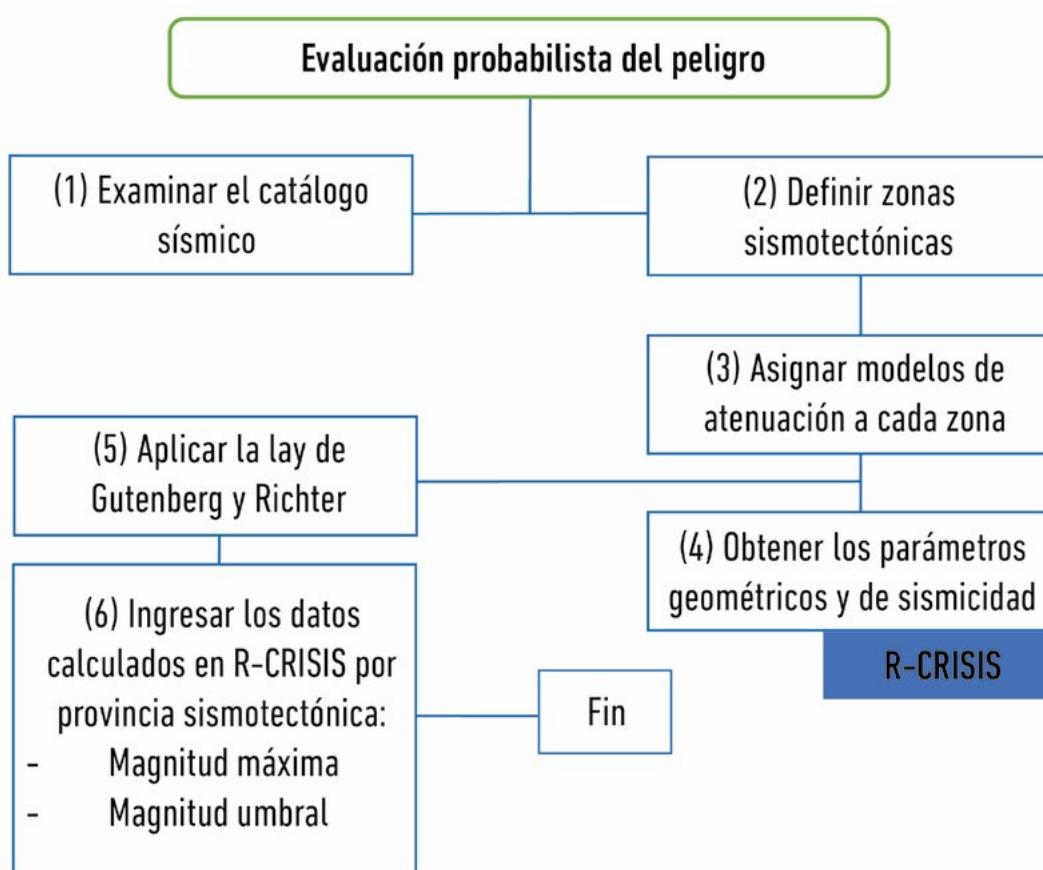
El análisis probabilista se basa en un catálogo de eventos sísmicos que permite determinar los parámetros de sismicidad correspondientes a las regiones sismotectónicas involucradas. Para este propósito, se utilizó el catálogo del Servicio Sismológico Nacional de México, perteneciente a la Universidad Nacional Autónoma de México (SSN 2022), abarcando el periodo comprendido entre 1900 y 2022 (Figura 3).

El catálogo contiene un total de 1.768 eventos, los cuales fueron filtrados considerando únicamente aquellos con magnitudes mayores a 5,0 en magnitud momento (Mw). Los epicentros de estos eventos se superpusieron sobre las regiones sismotectónicas definidas por Zúñiga et ál. (2017), con el fin de calcular los parámetros de sismicidad mediante la aplicación de la metodología de sismicidad suavizada.

### Zonas sismotectónicas

El siguiente paso en la evaluación de la peligrosidad sísmica consiste en definir las zonas sismotectónicas —también denominadas fuentes sismogénicas en algunos textos— que influyen sobre el área de estudio. Para ello, se asignan valores de magnitud máxima probable ( $M_{max}$ ), magnitud umbral ( $M_u$ ) y relaciones de atenuación, con base en los distintos entornos sismotectónicos que afectan la región analizada.

Esta zonificación fue desarrollada por Zúñiga et ál. (2017), considerando los contactos entre placas tectónicas, antecedentes de actividad sísmica, mecanismos focales y la presencia de dislocaciones tectónicas. Cabe señalar que dicha división constituye la zonificación sismotectónica oficial para la República Mexicana, e incluye tanto la sismicidad originada en los bordes de placas como en su interior.



**Figura 2.** Diagrama de flujo metodológico que se aplicará en esta investigación.  
Fuente: modificado de Ordaz et ál. (2013, 499).

A cada zona sismotectónica se le asignan valores de  $M_u$  y un intervalo de profundidades asociado. Para definir las relaciones de atenuación correspondientes, las zonas se clasificaron en tres categorías: (i) regiones sísmicas de subducción, (ii) regiones de sismicidad de profundidad intermedia y (iii) regiones de sismicidad somera. Las características geométricas de estas zonas están ampliamente documentadas en Zúñiga et ál. (2017).

### Estimación de parámetros sísmicos

La estimación de los parámetros sísmicos lambda ( $\lambda$ ) y beta ( $\beta$ ) (Tabla 1) se llevó a cabo conforme al manual explicativo para el uso del programa de análisis probabilístico de peligrosidad sísmica R-CRISIS (Ordaz y Salgado-Gálvez 2018).

Un tercer parámetro estimado es la magnitud máxima probable de un evento sísmico característico de cada

**Tabla 1.** Estimación de parámetros sísmicos Lambda y Beta

Descripción del parámetro	Ecuación	Variables
Lambda $\lambda_0$ Permite conocer la frecuencia de ocurrencia de sismos con magnitud $Mw > 5$ por fuente sismotectónica en un tiempo determinado (por año).	$I_{e1} \lambda_0 = \prod_{i=1}^N P_t(T_i)$	Donde: $T_i$ : tiempo entre eventos $N$ : número de temblores $I_{e1} \lambda_0$ : expresión de máxima verosimilitud $P_t$ : duración del catálogo
Beta $\beta$ Permite conocer la pendiente que se construye entre la magnitud y el tiempo de ocurrencia de eventos; cuando la pendiente aumenta, la ocurrencia de sismos grandes es menor.	$B = \frac{N}{S} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N (m_i - m_0)}$	Donde: Se tienen $N$ observaciones de magnitudes, donde $N$ es el tamaño de la muestra $\epsilon$ : $(m_1, m_2, m_3, \dots, m_n)$ S: Pendiente de la recta que estima el comportamiento de sismos de magnitudes pequeñas y grandes $m$ : Magnitud $\epsilon$ : Tamaño de la muestra

Fuente: Ordaz y Salgado-Gálvez (2018).

fuente sismogénica ( $m_{max}$ ). Para este estudio, se utilizó la magnitud máxima histórica de los terremotos ocurridos dentro de las seis zonas sismotectónicas de interés (Figuras 4 y 5). Los valores de  $m_{max}$ , fueron tomados del catálogo de Suárez (2022) y del catálogo del Servicio Sismológico Nacional de México de la Universidad Nacional Autónoma de México (SSN 2022).

### Relaciones de atenuación

Las relaciones de atenuación sísmica del suelo dependen del origen del terremoto, la trayectoria seguida por las ondas sísmicas y las características físicas del sitio. También influyen la distancia focal y la magnitud del sismo, variables que, en conjunto, constituyen la base fundamental para la estimación de ecuaciones empíricas de atenuación. La forma funcional de estas relaciones se obtiene a partir de soluciones analíticas derivadas de modelos circulares que representan fuentes finitas (Chávez-García et ál. 2018).

Para la evaluación probabilista del peligro sísmico, es necesario conocer la localización y geometría de las zonas sismotectónicas. Según los modelos propuestos por Glass (1989), Singh et ál. (2015), Martínez-López y Mendoza (2016), Zúñiga et ál. (2017) y Sawires et ál. (2021), el municipio de Toluca se localiza en una zona de sismicidad moderada, influenciada por:

1. Zonas sismogenéticas de subducción (SUB2, SUB3);
2. Zonas de profundidad intermedia (IN1, IN2), y
3. Zonas de sismicidad somera (MVB, y NAM).

A cada una de estas zonas se le asignó una relación de atenuación específica, de acuerdo con su régimen sismotectónico.

1. Zonas sismogenéticas de subducción (SUB2, SUB3); se aplicó la relación de atenuación propuesta por Arroyo et ál. (2010).
2. Zonas de profundidad intermedia (IN1, IN2); se utilizó la relación de atenuación de García et ál. (2005).
3. Zonas de sismicidad somera (MVB y NAM); se empleó la relación de atenuación desarrollada por Youngs et ál. (1997).

### Modelo de sismicidad

Para el análisis probabilista, se empleó el modelo de sismicidad de Poisson y la fórmula de Gutenberg-Richter adaptada por McGuire y Arabasz (1990), expresada como:

$$y(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M_U}}{e^{\beta M_U} - e^{-\beta M_U}}$$

Esta relación describe la actividad de la fuente atendiendo a la frecuencia de eventos sísmicos superiores a ciertas magnitudes, donde:

$M_u$  representa la magnitud umbral,  $M_{max}$  es la magnitud máxima esperada de la fuente,  $\lambda_0$  indica la tasa de actividad de la fuente sismogénica y se computa como la cantidad de eventos con magnitudes igual o mayor de la magnitud umbral anual, y  $\beta$  indica la tasa relativa de ocurrencia de sismos de magnitud grande y pequeña, y se obtiene como la pendiente de la parte inicial de la curva de recurrencia de magnitudes.

Para determinar los parámetros de sismicidad, se empleó la metodología de sismicidad suavizada. En este enfoque, el área de estudio se divide en una malla, donde cada nodo representa una ruptura sísmica. Cada

nodo se caracteriza mediante tres parámetros  $\lambda_0$ ,  $\beta$  y  $M_u$  que corresponden a la tasa de actividad, tasa relativa de ocurrencia y magnitud umbral estimada respectivamente.

Dado que la ocurrencia de sismos es aleatoria respecto a la profundidad de los hipocentros, se definieron dos mallas con rangos de profundidad diferenciados: 0-40 km y 40-250 km. Es importante señalar que el catálogo utilizado (SSN 2022) asigna convencionalmente una profundidad de 33 km a los eventos superficiales cuya localización hipocentral es incierta, lo que puede generar una distorsión en la distribución de profundidades. Sin embargo, esta limitación se compensa mediante el uso de dos mallas diferenciadas por profundidad.

Una propuesta metodológica similar puede consultarse en Sánchez-Flores (2015). Para este caso de estudio, ambas mallas se generaron con un espaciamiento de  $0,05^\circ$ , lo que resultó en un total de 77 nodos que cubren completamente el municipio de Toluca.

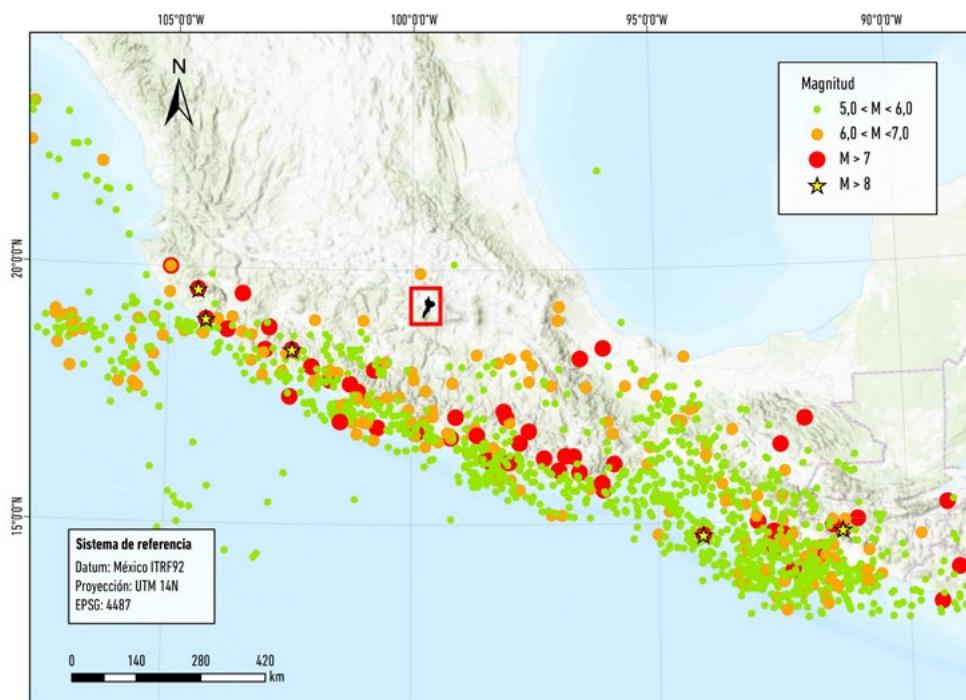
## Resultados y discusión

### Zonas sismotectónicas y estimación de parámetros símicos

Como se indicó en el acápite anterior, las zonas sismotectónicas con influencia en el municipio de Toluca son MVB, NAM, IN1, IN2, SUB2 y SUB3, cada una con características particulares.

Por ejemplo, las zonas SUB2 y SUB3 comprenden áreas de acoplamiento donde ocurren eventos sísmicos someros, con profundidades focales menores a 40 km, asociados al proceso de subducción de las placas de Rivera y Cocos.

Las regiones sísmicas someras MVB y NAM corresponden al Cinturón Volcánico Transmexicano y presentan sismicidad cortical, determinada por mecanismos de ruptura que indican fallas normales. En estas zonas, la actividad sísmica es relativamente poco frecuente (Figura 3).

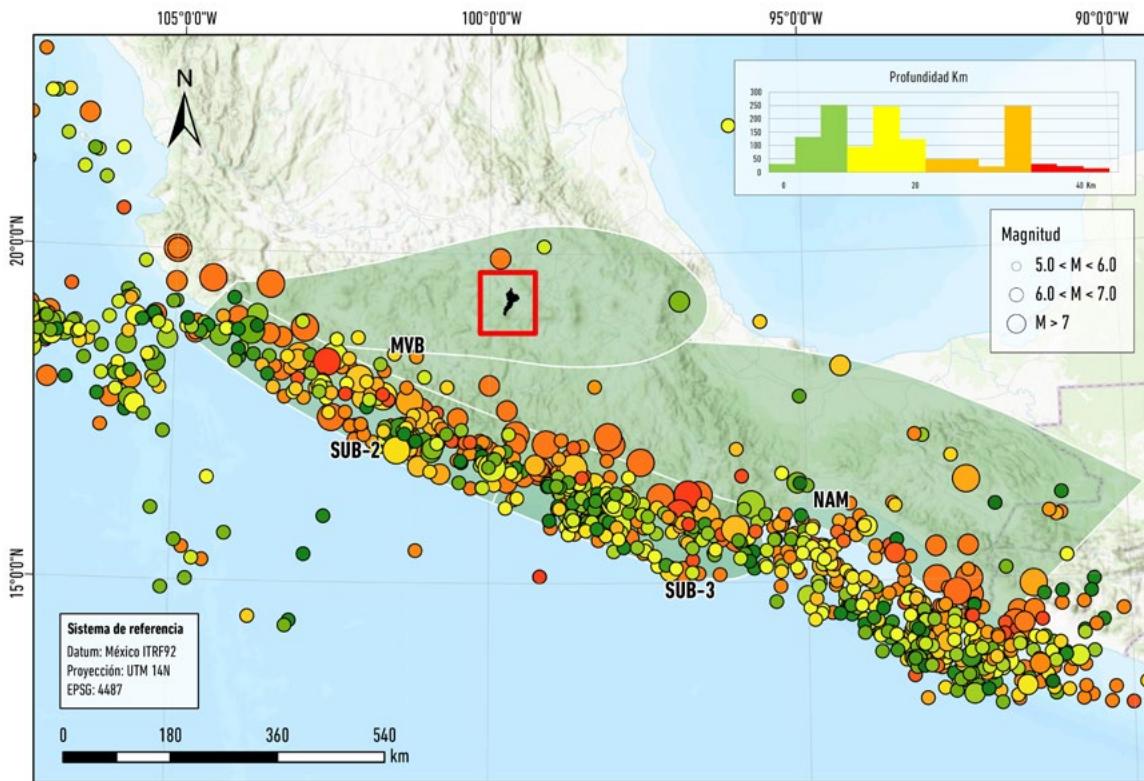


**Figura 3.** Fuentes sismotectónicas de profundidad somera.

Datos: elaboración propia a partir de Zúñiga et ál. (2017).

Por último, las zonas sismotectónicas de profundidad intermedia IN1 e IN2 corresponden a sismicidad intraplaca, localizada dentro de la losa subducida bajo las zonas SUB2 y SUB3. Los hipocentros en estas regiones se ubican entre los 40 y 250 kilómetros de profundidad (Figura 4).

Posteriormente, se calcularon los parámetros geométricos de las seis zonas sismotectónicas, los cuales se trajeron de la regionalización oficial mexicana propuesta por Zúñiga et ál. (2017) (Tabla 2). Estos parámetros fueron considerados para la modelación del peligro sísmico mediante el programa R-CRISIS.



**Figura 4.** Fuentes sismotectónicas de profundidad intermedia.  
Datos: elaboración propia a partir de Zúñiga et ál. (2017).

**Tabla 2.** Parámetros geométricos por zonas sismotectónicas

Nombre	Profundidad (km)	Tipo de fuente	Grosor de capas km	Número de capas	Relación de aspecto	Strike grados	
MVB	>15	Área	0	1	0,3	90	$\kappa_1 = 0,005642$
NAM	<15	Área	0	1	0,2	90	$\kappa_2 = 1,1513$
IN1	40 < 180	Área	0	1	0,3	174	Parámetros geométricos referenciados en (Costilla-Rodríguez, Córdoba-Barba y Núñez-Cornú 2019).
IN2	40 < 250	Área	0	1	0,1	170	
SUB2	15 - 40	Área	0	1	0,3	45	
SUB3	15 - 40	Área	0	1	0,2	45	

Fuente: Zúñiga et ál. (2017).

Finalmente, y conforme al procedimiento descrito, se determinaron los parámetros Lambda  $\lambda$  y Beta ( $\beta$ ) para las seis zonas sismotectónicas que potencialmente pueden afectar al municipio de Toluca (Figuras 3 y 4). Estos parámetros serán empleados en la modelación del peligro sísmico mediante el programa R-CRISIS (Tabla 3).

Los datos presentados en la Tabla 3 sugieren, de acuerdo con los valores de Lambda ( $\lambda_0$ ), que en la zona sismogenética SUB3 podrían esperarse al menos dos sismos con magnitudes superiores a 5,0 Mw por año. En contraste, la zona MVB tendría la capacidad de generar apenas 0,10 sismos anuales con magnitudes iguales o mayores a dicho umbral. Este resultado concuerda con

los registros históricos: la zona MVB se ubica al interior de la placa Norteamericana, y en los últimos 122 años

se han registrado solo ocho terremotos con magnitudes superiores a 5,0 Mw.

**Tabla 3.** Parámetros sísmicos para las zonas sismogenéticas que afectan al municipio de Toluca

Catálogo	Zonas sismogenéticas	Profundidad (km)	Número de eventos	Duración en años	Lambda λo	Beta β	M máx Histórica μ	M máx catálogo
SSN	SUB2	15 - 40	200	114	1,69	1,61	8,5	8,1
SSN	SUB3	15 - 40	265	115	2,10	1,99	8,6/8,5	7,8
SSN	NAM	>20	26	61	0,43	2,45	-	7,4
SSN	MVB	>35	8	78	0,10	0,89	8,1	7,8
SSN	IN1	40 - 93,3	58	110	0,50	1,7	7,5	7,5
SSN	IN2	40 - 130	56	112	0,50	1,06	7,2	7,8

Fuente: SSN (2022).

No obstante, aunque la frecuencia de ocurrencia es baja, debe recordarse el terremoto del 19 de noviembre de 1912 en Acambay, con una magnitud de 6,9 Mw, el cual provocó la muerte de más de 100 personas. Este evento marcó un precedente sobre la posibilidad de que ocurran sismos cercanos a 7,0 Mw en la región central de México (Singh et ál. 2014).

En cuanto a los valores estimados del parámetro Beta ( $\beta$ ), se observa que a mayor valor de  $\beta$ , menor será la proporción de sismos grandes frente a sismos pequeños. Por ejemplo, en la zona sismotectónica NAM, donde se estima una pendiente de 2,45, se espera que predominen sismos de baja magnitud. De hecho, según el catálogo sísmico analizado, más del 80 % de los eventos en esta zona tienen magnitudes inferiores a 6,0 Mw. Por el contrario, en la zona MVB el valor estimado de  $\beta$  es de 0,89, lo que indica una mayor proporción de sismos de gran magnitud. En esta zona, aproximadamente el 50 % de los sismos registrados presentan magnitudes superiores a 6,0 Mw.

### Análisis de la amenaza sísmica

El análisis se llevó a cabo en cada uno de los nodos de la malla definida (con un espaciamiento de 0,05°) que conforman el área de estudio, utilizando el programa R-CRISIS.

En este proceso se determinaron las tasas de excedencia de aceleración (PGA) mediante el procedimiento descrito por CIMNE et ál. (2013). A partir de los parámetros  $\lambda_0$ ,  $\beta$  y  $M_u$ , se generaron escenarios para cada nodo de la malla, considerando diferentes magnitudes sísmicas y sus respectivas frecuencias de ocurrencia.

Para calcular las tasas de excedencia de intensidad, se utilizó la siguiente expresión:

$$v(a) = \sum_{n=1}^N * \int_{M_o}^{M_u} \frac{\partial y}{\partial M} \Pr(A > a | M, R_i) dM$$

De la fórmula anterior, la suma abarca todos los  $N$  nodos ubicados dentro de la distancia de integración, la cual es definida por el modelador en el programa R-CRISIS, en este caso se recomienda utilizar una distancia entre los 150 y 300 km, según lo recomendado en Ordaz y Salgado-Gálvez (2018),  $\Pr(A > a | M, R_i)$  es la probabilidad de que la intensidad exceda cierto valor, que para el caso de estudio la magnitud  $M$  analizada fue >5,0 Mw y distancia  $R$  representa la distancia entre la fuente y el punto de análisis, y  $y_{(M)}$  representa la función de tasa de excedencia de magnitudes. La integración se realiza en el rango de magnitudes  $M_o$  y  $M_u$ , abarcando todas las posibles magnitudes en cada nodo.

Los valores de  $V_{s_30}$  incluidos en la relación de atenuación de García et ál. (2005), y aplicada en este caso de estudio, se obtienen a través de las características físicas del corte estratigráfico del municipio de Toluca. Las  $V_{s_30}$ , en este caso, se extraen del estudio realizado por Sánchez et ál. (2022), donde utilizan las ecuaciones de Dikmen (2009). Sánchez et ál. (2022) elaboraron el modelo 3D que representa la disposición superficial de los suelos y rocas sobre los que se emplaza la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. El modelo se sustentó en 49 pozos con fines de investigaciones hidrogeológicos, 137 pozos con fines geotécnicos y 45 descripciones de afloramientos. La información descrita, les permitió obtener un modelo detallado de la geología superficial, misma información que se emplea en este caso de estudio para definir la aflorabilidad de suelos y rocas. Este último elemento es clave, para la obtención de una cartografía cercana a la realidad física del municipio.

Para fines metodológicos, el proceso descrito se realizó modelando dos posibilidades. Donde, la primera modelación para obtener el análisis probabilístico del peligro sísmico, con sus siglas en inglés (PSHA), se realiza con un perfil estratigráfico constituido por suelos. Mientras que, la segunda modelación corresponde a un escenario hipotético donde el perfil estratigráfico estaría constituido totalmente por rocas.

Las dos modelaciones realizadas corresponden a las posibilidades técnicas que ofrece el programa de cómputo R-CRISIS, sin embargo, el contexto real desde el punto de vista estratigráfico marca amplias heterogeneidades en función de los tipos litológicos (suelos y rocas) cartografiados (Figura 5). Para subsanar esta contradicción, se crearon dos plantillas. La primera, contiene los polígonos de suelos (cuando estos alcanzaban un espesor  $\geq 30,0$  m). Y la segunda plantilla contenía los polígonos, donde afloraban rocas o estas tenían un espesor de recubrimientos  $\leq 30,0$  m. Las plantillas mencionadas, se realizaron con fundamento en el trabajo de Sánchez et ál. (2022). Posteriormente, las modelaciones realizadas (para suelo y roca) fueron interceptadas con su plantilla equivalente, para de esta forma obtener la cartografía resultante del análisis probabilístico del peligro sísmico.

La cartografía resultante expresa el comportamiento de la aceleración máxima de suelos y rocas (PGA), con un periodo de retorno de 475 años (Figura 7). La modelación realizada indica aceleraciones (PGA) en rocas dentro del contexto municipal con valores máximos de  $156,12 \text{ cm/s}^2$  y mínimos de  $125,68 \text{ cm/s}^2$ . Mientras que, para suelos la

aceleración pico del terreno (PGA) se comportaría en el intervalo de  $243,17 \text{ cm/s}^2$  a  $151,86 \text{ cm/s}^2$ .

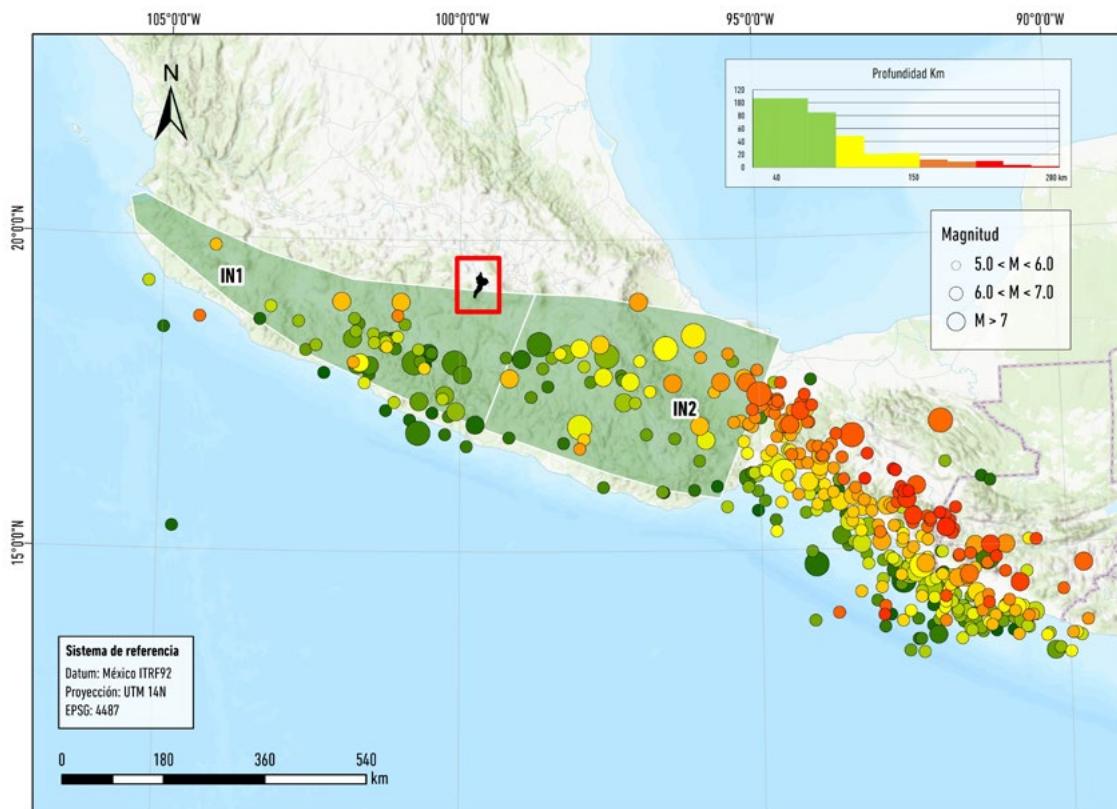
Al considerar las correlaciones propuestas por el TC4 (Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering 1999), las aceleraciones obtenidas para Toluca sugieren intensidades entre los VII y VIII grados. Posteriormente, se consultó el Catálogo de Sismos Históricos de México (Suárez 2022), donde se verifica la ocurrencia de al menos dos sismos en el rango de intensidad mencionado anteriormente. El primero ocurrido el 29 de mayo de 1887 y el segundo el 26 de marzo de 1908, con intensidades en la escala de Mercalli de VII y VIII grados respectivamente. Un segundo elemento, que robustece la discusión de los resultados alcanzado, es la verificación de las zonas sismogenéticas que generaron los sismos citados. En el caso del terremoto de 1887, este se originó en la zona sismogenética denominada en la actualidad por Zúñiga et ál. (2017) como IN2 (véase figura 5), donde la liberación de energía se genera aproximadamente entre los 40 y 250 km de profundidad (intraplaca), los eventos muestran principalmente fallas normales. Mientras que, el evento de 1908 correspondió a la estructura descrita por el mismo colectivo de autores, como SUB3 en una zona de subducción (véase figura 3).

Las dos zonas sismogenéticas mencionadas, forman parte de las seis zonas que se incorporaron al software R-CRISIS. Precisamente, el sismo más reciente de gran magnitud que afectó a México (7,1 grados escala Richter) se originó en la zona sismogenética IN2, a la profundidad de 51 km (SSN 2022). El sismo ocurrió el 19 de septiembre de 2017, donde perdieron la vida 470 personas (CENAPRED 2020). El análisis del mecanismo focal realizado por el International Seismological Centre (2024) indica que el evento se ubicó en la latitud 18,59 y longitud -98,63. Los datos del análisis muestran dos posibles soluciones del plano de falla: Strike1, dip1, rake1: 109/46/-97 y Strike2, dip2, rake2: 300/44/-83. Estos resultados confirman un tipo de fallamiento normal, sugiriendo que el terremoto fue el resultado de un movimiento de extensión en las placas tectónicas de la región.

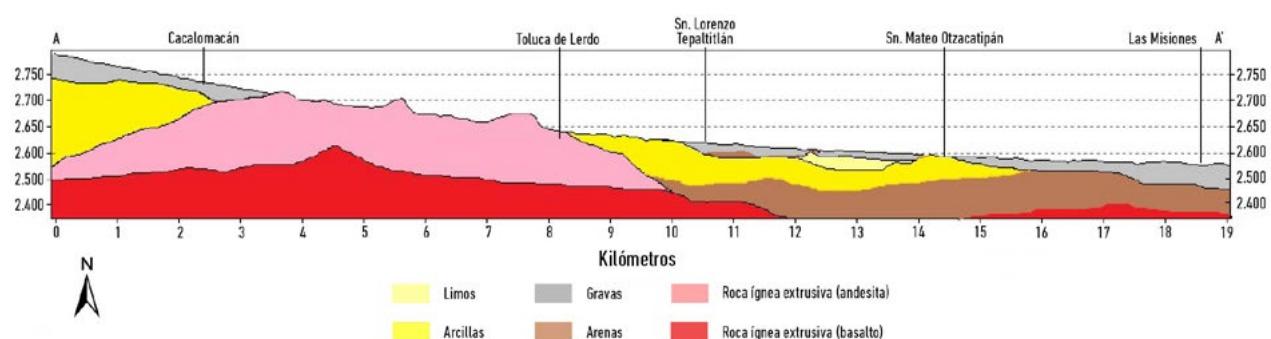
El resultado obtenido, se comparó con la propuesta realizada por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, INEEL (2017) la cual emplea para el modelado de las aceleraciones picos del terreno, el programa PRODISIS. El modelo propuesto (PRODISIS) es uno de los más empleados en México, el cual proporciona espectros de respuesta e información para diseño antisísmico. Este programa indica para Toluca, aceleraciones picos

del terreno en el intervalo de 100,00 cm/seg<sup>2</sup> a 110,00 cm/seg<sup>2</sup>, esto para un corte geológico constituido por rocas para un periodo de retorno de 475 años, mismo periodo de retorno empleado en este trabajo. La comparación de resultados revela que, los valores obtenidos por el programa R-CRISIS sugieren unos 40,0 cm/s<sup>2</sup> por encima. La variación de resultados se justifica por las diferencias en las zonas sismogénicas utilizadas en los

algoritmos matemáticos de cada programa. Mientras que PRODISIS emplea zonas sismogénicas delimitadas a partir de un catálogo sísmico de 87.104 eventos (CENAPRED 2017), el estudio con R-CRISIS se basó en las zonas sismogénicas propuestas por Zúñiga et ál. (2017), definidas a partir de un catálogo sísmico de 101.915 eventos (Tablas 2 y 3).



**Figura 5.** Corte que representa la disposición en profundidad de los diferentes tipos litológicos del municipio de Toluca.  
Fuente: Sánchez et ál. (2022).



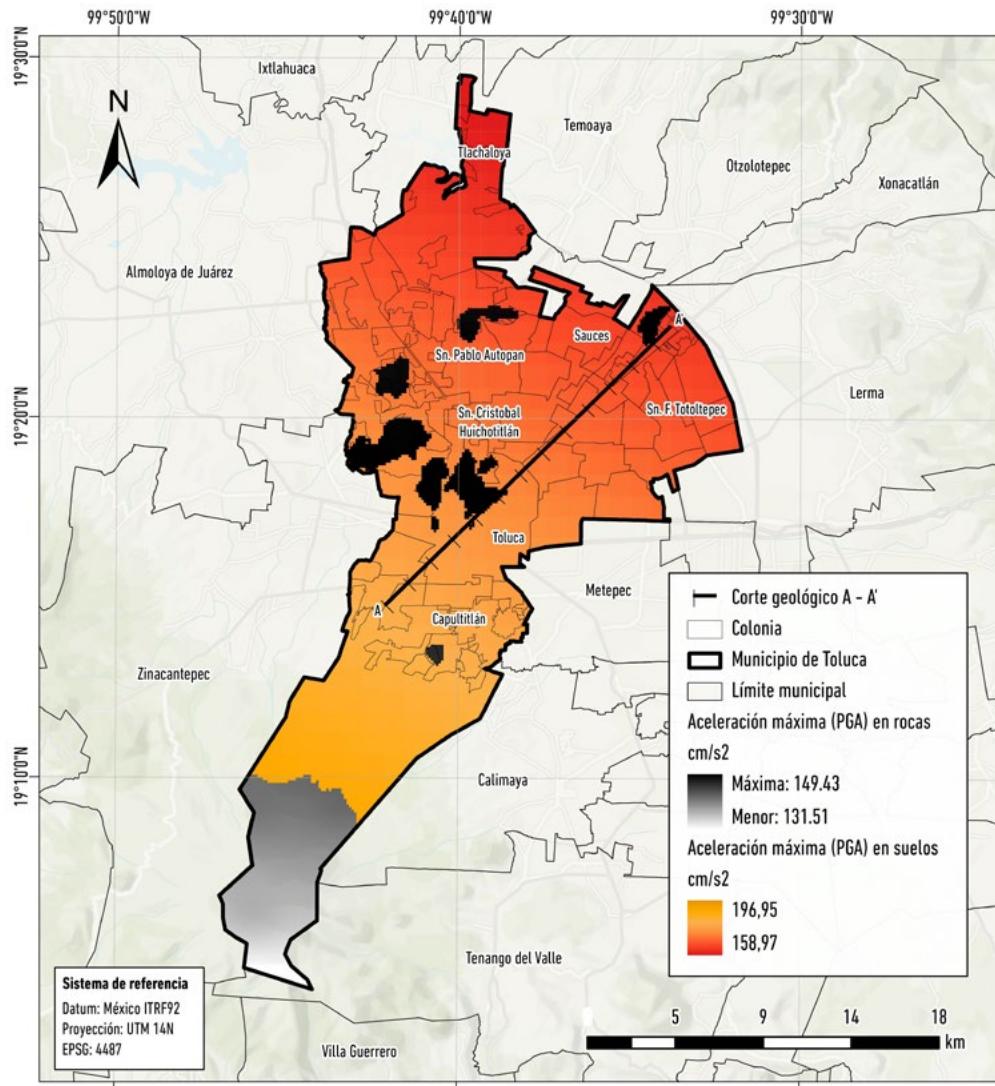
**Figura 6.** Cartografía resultante del análisis de PSHA, para aceleraciones máximas del terreno (PGA) con un periodo de retorno de 475 años.  
Datos: elaboración propia con datos derivados de la metodología expuesta en esta investigación.

**Tabla 4.** Ejemplos de posible inserción de los estimados en este trabajo de aceleración máxima del terreno (PGA) en el diseño de diferentes de obras dentro del municipio de Toluca

Obra civil	Descripción	Ecuación	
Tuberías enterradas	Determina la deformación admisible para tuberías subterráneas.	$\epsilon_g = \frac{V_{max}}{C_e V_a}$ $\Phi g = \frac{a_0 g}{(C_\phi V_a)^2}$	$V_{max}$ : velocidad máxima del terreno esperada en el sitio. $a_0$ : aceleración máxima del terreno. $V_a$ : velocidad aparente de propagación de ondas sísmicas. $g$ : aceleración de la gravedad. $C_e$ : coeficiente de deformación del terreno. $C_\phi$ : coeficiente de curvatura del terreno.
Presas de concreto y mampostería. Presas de Tierra y enrocamiento.	Evaluá el grado de prevención de colapso de la estructura de contención utilizando la elevación recomendada por el diseño de ingeniería hidráulica.	$K_h = \frac{a_0}{1 + 3_{a_0}}$	$a_0$ : aceleración máxima del terreno.
Túneles en roca o suelo duro.	Aplica las pautas de diseño sísmico para túneles revestidos de sección circular. Calcula la máxima deformación unitaria del revestimiento causada por la acción de una onda de corte.	$\epsilon = \pm \frac{V_{max}}{Cs} \sin \sin(\phi) \cos(\phi)$ $\pm \frac{a_{max}}{C_s^2} R \cos^3(\phi)$	$\epsilon$ : deformación unitaria longitudinal. $V_{max}$ : velocidad máxima de partícula. $a_{max}$ : aceleración máxima del terreno. $C_s$ : velocidad efectiva de propagación de onda de corte. $R$ : radio efectivo del túnel. $\phi$ : ángulo de incidencia.
Espectros para diseño de estructuras tipo edificio.	Los espectros sísmicos de diseño son curvas que representan las aceleraciones potenciales de un sitio en función de la distancia y la respuesta de las estructuras, considerando su masa, rigidez y amortiguamiento.	$si T < T_a$ $si T_a \leq T < T_b$ $si T \geq T_b$ $a = \{a_0 + (\beta_c - a_0) \frac{T}{T_a}\} \beta_c \beta_{cp} \left(\frac{T_b}{T_a}\right)^2$	$a_0$ : máxima aceleración absoluta. $T_a$ y $T_b$ : períodos de vibrar característicos. $\beta_c$ : amortiguamiento complementario.
Sistema estructural de edificaciones.	La estructura de la edificación debe ser diseñada para resistir los efectos del sismo en ambas direcciones horizontales, así como las cargas gravitacionales y otras acciones adicionales, como las aceleraciones máximas del suelo. Se requiere un sistema estructural adecuado para garantizar la seguridad y estabilidad durante un evento sísmico.	$\Omega = \left( \frac{h_i}{h_n} \right) \left( \frac{a_n}{a_0} - 1 \right) + 1$	$a_0$ : aceleración máxima del terreno. $a_n$ : máxima aceleración absoluta, correspondiente al extremo superior del edificio. $h_i$ : altura del i-ésimo nivel. $h_n$ : altura del nivel sobre el desplante.
Respuesta sísmica de elementos no estructurales (Parapetos, pretilés, anuncios, plafones, ornamentos, ventanales, muros, revestimientos)	Para elementos no estructurales, se estima la fuerza sísmica multiplicando su masa por la aceleración máxima del piso.	Para deslizamiento $\mu_s > a_i$ Para volteo $b_{me} > h_{cm} a_i$	$\mu_s$ : coeficiente de fricción estática entre los materiales de la base. $h_{cm}$ : altura del centro de la masa del contenido. $b_{me}$ : la menor distancia en dirección horizontal, entre la vertical que pasa por el centro de la masa del contenido hasta el borde de su zona de apoyo. $a_i$ : aceleración máxima de los suelos.

Susceptibilidad a la licuefacción de los suelos.	En este caso el método de Seed e Idriss (1971) es ampliamente utilizado a nivel internacional. Donde, para obtener tensión tangencial cíclica, se requiere conocer la aceleración máxima, entre otros parámetros.	$CSR = \frac{T_{cm}}{\sigma'_v} = 0.65 \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot r_d$	$T_{cm}$ : esfuerzo cortante cíclico medio. $\sigma_v$ : tensión total. $\sigma'_v$ : tensión efectiva. $a_{max}$ : aceleración máxima.
--	---	--	--

Fuente: INEEL (2017); Ayuntamiento de Tijuana (2019); Gobierno de la Ciudad de México (2020).



**Figura 7.** Cartografía resultante del análisis de PSHA, para aceleraciones máximas del terreno (PGA) con un periodo de retorno de 475 años.

Con el propósito de continuar la discusión, comparando resultados obtenidos en investigaciones previas, se consultó el trabajo realizado por Ordaz et. al (2015). Este trabajo emplea el programa R-CRISIS, donde, para un periodo de retorno de 475 años estimó una aceleración pico del terreno entre 170 y 190 cm/s<sup>2</sup> para la Ciudad de México ubicada a unos 60 km aproximadamente de Toluca.

Por tanto, se concluye que, el método probabilístico ha constituido la base fundamental para el análisis del peligro sísmico en México. La propuesta de este trabajo, implementada con el programa R-CRISIS, ofrece un producto cartográfico, específico para el municipio de Toluca, con la ventaja de asociar la peligrosidad con el contexto litológico del sitio.

Las estimaciones de aceleraciones máximas del terreno pueden constituir un elemento clave para reducir la vulnerabilidad estructural de futuros proyectos y un paso de avance hacia la sostenibilidad urbana. Las obras civiles se encuentran expuestas a la intensidad del movimiento sísmico cuando ocurre un terremoto, es por ello, que se recurre a la estimación de PGA para usarla como base en el diseño por sismo, que dependen de la cercanía de la ruptura y condiciones locales del terreno. En el ámbito de la ingeniería en México se acepta que las fuerzas sísmicas presentan notables variaciones en todo el país, lo cual dificulta una descripción detallada. Por esta razón, se ha establecido una regionalización sísmica dividida en cuatro zonas: Zona a, Zona b, Zona c y Zona d (CFE 2015). De ahí que, la estimación de la aceleración (PGA) permite estimar diseños sísmicos que tomen en cuenta el comportamiento de los suelos en el sitio, y de esta forma aplicar diseños constructivos coherentes con la realidad física del territorio transitando a una ciudad resiliente.

La revisión de algunos manuales de diseño y construcción en México (INEEL 2017; Ayuntamiento de Tijuana 2019; Gobierno de la Ciudad de México 2020) indican que el resultado obtenido en este trabajo, específicamente la aceleración máxima del terreno (PGA), interviene en el diseño de diferentes objetos de obras dentro de una ciudad o un edificio en particular (Tabla 4). Su aplicación en futuros proyectos constructivos en Toluca resultaría en un aporte a la reducción de la vulnerabilidad estructural y acercaría al perímetro urbano a un escenario más seguro.

## Conclusiones

Se realizó el análisis probabilista del peligro sísmico para el municipio de Toluca empleando el enfoque de sismicidad suavizada para estimar los parámetros lambda ( $\lambda$ ) y beta ( $\beta$ ). Se empleó para este caso de estudio el programa R-CRISIS, las relaciones de atenuación empleadas permitieron ingresar datos del comportamiento físico de los materiales geológicos dentro del municipio, en este caso, la velocidad de ondas transversales ( $V_{s_30}$ ). Así mismo, el conocimiento de la geología local permitió interpretar los resultados obtenidos (véase Figura 7).

Se obtiene la cartografía del comportamiento la aceleración máxima de suelos y rocas (PGA), con un periodo de retorno de 475 años para el municipio de Toluca. La modelación realizada sugiere aceleraciones (PGA) en rocas con valores máximos de 156,12 cm/s<sup>2</sup> y mínimos de 125,68 cm/s<sup>2</sup>. Mientras que, para suelos la aceleración

pico del terreno (PGA) se comportaría en el intervalo de 243,17 cm/s<sup>2</sup> a 151,86 cm/s<sup>2</sup>. Los resultados obtenidos son comparables con otros estudios a escala nacional.

Las estimaciones de aceleraciones máximas del terreno, estimadas en este trabajo constituyen un elemento clave para reducir la vulnerabilidad estructural de futuros proyectos y un paso de avance hacia la resiliencia urbana. En este sentido, se resumen un grupo de ejemplos (Tabla 4), donde la aceleración máxima del terreno (PGA), interviene en el diseño de diferentes objetos de obras dentro de una ciudad.

Se pretende que la cartografía generada, y la información cuantitativa que la sustenta, puedan repercutir de forma directa en justificaciones técnicas para la creación de normas y reglamentos de diseño por sismos del municipio. Además, puede constituir una herramienta de consulta para la planificación urbana del municipio.

## Referencias

- Aki, Keiiti. 1965. "Maximum Likelihood Estimated of  $b$  in the Formula  $\log N = a - bM$  and Its Confidence Limits". *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo* 43 (2): 237-239. <https://doi.org/10.15083/0000033631>
- Alamilla, Jorge L., José A. Rodríguez y Rossana Vai. 2020. "Unification of Different Approaches to Probabilistic Seismic Hazard Analysis". *Bulletin of the Seismological Society of America* 110 (6): 2816-2827. <https://doi.org/10.1785/0120200148>
- Allier-Montaño, Eugenia. 2018. "Memorias imbricadas: terremotos en México, 1985 y 2017". *Revista Mexicana de Sociología* 80 (septiembre): 9-40. <https://doi.org/10.22201/iis.01882503p.2018.0.57772>
- Arroyo, Danny, Daniel García, Mario Ordaz, Mauricio Alexander Mora y Shri Krishna Singh. 2010. "Strong Ground-Motion Relations for Mexican Interplate Earthquakes". *Journal of Seismology* 14: 769-785. <https://doi.org/10.1007/s10950-010-9200-0>
- Ayuntamiento de Tijuana. 2019. "Reglamento de la ley de edificaciones para el municipio de Tijuana, Baja California". Consultado el 10 de marzo de 2023. [http://legismex.mty.itessm.mx/estados/ley-bcn/BC-RM-Tijuana-Edificaciones2019\\_03.pdf](http://legismex.mty.itessm.mx/estados/ley-bcn/BC-RM-Tijuana-Edificaciones2019_03.pdf)
- Beirlant, Jan, Andrzej Kijko, Tom Reynkens y John H. J. Einmahl. 2019. "Estimating the Maximum Possible Earthquake Magnitude Using Extreme Value Methodology: the Groningen Case". *Natural Hazards* 98: 1091-1113. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3162-2>
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2017. *Investigación sobre peligro y riesgo sísmico de las regiones sis-*

- mogenéticas de la República Mexicana. Subdirección de Riesgos Sísmicos. Consultado el 10 de marzo de 2023. [https://www1.cenapred.unam.mx/DIR\\_INVESTIGACION/Fraccion\\_XLI/RS/2018\\_DI\\_RS\\_Informe\\_Final\\_Regiones\\_Sismogeneticas.pdf](https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/Fraccion_XLI/RS/2018_DI_RS_Informe_Final_Regiones_Sismogeneticas.pdf)
- CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres). 2020. "A 35 años, México sigue en pie". Portal electrónico oficial del Gobierno de México. 2020. Consultado el 10 de marzo de 2023. <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/mexico-en-pie>
- CFE (Comisión Federal de Electricidad). 2015. *Manual de diseño de obras civiles*. Consultado el 10 de marzo de 2023. [https://www.researchgate.net/publication/319643184\\_C13\\_Manual\\_de\\_Diseno\\_de\\_Obras\\_Civiles\\_-\\_Diseno\\_por\\_Sistema\\_CFE-IIE\\_Version\\_2015](https://www.researchgate.net/publication/319643184_C13_Manual_de_Diseno_de_Obras_Civiles_-_Diseno_por_Sistema_CFE-IIE_Version_2015)
- Chávez-García, Francisco, Hugo Monsalve Jaramillo, Marisol Gómez Cano y José J. Vila Ortega. 2018. "Vulnerability and Site Effects in Earthquake Disasters in Armenia (Colombia). I-Site Effects". *Geosciences* 8 (7): 254. <https://doi.org/10.3390/geosciences8070254>
- CIMNE, ITEC S.A.S, INGENIEAR LTDA y EAI S.A. (International Centre for Numerical Methods in Engineering, Ingeniería Técnica y Científica, Engineering Advise International). 2013. *Probabilistic Modelling of Natural Risks at the Global Level: Global Risk Model*. Ginebra: The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR). [https://www.agr.una.py/descargas/biblioteca\\_digital\\_gestion\\_riesgos/GAR%202013/CIMNE%20et.al.%202013a.pdf](https://www.agr.una.py/descargas/biblioteca_digital_gestion_riesgos/GAR%202013/CIMNE%20et.al.%202013a.pdf)
- Cornell, C. Allin. 1968. "Engineering Seismic Risk Analysis". *Bulletin of the Seismological Society of America* 58 (5): 1583-1606. <https://doi.org/10.1785/BSSA0580051583>
- Costilla-Rodríguez, Mario Octavio, Diego Córdoba-Barba y Francisco Javier Núñez-Cornú. 2019. "Caracterización sismotectónica de México". *Revista Geográfica de América Central* 2 (63): 103-139. <http://doi.org/10.15359/rgac.63-2.4>
- Dikmen, Ünal. 2009. "Statistical of Shcorrelations Ear Wave Velocity and Penetration Resistance for Soils". *Journal of Geophysics and Engineering* 6 (1): 61-72. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/007>
- Esteva, Luis. 1968. *Criterios para la construcción de espectros de diseño sísmico*. Instituto de Ingeniería UNAM. [https://datosabiertos.unam.mx/CCUD\\_dor\\_ws-war/resources/doil/48e95a876229ae28](https://datosabiertos.unam.mx/CCUD_dor_ws-war/resources/doil/48e95a876229ae28)
- Esteva, Luis. 1970. "Seismic Risk and Seismic Design Decisions". En *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, editado por Robert J. Hansen, 142-82. Cambridge: The Massachusetts Institute of Technology Press.
- Esteva, Luis, Orlando Díaz-López, Jaime García-Pérez, Gerardo Sierra y E. Ismael. 2002. "Life-Cycle Optimization in the Establishment of Performance-Acceptance Parameters for Seismic Design". *Structural Safety* 24 (2-4): 187-204. [https://doi.org/10.1016/S0167-4730\(02\)00024-3](https://doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00024-3)
- García, Daniel, Shri Krishna Singh, Miguel Herraíz, Mario Ordaz y Javier Francisco Pacheco. 2005. "Inslab Earthquakes of Central Mexico: Peak Ground-Motion Parameters and Response Spectra". *Bulletin of the Seismological Society of America* 95 (6): 2272-2282. <https://doi.org/10.1785/0120050072>
- Glass, Charles E. 1989. "Seismic Wave Attenuation During the 19 September 1985 Michoacan, Mexico Earthquake". *International Journal of Mining and Geological Engineering* 7: 9-15. <https://doi.org/10.1007/BF01552835>
- Gobierno de la Ciudad de México. 2020. "Gaceta oficial de la Ciudad de México, Número 381". México. Consultado el 10 de marzo de 2023. [https://indeporte.cdmx.gob.mx/storage/app/media/2020/gaceta/jc/GOCDMX\\_381\\_EVALUACION\\_INTERNA\\_2020\\_ENLACE ELECTRONICO\\_PS\\_JULIO\\_7\\_2020.pdf](https://indeporte.cdmx.gob.mx/storage/app/media/2020/gaceta/jc/GOCDMX_381_EVALUACION_INTERNA_2020_ENLACE ELECTRONICO_PS_JULIO_7_2020.pdf)
- Gobierno de México. 2024. "Datos geográficos perimetrales de los núcleos agrarios certificados, por estado". Registro Nacional Agrario (RAN). Consultado el 10 de enero de 2025. <https://www.datos.gob.mx/busca/dataset/datos-geograficos-perimetrales-de-los-nucleos-agrarios-certificados-por-estado>
- Gobierno Municipal de Toluca. 2022. *Plan de desarrollo municipal de Toluca 2022-2024*. Consultado el 10 de marzo de 2023. [https://www2.toluca.gob.mx/wp-content/uploads/2022/04/tol-pdf-Plan\\_de\\_Desarrollo\\_Municipal-2022-2024.pdf](https://www2.toluca.gob.mx/wp-content/uploads/2022/04/tol-pdf-Plan_de_Desarrollo_Municipal-2022-2024.pdf)
- Grupo Banco Mundial. 2023. Panorama general. Consultado el 01 de junio de 2025. <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview#:~:text=En%20la%20actualidad%20alrededor%2odel,10%20personas%20viven%20en%20ciudades>
- Gurjar, Narsiram y Dhiman Basu. 2022. "Epistemic Uncertainty in PSHA and Seismic Hazard Characterization Using the Logic Tree Approach: Part I, Developing the Framework". *Pure and Applied Geophysics* 179: 3647-3676. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03143-4>
- Gutenberg, Beno y Charles Francis Ritcher. 1942. "Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration". *Bulletin of the Seismological Society of America* 32 (3): 163-191. <https://doi.org/10.1785/BSSA0320030163>
- Gutenberg, Beno y Charles Francis Ritcher. 1956. "Earthquake Magnitude, Intensity, Energy, and Acceleration (Second Paper)". *Bulletin of the Seismological Society of America* 46 (2): 105-145. <https://doi.org/10.1785/BSSA0460020105>

- INEEL (Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias). 2017. "PRODISIS, Gerencia de Ingeniería Civil". Consultado el 01 de junio de 2025. <https://civil.ineel.mx/prodisis/es/prodisis.php>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2020. "Censo de población y vivienda 2020". Consultado el 10 de marzo de 2023. [https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#Datos_abiertos)
- International Seismological Centre. 2024. "ISC-GEM Earthquake Catalogue". Consultado el 10 de marzo de 2024. <https://doi.org/10.31905/d8o8b825>
- Kijko, Andrzej. 2012. "On Bayesian Procedure for Maximum Earthquake Magnitude Estimation". *Research in Geophysics* 2 (1): e7. <https://doi.org/10.4081/rg.2012.e7>
- Kijko, Andrzej y M. A. Sellevoll. 1989. "Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files. Part I. Utilization of Extreme and Complete Catalogs with Different Threshold Magnitudes". *Bulletin of the Seismological Society of America* 79 (3): 645-654. <https://doi.org/10.1785/BSSA0790030645>
- Lavell, Allan. 2003. "Una visión de futuro: la gestión del riesgo". [https://www.academia.edu/9808475/Una\\_Visi%C3%B3n\\_de\\_Futuro\\_La\\_Gesti%C3%B3n\\_del\\_Riesgo](https://www.academia.edu/9808475/Una_Visi%C3%B3n_de_Futuro_La_Gesti%C3%B3n_del_Riesgo)
- Martínez-López, M. Rosario y Carlos Mendoza. 2016. "Acooplamiento sismogénico en la zona de subducción de Michoacán-Colima-Jalisco, México". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 68 (2): 199-214. <https://doi.org/10.18268/bsgm2016v68n2a3>
- Marzocchi, Warner y Laura Sandri. 2003. "A Review and New Insights on the Estimation of the B-Value and its Uncertainty". *Annals of Geophysics* 46 (6). <https://doi.org/10.4401/ag-3472>
- McClure, Mark, Riley Gibson, Kit Kwan Chiu y Rajesh Ranganath. 2017. "Identifying Potentially Induced Seismicity and Assessing Statistical Significance in Oklahoma and California". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 122 (3): 2153-2172. <https://doi.org/10.1002/2016JB013711>
- McGuire, Robin K. 1976. "FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis". *USGS Open-File Report*, no. 76-67. <https://doi.org/10.3133/ofr7667>
- McGuire, Robin K. y W. J. Arabasz. 1990. "An Introduction to Probabilistic Seismic Hazard Analysis". En *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume I, Review and Tutorial*, editado por Stanley H. Ward, 333. Houston: Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802785.ch12>
- Molchan, G. M., V. I. Keilis-Borok y G. V. Vilkovich. 1970. "Seismicity and Principal Seismic Effects". *Geophysical Journal International* 21 (3): 323-335. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1970.tb01795.x>
- Ordaz, Mario, Francesco Martinelli, V. D'Amico y C. Meletti. 2013. "CRISIS2008: A Flexible Tool to Perform Probabilistic Seismic Hazard Assessment". *Seismological Research Letters* 84 (3): 495-504. <https://doi.org/10.1785/0220120067>
- Ordaz, Mario y M. A. Salgado-Gálvez. 2020. *R-CRISIS Validation and Verification Document Program for Probabilistic Seismic Hazard Analysis*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería UNAM, Evaluación de Riesgos Naturales (ERN). [bit.ly/4cwdehH](http://bit.ly/4cwdehH)
- Ordaz, Mario, Omar Darío Cardona, Mario A. Salgado, Gabriel A. Bernal, Shri Krishna y Daniela Zuloaga Romero. 2015. "Evaluación probabilista de la amenaza sísmica a nivel mundial". Presentado en el *VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Bogotá, Colombia. Del 27 al 29 de mayo de 2015. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/28415/Ordaz%20et%20al\\_2015.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/28415/Ordaz%20et%20al_2015.pdf)
- Ordaz, Mario y Sebastián Giraldo. 2018. "Joint Maximum Likelihood Estimators for Gutenberg-Richter Parameters  $\lambda$  and  $\beta$  Using Subcatalogs". *Earthquake Spectra* 34 (1): 301-312. <https://doi.org/10.1193/092816EQS162M>
- Pagani, Marco, Julio García-Peláez, Robin Gee, Kendra Johnson, Valerio Poggi, Vitor Silva, Michele Simionato, Richard Styron, Daniele Viganò, Laurentiu Danciu, Damiano Monelli y Graeme Weatherill. 2020. "The 2018 Version of the Global Earthquake Model: Hazard Component". *Earthquake Spectra* 36 (1\suppl): 226-251. <https://doi.org/10.1177/8755293020931866>
- REDLAC (Grupo Regional de Riesgo, Emergencia y Desastre de América Latina y el Caribe). 2003. "Panorama de la tendencia de la gestión del riesgo de desastre en Centroamérica". Consultado el 10 de marzo de 2024. <https://www.eird.org/cd/redlac/introduccion/agradecimientos.html>
- Rosenblueth, Emilio. 1964. "Probabilistic Design to Resist Earthquakes". *Journal of Engineering Mechanics Division* 90 (5): 189-220. <https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0000536>
- Rosenblueth, Emilio y Mario Ordaz. 1987. "Use of Seismic Data from Similar Regions". *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 15 (5): 19-34. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290150507>
- Sánchez Carmona, Fernando, Alexis Ordaz Hernández, José Emilio Baró Suárez y Miguel Ángel Balderas Plata. 2022. "Cartografía de la respuesta sísmica local: una contribución a la gestión del riesgo en la zona metropolitana del Valle de Toluca". *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 42 (2): 509-531. <https://doi.org/10.5209/aguc.85182>
- Sánchez-Flores, Rodrigo Martín. 2015. "Evaluación del peligro sísmico en el municipio de Naucalpan de Juárez, Edo. de México". Tesis de maestría en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Sawires, Rashad, Miguel A. Santoyo, José A. Peláez y Jesús Henares. 2021. "Western Mexico Seismic Source Model

- for the Seismic Hazard Assessment of the Jalisco-Colima-Michoacán Region". *Natural Hazards* 105: 2819-2867. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04426-6>
- SEDATU (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano). 2020. "MGN 2020 Municipio". Gobierno de México Desarrollo Territorial. <https://ide.sedatu.gob.mx/#/>
- Seed, H. Bolton y Izzat M. Idriss. 1971. "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 97 (9): 1249-1273 <https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001662>
- SEIM. 2019. "Sistema Estatal de Información urbana, Metropolitana y Vivienda". Plataforma del Gobierno de México. <https://seiumevi.edomex.gob.mx/SIGZonasMetropolitanas/inicio/geoportal.do>
- SGR (Secretaría de Gestión de Riesgos). 2016. *Informe de situación N° 65 - 16/05/2016 Terremoto 7,8° - Pedernales*. Quito: Secretaría de Gestión de Riesgos de Ecuador.
- Singh, Shri Krishna, A. Iglesias, M. Ordaz, X. Pérez-Campos y L. Quintanar. 2014. "Reply to Comment on 'Estimation of Ground Motion in Mexico City from a Repeat of the M 7.0 Acambay Earthquake of 1912'". *Bulletin of the Seismological Society of America* 104 (5): 2565-2566. <https://doi.org/10.1785/0120140217>
- Singh, Shri Krishna, José Francisco Pacheco, Xyoli Pérez-Campos, Mario Ordaz y Eduardo Reinoso. 2015. "The 6 September 1997 (Mw4.5) Coatzacoalcos-Minatitlán, Veracruz, Mexico Earthquake: Implications for Tectonics and Seismic Hazard of the Region". *Geofísica Internacional* 54 (3): 289-298. <https://doi.org/10.1016/j.gi.2015.08.001>
- SSN (Servicio Sismológico Nacional). 2022. "Catálogo de sismos". Instituto de Geofísica - Universidad Nacional Autónoma de México. <https://doi.org/10.21766/SSNMX/EC/MX>
- Suárez, Gerardo. 2022. "Catálogo de Sismos Históricos de México". Instituto de Geofísica - Universidad Nacional Autónoma de México. <http://sismoshistoricos.org/#team>
- Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering. 1999. *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards*. Tokyo: The Japanese Geotechnical Society.
- Utsu, Tokuji. 1965. "A Method for Determining the Value of b in a Formula Log n=a-bM Showing the Magnitude Frequency Relation for Earthquakes". *Geophysical bulletin of Hokkaido University* 13: 99-103.
- Xu, Wei Jin. 2019. "Probabilistic Seismic Hazard Assessment Using Spatially Smoothed Seismicity in North China Seismic Zone". *Journal of Seismology* 23 (3): 613-622. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09825-2>
- Youngs, R. R., S. J. Chiou, W. J. Silva y J. R. Humphrey. 1997. "Strong Ground Motion Attenuation Relationships for Subduction Zone Earthquakes". *Seismological Research Letters* 68 (1): 58-73. <https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.58>
- Zúñiga, F. Ramón, Gerardo Suárez, Ángel Figueroa-Soto y Avith Mendoza. 2017. "A First-Order Seismotectonic Regionalization of Mexico for Seismic Hazard and Risk Estimation". *Journal of Seismology* 21 (6): 1295-1322. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9666-o>

### Fernando Sánchez Carmona

Licenciado en Geología Ambiental y Recursos Hídricos, magíster en Análisis Espacial y Geoinformática. Estudiante del doctorado en Geografía y Desarrollo Geotecnológico. Profesor de asignatura de la Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México.

### Alexis Ordaz Hernández

Doctor en Ciencias Técnicas, profesor investigador de la Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. Línea de investigación Estudios del espacio geográfico para la resiliencia y sustentabilidad del territorio.

### Luis Miguel Espinoza Rodríguez

Doctor en Geografía, profesor investigador de la Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. Línea de investigación Geografía Física.

### Elkin de Jesús Salcedo Hurtado

Doctor en Física y Matemáticas (especialidad en Geofísica), profesor investigador en la Universidad del Valle, Colombia. Línea de investigación Sismicidad Regional y Sismotectónica.