

EVALUACIÓN DE LOS ACELEROGRAMAS SINTÉTICOS DEFINIDOS EN LAS NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA EL DISEÑO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE MÉXICO

Alhelí S. López Castañeda⁽¹⁾ y Miguel Á. Jaimes Téllez⁽²⁾

RESUMEN

Se presenta una evaluación de los acelerogramas definidos en las Normas Técnicas Complementarias (NTC) para el diseño sísmico. El estudio se basa en análisis probabilistas de peligro sísmico, simulación de acelerogramas consistentes con espectros de peligro uniforme y comparación con los registros de las NTC-2023. Los resultados indican que dichos acelerogramas no satisfacen las demandas de intensidad asociadas a la duración del movimiento del suelo; lo anterior genera estimaciones sesgadas de la respuesta estructural inelástica. Como caso de estudio, se presentan espectros de respuesta de desplazamiento y energía histerética para tres sitios ubicados en la Ciudad de México; específicamente, se analizan sistemas de un solo grado de libertad cuyo comportamiento se representa mediante un modelo bilineal. Asimismo, se analiza la evolución temporal del período característico del suelo mediante modelos exponenciales, destacando su influencia en la duración significativa del movimiento fuerte y su impacto en las curvas de peligro basadas en duración. Se recomienda la actualización continua de los modelos utilizados para la estimación de parámetros del movimiento del suelo que intervienen en la caracterización de los acelerogramas provistos por las NTC.

Palabras Clave: acelerograma; espectro de peligro uniforme; duración del movimiento del suelo; NTC; análisis de peligro sísmico; período de retorno; período del suelo

EVALUATION OF THE SYNTHETIC ACCELEROGRAMS DEFINED IN THE MEXICO CITY TECHNICAL DESIGN STANDARDS FOR SEISMIC DESIGN

ABSTRACT

An analysis of the accelerograms defined in the Mexico City Technical Design Standards (NTC) is presented. The study is based on probabilistic seismic hazard analysis, hazard-consistent ground-motion simulation, and comparison with the accelerograms provided in NTC-2023. The results indicate that these accelerograms do not meet the intensity demands associated with ground-motion duration, leading to biased estimates of the inelastic structural response. Displacement and hysteretic energy response spectra are presented for three sites in Mexico City, analyzing single-degree-of-freedom systems modeled with a bilinear constitutive law. In addition, the temporal evolution of the characteristic site period is analyzed using exponential models, highlighting its influence on the expected duration of strong ground motion and its impact on duration-based hazard curves. It is

¹ Investigadora posdoctoral, Coordinación de Ingeniería Estructural, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México. ALopezCa@iunam.com.mx

² Investigador titular, Coordinación de Ingeniería Estructural, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México. MJaimest@iingen.unam.mx

recommended that the models used to estimate the ground-motion parameters involved in the characterization of the NTC accelerograms be continuously updated.

Keywords: accelerogram; uniform hazard spectra; strong-motion duration; NTC; seismic hazard analysis; return period; soil period

INTRODUCCIÓN

La influencia de los movimientos del suelo en la respuesta no lineal de las estructuras ha sido ampliamente investigada mediante distintas técnicas de generación y simulación de acelerogramas. En particular, para la Ciudad de México se dispone actualmente de bases de datos instrumentales con registros acumulados por más de cuatro décadas que permiten estimar de manera confiable los parámetros del movimiento del suelo que caracterizan dichos acelerogramas.

La duración del movimiento fuerte ha sido reconocida como un parámetro relevante en la evaluación del daño estructural debido a su asociación con efectos acumulativos de degradación y disipación histerética de energía (Bommer y Martínez-Pereira, 1999; Hancock y Bommer, 2007; Chandramohan et al., 2016). Asimismo, diferencias en la duración y en el contenido de frecuencias del movimiento del suelo en función del mecanismo focal y las condiciones de propagación han sido documentadas en diversos estudios, lo que puede traducirse en demandas sísmicas distintas para sistemas estructurales similares (Molas y Yamazaki, 1995; Furumura y Singh, 2002). Estos aspectos resaltan la importancia de considerar la duración del movimiento del suelo como un parámetro adicional en la selección y simulación de acelerogramas para análisis dinámicos.

Generalmente, la elección de los acelerogramas para la evaluación de infraestructura se determina de acuerdo con los criterios establecidos en las normas de diseño estructural, las cuales señalan que los acelerogramas deben presentar espectros de respuesta comparables con un espectro objetivo asociado a uno o varios escenarios sísmicos. En este contexto, diversas normativas internacionales —como ASCE 7 (ASCE, 2022), Eurocode 8 (CEN, 2010) y guías técnicas como NIST GCR 11-917-15 (NIST, 2011)— establecen lineamientos para la selección y escalamiento de registros sísmicos en análisis dinámicos. Si el escenario sísmico está relacionado con un período de retorno, T_r , el espectro objetivo se define por un espectro de peligro uniforme. Por ejemplo, las NTC-2023 consideran espectros de peligro uniforme para valores de T_r de 250 años y 475 años (SOS-CDMX, 2023).

Las recomendaciones de diseño estructural delimitan el número de acelerogramas que deben emplearse para evaluar un sistema estructural. Sin embargo, en la mayoría de los casos no se cuenta con el mínimo requerido de registros reales para el sitio de interés, lo que obliga a realizar procesos de escalamiento y/o simulación. Entre los métodos de escalamiento más utilizados se encuentran: (i) la media geométrica de pares de acelerogramas, (ii) el emparejamiento espectral y (iii) el escalamiento de un parámetro espectral de respuesta asociado al período elástico fundamental, T_e (Huang et al., 2011). Este último método se emplea ampliamente en análisis dinámicos incrementales (IDA, por sus siglas en inglés), pues permite aislar el efecto de diferentes parámetros del movimiento del suelo manteniendo únicamente la ordenada espectral objetivo seleccionada en la respuesta estructural. Criterios similares de selección y escalamiento han sido incorporados en recomendaciones internacionales recientes (ASCE, 2022; NIST, 2011). No obstante, al no considerar la duración ni otros parámetros basados en amplitud y frecuencia, se incurre en una representación incompleta del fenómeno del movimiento del suelo. Por otro lado, diversas metodologías —como las basadas en la teoría de vibración aleatoria— permiten simular registros de movimiento del suelo preservando sus características más relevantes, incluida su duración.

Para obtener estimaciones de los parámetros que describen la amplitud, el contenido de frecuencias y la duración de los acelerogramas, se requieren análisis probabilistas de peligro sísmico (PSHA, por sus siglas en inglés). En términos generales, un PSHA integra información de los movimientos del suelo causados por la gama completa de sismos que pueden afectar un sitio, con el fin de estimar la probabilidad de excedencia de un nivel de intensidad dado. Comúnmente, los niveles de movimiento del suelo se estiman a partir de ecuaciones de predicción del movimiento (GMPE, por sus siglas en inglés), anteriormente conocidas como relaciones de atenuación. Para la Ciudad de México existe un número significativo de GMPEs que permiten estimar parámetros relacionados con la amplitud y el contenido de frecuencias; en contraste, relativamente pocos estudios han desarrollado GMPEs para la duración de los movimientos sísmicos (Douglas, 2022; López-Castañeda, 2022).

El objetivo de este estudio es aplicar criterios de selección y simulación de acelerogramas —descritos brevemente en los párrafos anteriores— para evaluar de manera crítica los acelerogramas provistos por las NTC-2023. El trabajo contempla la simulación de una base de datos completa de acelerogramas para tres sitios de análisis (CUP5, UC44 y BO39), así como la evaluación de la respuesta sísmica de sistemas de un solo grado de libertad cuyo comportamiento se representa mediante un modelo constitutivo bilineal. Además, se analiza la evolución temporal del período característico del suelo, T_s , mediante modelos exponenciales, con el propósito de estimar su influencia en la duración del movimiento fuerte y en las curvas de peligro asociadas a este parámetro.

Para clarificar el alcance del trabajo, se enumeran las contribuciones principales del estudio:

1. Desarrollo de una nueva GMPE para estimar parámetros de amplitud del movimiento del suelo generados por sismos de profundidad intermedia en la Zona A, que caracteriza sitios de suelo duro o roca, basada en un modelo de efectos mixtos y en una base de datos actualizada.
2. Construcción de espectros de peligro uniforme y curvas de peligro para la duración del movimiento del suelo, integrando de forma consistente la contribución de sismos de subducción e intermedios y niveles de amenaza asociados a períodos de retorno T_r de 250 y 475 años.
3. Comparación detallada entre los acelerogramas NTC-2023 y acelerogramas simulados de manera consistente con la intensidad, evaluando su impacto en la respuesta estructural elástica e inelástica (desplazamiento y energía histerética).
4. Actualización de un modelo exponencial para la evolución temporal de T_s empleando registros de 1985–2024, y evaluación de su efecto sobre la duración del movimiento y en las curvas de peligro futuras.
5. Cuantificación de la influencia de la duración del movimiento fuerte en la demanda inelástica, mediante análisis no lineales de sistemas de un solo grado de libertad bilineales y comparación directa entre escenarios derivados de acelerogramas simulados y acelerogramas provistos por las NTC-2023.

METODOLOGÍA

Este artículo abarca un espectro amplio de análisis, que va desde la definición de la amenaza sísmica mediante estudios probabilistas de peligro, hasta la evaluación estructural inelástica con acelerogramas simulados. A grandes rasgos, el trabajo se desarrolló en cuatro etapas principales:

- a. Construcción de la base de datos

- Se recopilaron registros sísmicos de las estaciones CUP5, UC44 y BO39, correspondientes a diferentes condiciones de sitio en la Ciudad de México.
 - Se seleccionaron acelerogramas de sismos de subducción y de profundidad intermedia ocurridos entre 1985 y 2024.
 - Los registros se acotaron mediante un umbral de aceleración de 2 cm/s^2 para estandarizar la duración significativa relativa, D_{Sr} .
- b. Estimación del peligro sísmico
- Se aplicaron PSHA considerando la contribución de sismos de subducción e intermedios.
 - Se utilizaron GMPEs para amplitud y contenido de frecuencias, además de una nueva desarrollada para D_{Sr} en la Zona A.
 - Se calcularon espectros de peligro uniforme y curvas de excedencia para períodos de retorno T_r de 250 y 475 años.
- c. Simulación de acelerogramas
- Se generaron acelerogramas sintéticos utilizando el programa SIMQKE, a partir de espectros de peligro uniforme como espectro objetivo.
 - Se simularon ocho acelerogramas por sitio y por tipo de mecanismo focal, considerando únicamente la fase intensa del movimiento.
 - Los acelerogramas se validaron comparando sus espectros de respuesta elásticos con los espectros objetivos definidos en este estudio y con los provistos por las NTC-2023.
- d. Evaluación estructural
- Se analizaron sistemas de un solo grado de libertad (SDOF) con comportamiento bilineal, definidos por ductilidad ($\mu_e = 1, 2, 3, 4$) y rigidez secundaria ($\beta_e = 0.25$).
 - Se realizaron análisis dinámicos no lineales para obtener espectros de respuesta inelásticos.
 - Se evaluaron dos parámetros principales: desplazamiento máximo, δ , y energía histerética disipada, E_h .
 - Se compararon los resultados obtenidos con acelerogramas simulados y con los acelerogramas provistos por las NTC-2023, destacando las diferencias atribuibles a la duración del movimiento fuerte.

Las etapas anteriores se desarrollan en las secciones siguientes: el PSHA y los espectros de peligro uniforme se describen en ‘Análisis de peligro sísmico’ y ‘Espectro de peligro uniforme’; la duración se discute en ‘Duración del movimiento del suelo’; y la evaluación inelástica en ‘Respuesta estructural’.

ANÁLISIS DE PELIGRO SÍSMICO

El diseño sismorresistente busca producir estructuras capaces de soportar un determinado movimiento del suelo sin sufrir daños excesivos. La intensidad del movimiento del suelo se determina habitualmente a partir de análisis de peligro sísmico, los cuales pueden ser deterministas o probabilistas.

Un análisis de peligro sísmico determinista (DSHA, por sus siglas en inglés) tiene como objetivo estimar el nivel esperado del movimiento del suelo a partir de un escenario sísmico particular. Generalmente se utilizan GMPEs para la estimación de los parámetros del movimiento del suelo que caracterizan el sitio

de interés en función de parámetros sismológicos que describen cuantitativamente la fuente del sismo, la trayectoria de propagación de las ondas entre el sitio y la fuente sísmica, y el tipo de suelo o perfil geológico del sitio. Una GMPE se obtiene mediante un proceso matemático de ajuste de datos conocido como análisis de regresión. En este caso, los modelos lineales de efectos mixtos —que son modelos estadísticos que contienen tanto efectos aleatorios como efectos fijos— se pueden expresar de forma matricial de la siguiente manera (Pinheiro y Bates, 2000):

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{Z}\mathbf{b} + \mathbf{e} \quad (1)$$

donde \mathbf{y} es un vector de respuestas de la variable dependiente Y (el parámetro del movimiento del suelo), $\boldsymbol{\alpha}$ es un vector de efectos fijos (los coeficientes del modelo), \mathbf{X} es una matriz de efectos fijos o de variables independientes (los parámetros sismológicos), \mathbf{b} es un vector de efectos aleatorios, \mathbf{Z} es una matriz de efectos aleatorios (comúnmente las columnas de \mathbf{Z} son un subconjunto de las columnas de \mathbf{X}), y \mathbf{e} es un vector de errores.

Dos supuestos habituales para los modelos de regresión de efectos mixtos son: (i) los términos de \mathbf{e} no están correlacionados entre sí y tienen distribuciones normales independientes e idénticas, con media cero y varianza σ^2 ; y (ii) tanto \mathbf{b} como \mathbf{e} son variables normalmente distribuidas con media $\mathbf{0}$ y varianzas $\sigma_b^2 = \sigma^2\boldsymbol{\Upsilon}$ y $\sigma_w^2 = \sigma^2\mathbf{I}$, respectivamente, donde $\boldsymbol{\Upsilon}$ es una matriz semidefinida positiva y simétrica parametrizada por un vector $\boldsymbol{\vartheta}$, \mathbf{e} \mathbf{I} es la matriz identidad. Además, se supone que los términos de \mathbf{b} son independientes entre sí y de los componentes de \mathbf{e} . Obsérvese que, si se descartan los efectos aleatorios, la forma de la ecuación (1) sería $\mathbf{y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\alpha} + \mathbf{e}$, que corresponde al modelo de regresión lineal clásico (Bates y Watts, 1988). Bajo la consideración de que \mathbf{b} y \mathbf{e} son dos variables aleatorias normalmente distribuidas, se tiene que $\mathbf{y} \sim N[\mathbf{X}\boldsymbol{\alpha}, \sigma^2(\mathbf{I} + \mathbf{Z}\boldsymbol{\Upsilon}\mathbf{Z}')]$, es decir, \mathbf{y} sigue una distribución normal multivariada con media $\mathbf{X}\boldsymbol{\alpha}$ y matriz de covarianza $\sigma^2(\mathbf{I} + \mathbf{Z}\boldsymbol{\Upsilon}\mathbf{Z}')$ (Demidenko, 2004).

Aunque un DSHA es un medio certero para estimar el nivel esperado del movimiento del suelo en un sitio determinado, no proporciona información sobre la probabilidad de ocurrencia del escenario sísmico considerado ni sobre el nivel de movimiento del suelo que podría esperarse durante un período de tiempo finito. Además, un DSHA no considera las incertidumbres asociadas con la ocurrencia, ubicación, tamaño y nivel resultante del movimiento del suelo de futuros sismos. Para abordar estas limitaciones se recurre al PSHA, el cual considera el conjunto completo de sismos asociados a distintas fuentes que podrían afectar el sitio de interés. Un PSHA no solo proporciona los niveles esperados del movimiento del suelo, sino también sus probabilidades de excedencia.

En esencia, un PSHA se basa en la ley de la probabilidad total para estimar la probabilidad de que un nivel del movimiento del suelo Y exceda un umbral y . Para fines ilustrativos, se consideran únicamente la magnitud de momento sísmico, M , y la distancia hipocentral, R , como las variables independientes, y suponiendo que ellas son independientes y están caracterizadas por funciones de densidad de probabilidad f_M y f_R , respectivamente, la probabilidad de excedencia se calcula como (Kramer, 1996):

$$P(Y > y) = \iint P(Y > y|m, r)f_M(m)f_R(r) dm dr \quad (2)$$

donde $P(Y > y|m, r)$ es la probabilidad de excedencia de y dado que M y R toman valores m y r . Considerando la contribución de N_S fuentes sísmicas, la tasa media anual de excedencia de y se puede calcular como (Kramer, 1996):

$$\lambda_y = \sum_{i=1}^{N_S} \lambda_{m_{0_i}} \iint P(Y > y|m, r)f_{M_i}(m)f_{R_i}(r) dm dr \quad (3)$$

donde λ_{m_0} es la tasa media anual a la que un sismo con magnitud igual a m_0 será excedido. Para aplicaciones de ingeniería, el periodo de retorno T_r se estima como el inverso de λ_y . Una curva de peligro se construye con los resultados de la ecuación (3) para un número finito de niveles del movimiento del suelo y .

Con base en esta teoría, a continuación se presentan los niveles de intensidad del movimiento del suelo esperados para periodos de retorno T_r de 250 y 475 años. El alcance de este artículo se limita al análisis de los sitios donde se ubican las estaciones CUP5, UC44 y BO39. En el mapa central de la Figura 1 se muestran dichas estaciones de registro, indicando su localización geográfica y la escala de distancia. A la izquierda se presentan los acelerogramas correspondientes al evento ocurrido el 20 de marzo de 2012, con amplitudes máximas cercanas a 50 cm/s^2 , mientras que a la derecha se muestran los registros del evento ocurrido el 19 de septiembre de 2017, con picos de aceleración que alcanzan aproximadamente 100 cm/s^2 . Cada gráfico resalta en color púrpura la fase inicial del movimiento fuerte, lo que permite identificar la duración significativa del registro.

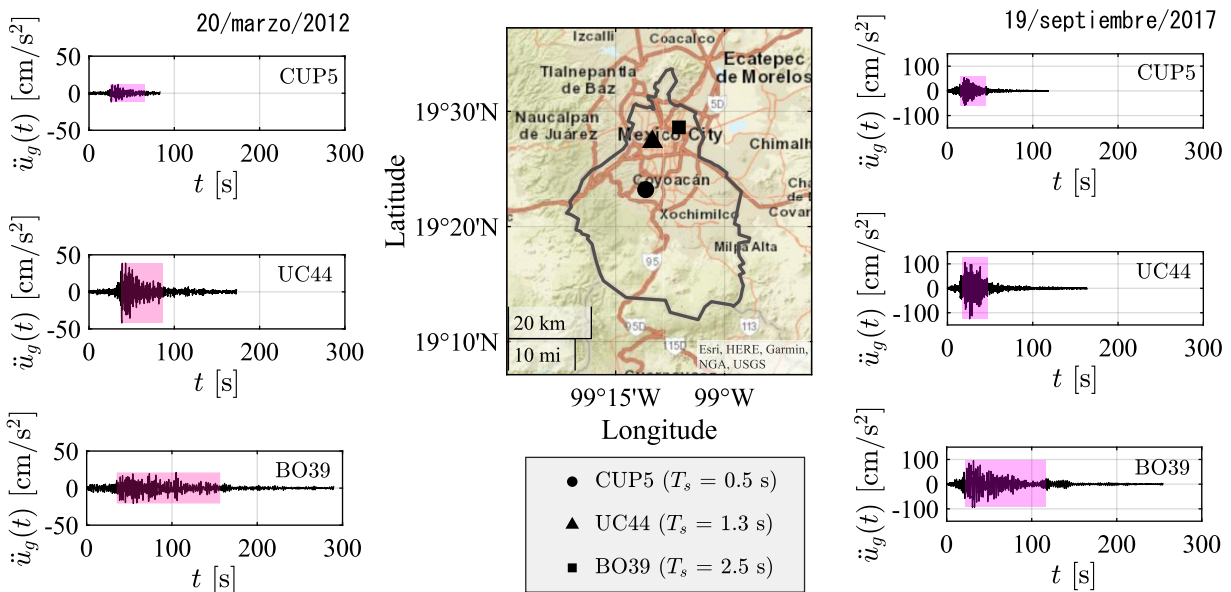


Figura 1. Ubicación de las estaciones CUP5, UC44 y BO39 junto con acelerogramas registrados en la componente Este-Oeste durante los sismos ocurridos el 20 de marzo de 2012 y 19 de septiembre 2017.

Los sitios CUP5, UC44 y BO39 se caracterizan por valores representativos del período dominante del suelo T_s de 0.5 s, 1.3 s y 2.5 s, respectivamente, correspondientes a la época actual. No obstante, se reconoce que T_s puede variar con el tiempo debido a procesos físicos en el subsuelo, es decir, T_s no es un valor estático, sino que puede modificarse por fenómenos como la consolidación, degradación o cambios en las propiedades dinámicas del suelo. Esta evolución temporal influye directamente en la duración significativa del movimiento fuerte y, en consecuencia, en las curvas de peligro sísmico basadas en duración. Lo que subraya la necesidad de considerar modelos actualizados y dinámicos en la evaluación de acelerogramas normativos. Por lo anterior, los resultados obtenidos se comparan con los provistos en las NTC-2023 a través del Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID).

ESPECTRO DE PELIGRO UNIFORME

Un espectro de peligro uniforme se construye generalmente a partir de curvas de peligro para la aceleración máxima del terreno, PGA , y las ordenadas espectrales de aceleración, S_a , asociadas a distintos períodos estructurales T_e . Considerando de manera independiente la contribución de sismos de subducción y de profundidad intermedia, la Figura 2 muestra los espectros de peligro uniforme para el sitio CUP5 asociados con valores de T_r de 250 y 475 años.

La construcción de los espectros mostrados en la Figura 2 se realizó evaluando numéricamente la ecuación (3) y considerando la caracterización probabilística de las fuentes sísmicas presentada en los trabajos de López-Castañeda et al. (2024a, b), utilizando GMPEs específicas para sitios ubicados en la Zona A. Para movimientos del suelo asociados a sismos de subducción se empleó la GMPE propuesta por López-Castañeda (2022), cuya forma funcional es:

$$\ln(PGA) \text{ o } \ln[S_a(T_e)] = \alpha_0 + (\alpha_1 + \alpha_2 M) \ln(R) + b_0 + e \quad (4)$$

donde $\ln(PGA)$, $\ln[S_a(T_e)]$ y $\ln(R)$ son los logaritmos naturales de PGA , $S_a(T_e)$ y R , respectivamente. La ecuación (4) se basa en un modelo lineal de efectos mixtos —ver ecuación (1)—; por lo tanto, los parámetros b_0 y e se caracterizan por distribuciones normales con media cero y varianzas σ_b^2 y σ_w^2 , respectivamente. La varianza total del modelo es $\sigma_T^2 = \sigma_b^2 + \sigma_w^2$. El análisis de regresión se realizó considerando únicamente la intersección, α_0 , como aleatoria.

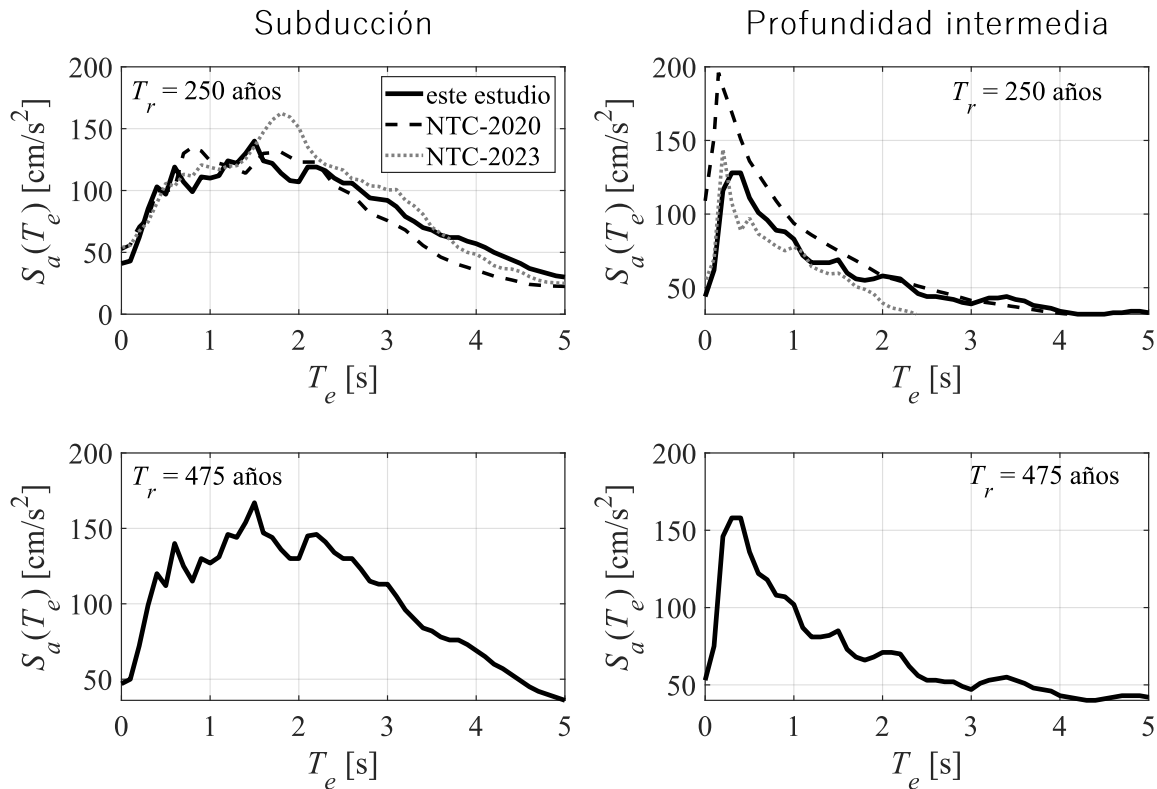


Figura 2. Espectros de peligro uniforme para el sitio CUP5, asociados a períodos de retorno T_r de 250 y 475 años.

Para la GMPE utilizada en el caso de sismos de profundidad intermedia, se realizó un análisis de regresión con la misma forma funcional dada en la ecuación (4). Los valores estimados de α_0 , α_1 , α_2 y σ_T^2 se presentan en la Tabla 1, a partir de la base de datos provista por López-Castañeda et al. (2024b). Los acelerogramas considerados en dicha base de datos corresponden a las componentes horizontales del movimiento del suelo y tienen PGA de al menos 3 cm/s^2 .

La escasez de GMPEs para sitios distintos al campus principal de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha limitado el desarrollo de curvas de peligro basadas en las ecuaciones (2) y (3). Si bien es posible desarrollar GMPEs para los sitios UC44 y BO39, ello excede el alcance de este estudio. Por consiguiente, los espectros de peligro uniforme para dichos sitios se construyeron a partir de relaciones espectrales. Los pasos considerados fueron los siguientes (López-Castañeda et al., 2024a):

1. Recopilar registros en las estaciones CUP5, UC44 y BO39 que incluyan acelerogramas en las dos componentes ortogonales horizontales del movimiento del suelo.
 - Para sismos de subducción se consideraron los eventos ocurridos el 14 de septiembre de 1995, 22 de enero de 2003, 1 de enero de 2004, 30 de junio de 2010, 20 de marzo y 11 de abril de 2012, 21 de agosto de 2013, 18 de abril, 8 y 10 de mayo de 2014, y 16 de febrero de 2018. Las estaciones CUP5 y BO39 registraron todos los eventos mencionados; la estación UC44 no registró el primero ni el quinto.
 - Para sismos de profundidad intermedia se consideraron los ocurridos el 15 y 21 de junio y 30 de septiembre de 1999, 11 de diciembre de 2011, 2 de abril y 15 de noviembre de 2012, 8 y 19 de septiembre de 2017. Las estaciones CUP5 y BO39 registraron todos los eventos; la estación UC44 no registró el quinto.
2. Obtener los espectros de respuesta de las componentes horizontales de cada registro y calcular su media geométrica.

Las Figuras 3 y 4 muestran ejemplos de espectros de respuesta y su media geométrica obtenidos en las estaciones CUP5, UC44 y BO39 durante sismos de subducción y de profundidad intermedia, respectivamente.
3. Calcular las relaciones espectrales dividiendo los espectros de media geométrica de UC44 y BO39 entre los de CUP5, y obtener su promedio.
 - La Figura 5 muestra los cocientes espectrales obtenidos y su promedio.
4. Obtener los espectros de peligro uniforme para UC44 y BO39 multiplicando el espectro de CUP5 por los cocientes espectrales calculados en el paso anterior.
 - Los espectros resultantes se presentan en las Figuras 6 y 7.

Tabla 1. Coeficientes estimados (α_0 , α_1 y α_2) y varianza total (σ_T^2) de la GMPE de PGA y $S_a(T_e)$ para sismos de profundidad intermedia.

T_e [s]	α_0	α_1	α_2	σ_T^2
<i>PGA</i>	13.7333	-3.6086	0.2309	0.1196
0.1	15.294	-3.8861	0.2366	0.1261
0.2	16.8461	-4.1324	0.2447	0.1868
0.3	16.069	-3.7635	0.2165	0.1801
0.4	14.8185	-3.5279	0.2162	0.2062
0.5	13.9713	-3.325	0.2067	0.2027
0.6	12.6925	-3.0595	0.1999	0.2284
0.7	13.1617	-3.3577	0.2284	0.2156
0.8	12.7817	-3.3883	0.2407	0.2038
0.9	13.5874	-3.674	0.2594	0.1926
1.0	13.8082	-3.8117	0.2716	0.1813
1.1	12.9359	-3.66	0.2704	0.1496
1.2	12.7449	-3.6205	0.2676	0.1661
1.3	12.7044	-3.7298	0.2826	0.1815
1.4	13.1685	-3.9301	0.2976	0.208
1.5	13.3767	-4.105	0.3153	0.2486
1.6	12.3071	-3.8846	0.3087	0.2294
1.7	11.6534	-3.7559	0.3049	0.2426
1.8	11.1619	-3.6949	0.3072	0.2396
1.9	11.7454	-3.9569	0.3289	0.2409
2.0	12.5778	-4.2258	0.3449	0.2778
2.1	13.0643	-4.3779	0.353	0.2995
2.2	13.135	-4.4288	0.3574	0.3085
2.3	11.6001	-4.0644	0.3424	0.2864
2.4	10.4209	-3.7492	0.3256	0.2704
2.5	10.0525	-3.653	0.3199	0.2697
2.6	9.3891	-3.5106	0.3148	0.2882
2.7	8.6953	-3.3406	0.3067	0.2954
2.8	7.5717	-3.0439	0.2912	0.2993
2.9	7.3975	-3.0005	0.2884	0.2907
3.0	7.2389	-2.9775	0.288	0.2907
3.1	6.6559	-2.8685	0.2862	0.3142
3.2	6.6627	-2.9309	0.2939	0.3424
3.3	7.1457	-3.0936	0.3045	0.3699
3.4	6.976	-3.0821	0.3063	0.3797
3.5	7.2383	-3.1843	0.3132	0.3922
3.6	7.1832	-3.1719	0.3117	0.4016
3.7	7.3923	-3.2204	0.3125	0.4107
3.8	7.8831	-3.3864	0.323	0.4096
3.9	8.0053	-3.4538	0.3285	0.4226
4.0	8.264	-3.5194	0.3306	0.4128
4.1	8.2819	-3.5443	0.3327	0.4218
4.2	7.8251	-3.4162	0.3252	0.4131
4.3	7.716	-3.3915	0.3237	0.425
4.4	7.4712	-3.3486	0.323	0.4279
4.5	7.1175	-3.2866	0.3224	0.4295
4.6	7.1564	-3.3359	0.3278	0.4355
4.8	6.3967	-3.1557	0.3205	0.4244
4.9	6.3628	-3.1972	0.3262	0.4364
5.0	5.8764	-3.0855	0.3215	0.4419

Los espectros de peligro uniforme para $T_r = 250$ años proporcionados por el SASID, tanto en la versión NTC-2020 como en la NTC-2023, para los sitios CUP5, UC44 y BO39, se muestran en las Figuras 2, 6 y 7. Se observan aproximaciones satisfactorias al comparar los espectros desarrollados en este estudio con los recomendados en las NTC-2020 para sismos de subducción. En contraste, se identifican diferencias relevantes al comparar los espectros de las NTC-2023 con los desarrollados en este estudio y con los de las NTC-2020.

Para el sitio UC44 (ver Figura 6), la ordenada espectral máxima del espectro de peligro uniforme de las NTC-2023 no corresponde al período del sitio ($T_s = 1.3$ s); además, la amplitud máxima es ~ 1.6 veces mayor a la observada en el espectro desarrollado en este estudio y en el de las NTC-2020. Para el sitio BO39 (ver Figura 7), la “meseta” del espectro abarca un intervalo de períodos extremadamente amplio, lo cual resulta discordante.

Respecto a los sismos de profundidad intermedia, no se observan aproximaciones satisfactorias al comparar los espectros desarrollados en este estudio con los recomendados en las NTC. No obstante, las ordenadas asociadas a la PGA pueden ser comparables. En general, los espectros de peligro uniforme desarrollados en este estudio siguen la forma de los espectros obtenidos de movimientos reales, como los mostrados en las Figuras 3 y 4. Las diferencias observadas entre los espectros desarrollados en este estudio y los provistos por las NTC para $T_r = 250$ años pueden deberse a distintas consideraciones en la identificación y caracterización de las fuentes sísmicas, así como en la forma en que se estimaron los parámetros que describen la amplitud del movimiento del suelo.

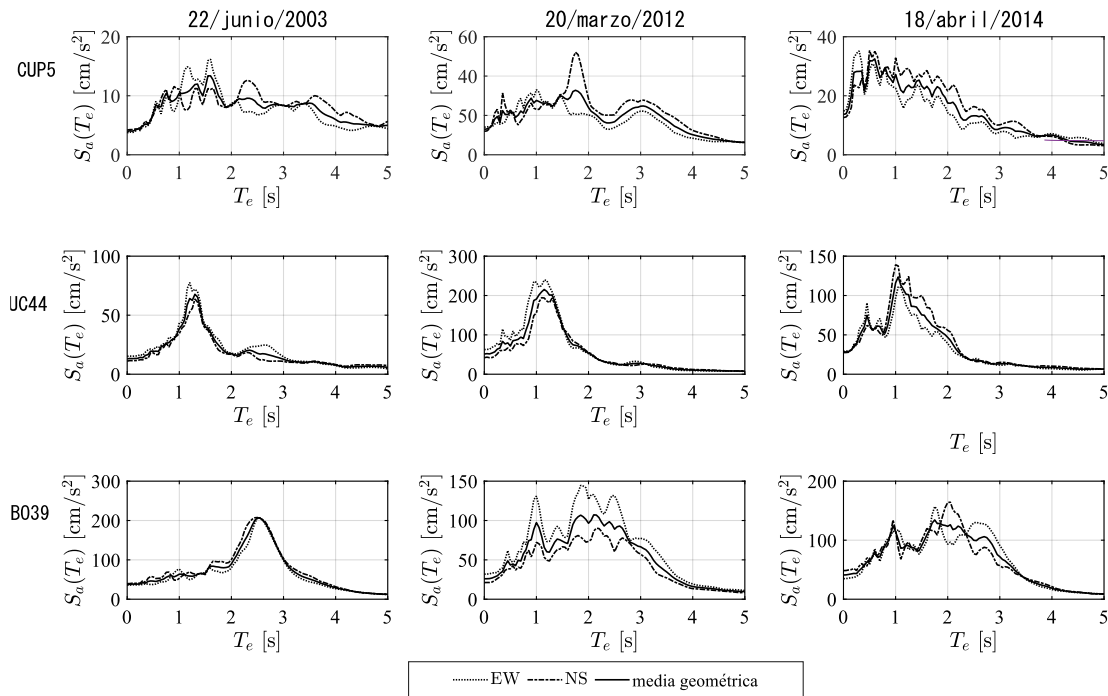


Figura 3. Espectros de respuesta de las componentes horizontales del movimiento del suelo en CUP5, UC44 y BO39 durante tres sismos de subducción.

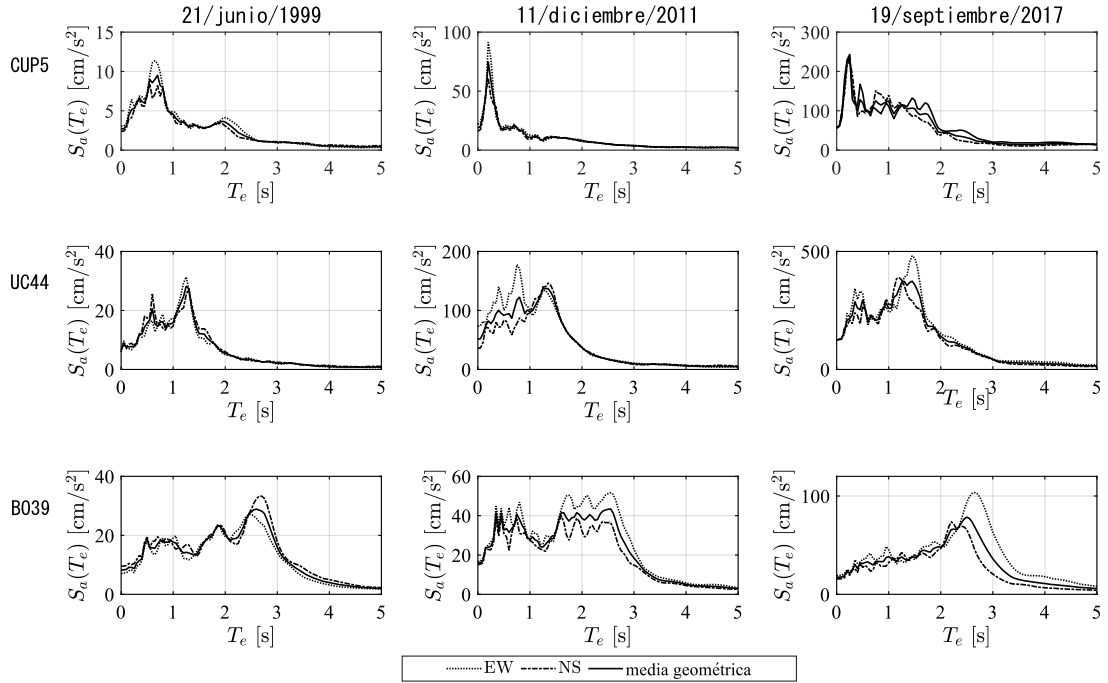


Figura 4. Espectros de respuesta de las componentes horizontales del movimiento del suelo en CUP5, UC44 y BO39 durante tres sismos de profundidad intermedia.

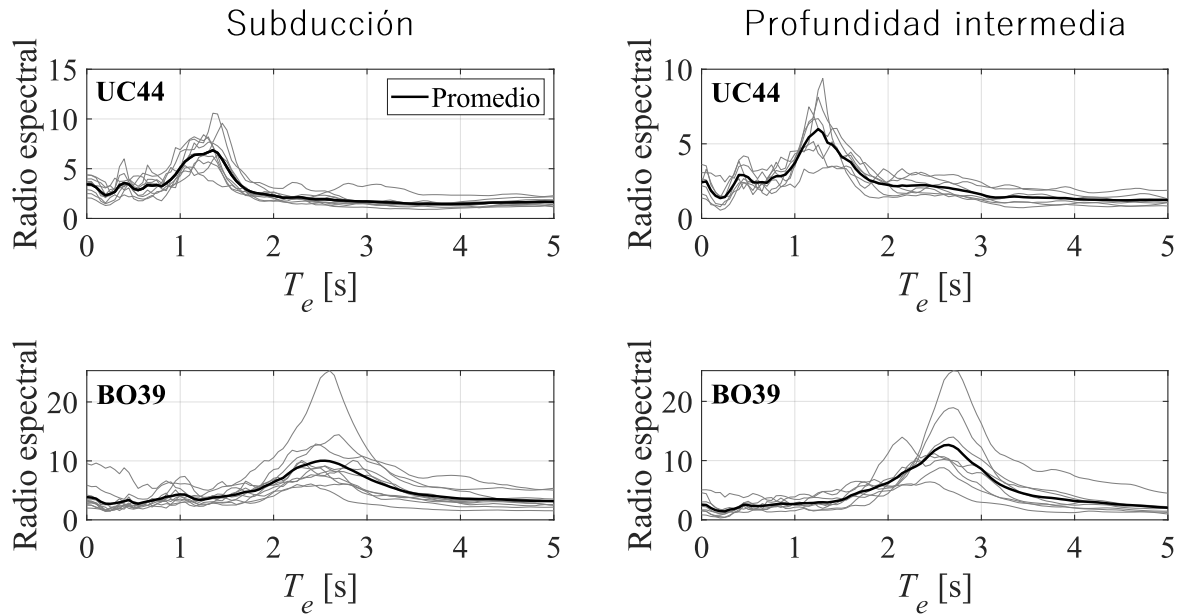


Figura 5. Relaciones espectrales calculadas entre sitios y su promedio.

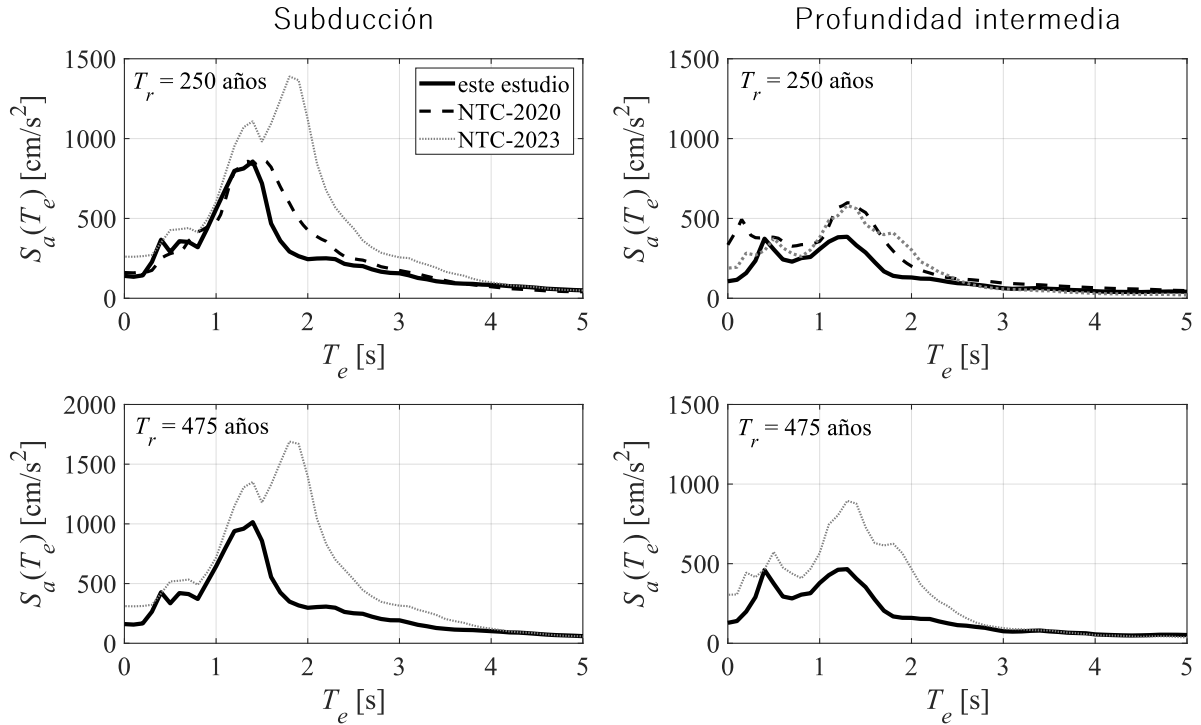


Figura 6. Espectros de peligro uniforme para el sitio UC44, asociados a períodos de retorno T_r de 250 y 475 años.

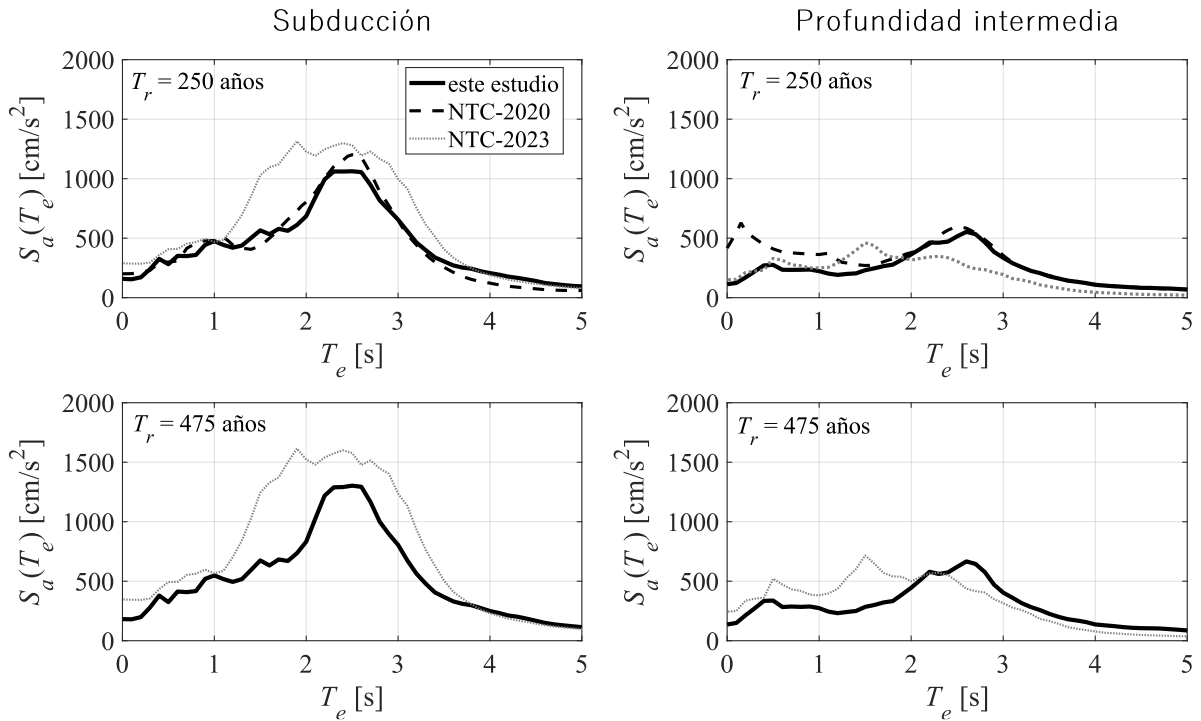


Figura 7. Espectros de peligro uniforme para el sitio BO39, asociados a períodos de retorno T_r de 250 y 475 años.

DURACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL SUELO

Bommer y Martínez-Pereira (1999) realizaron un extenso trabajo que resume los métodos utilizados por diferentes investigadores para estimar la duración del movimiento fuerte del suelo con fines de ingeniería. Ellos observaron que casi todos los métodos permiten estimar cuánto dura la fase intensa del movimiento del suelo a partir de un acelerograma. Dependiendo de los criterios empleados, Bommer y Martínez-Pereira (1999) agruparon los métodos en tres categorías genéricas: duración acotada, duración uniforme y duración significativa; de éstas, la última es la preferida por la comunidad científica.

La definición de la duración significativa se basa en la acumulación de energía en un acelerograma, representada por la integral del cuadrado de la aceleración, la velocidad o el desplazamiento del suelo. Si se utiliza la aceleración, la cantidad está relacionada con la intensidad de Arias, I_A , definida como (Arias, 1970):

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int \ddot{u}_g(t)^2 dt \quad (5)$$

donde $\ddot{u}_g(t)$ es la aceleración del movimiento del suelo en función del tiempo y g es la aceleración gravitacional. La duración significativa se define como el tiempo transcurrido entre los instantes en que I_A alcanza dos valores específicos, t_1 y t_2 .

López-Castañeda et al. (2024a, b) desarrollaron recientemente curvas de peligro para D_{Sr} , la cual se calcula como:

$$D_{Sr} = \int \{H[h(t) - t_1] - H[h(t) - t_2]\} dt \quad (6)$$

donde H es la función escalón de Heaviside, $t_1 = 0.05$ y $t_2 = 0.95$, y $h(t)$ es la intensidad de Arias normalizada:

$$h(t) = \frac{I_A(t)}{I_{Amax}} \quad (7)$$

con I_{Amax} como el máximo valor de I_A . Según López-Castañeda (2022), I_A debe evaluarse considerando una ventana de tiempo delimitada por un umbral de aceleración de 2 cm/s^2 .

Este acotamiento es necesario porque los registros de acelerogramas disponibles en la Ciudad de México, registrados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM y por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), presentan diferentes umbrales de disparo y memorias pre y post evento. Tales inconsistencias afectan el cálculo de D_{Sr} . Por ejemplo, dos dispositivos cercanos con memorias similares, pero umbrales distintos (8 cm/s^2 y 4 cm/s^2) registran la misma PGA pero duraciones totales diferentes. López-Castañeda y Reinoso (2021) muestran ejemplos de este efecto. Para estandarizar los registros, López-Castañeda (2022) propuso fijar el umbral mínimo en 2 cm/s^2 , ya que valores menores implicarían descartar registros históricos valiosos. La diferencia en D_{Sr} calculada con este criterio es trivial para fines de ingeniería cuando la PGA supera $\sim 15 \text{ cm/s}^2$. Los acelerogramas mostrados en la Figura 1 están acotados a dicho umbral de aceleración.

Con base en estos trabajos, las Figuras 8 y 9 muestran las curvas de peligro para D_{Sr} en los sitios CUP5, UC44 y BO39. La Tabla 2 resume los valores esperados de D_{Sr} asociados a períodos de retorno T_r de 250 y 475 años.

Por otro lado, el inciso c de la sección A.1 de las NTC-2023 establece lo siguiente para la Zona A:

“Este cálculo requiere que se especifique la duración del movimiento del suelo de entrada, D_B , que se tomará igual a:

$$D_B = \begin{cases} 80 \text{ s para sismos de subducción} \\ 40 \text{ s para sismos de profundidad intermedia} \end{cases} \quad (8)$$

Estas duraciones están asociadas a los eventos de subducción y profundidad intermedia que más contribuyen al peligro sísmico para el sismo base de diseño y el sismo infrecuente.”

El inciso d del mismo apartado de las NTC-2023 define la duración en superficie como:

“La duración del movimiento en la superficie, D_s , se calculará con la siguiente expresión:

$$D_s = D_B + 20(T_s - 0.5) \quad (9)$$

donde T_s se especifica en segundos y D_s se obtiene en segundos. Se deberá revisar el efecto del acortamiento futuro en el valor de T_s .”

La versión anterior (NTC-2020) especificaba que los valores de D_B dados en la ecuación (8):

“están asociadas a los eventos de subducción y profundidad intermedia que más contribuyen al peligro sísmico para un período de retorno de 250 años. En el caso de eventos de subducción, se trata de un evento con magnitud 7.8 a 265 km de distancia focal; para los eventos de profundidad intermedia, el sismo dominante tiene magnitud 7.5 y distancia focal de 110 km.”

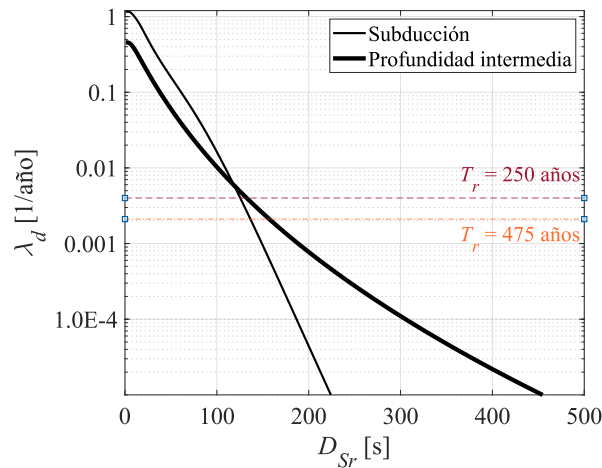


Figura 8. Curvas de peligro de D_{Sr} para el sitio CUP5.

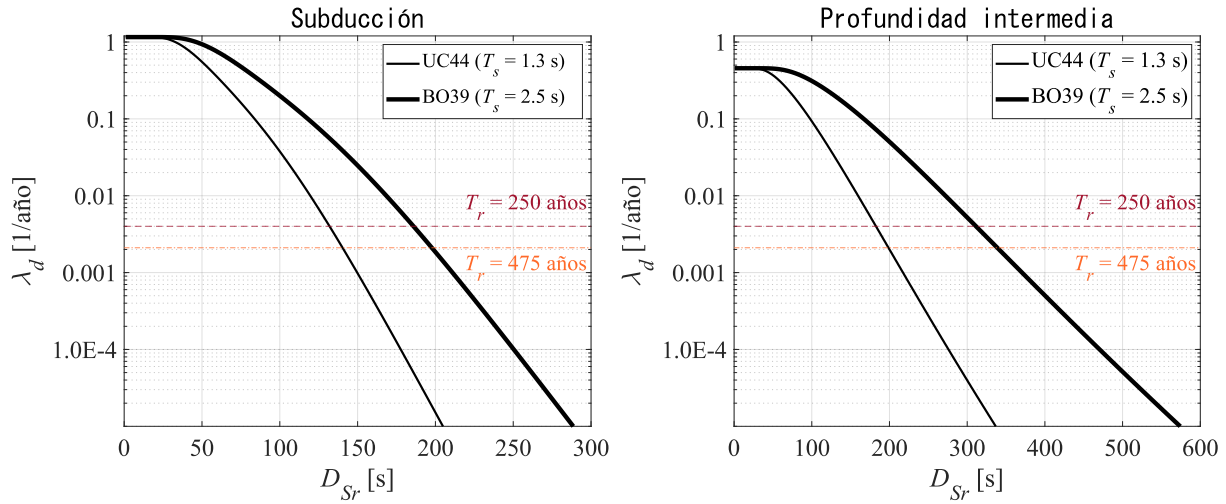


Figura 9. Curvas de peligro de D_{Sr} para los sitios UC44 y BO39.

Tabla 2. Valores esperados de D_{Sr} para períodos de retorno T_r de 250 y 475 años en los sitios CUP5, UC44 y BO39.

T_r	D_{Sr}					
	Subducción			Profundidad intermedia		
	CUP5	UC44	BO39	CUP5	UC44	BO39
250 años	125 s	131 s	185 s	132 s	183 s	311 s
475 años	137 s	140 s	198 s	157 s	198 s	339 s

La Tabla 3 resume los valores de D_s obtenidos con base en las ecuaciones (8) y (9). Los resultados muestran que las duraciones recomendadas en las NTC-2023 para seleccionar acelerogramas están subestimadas. Se destacan las siguientes observaciones para el sitio CUP5:

- Aplicando las GMPEs de López-Castañeda y Reinoso (2021) y López-Castañeda et al. (2024b), se estiman valores de D_{Sr} de 85 s y 92 s para sismos de subducción y profundidad intermedia, respectivamente. Estos valores son comparables a los dados en las NTC-2023, pero dichas normas definen la duración total del movimiento fuerte, no D_{Sr} .
- Si se considera el mismo criterio que para el espectro de diseño, los valores esperados de D_{Sr} alcanzan 125 s y 137 s para períodos de retorno T_r de 250 y 475 años, respectivamente, considerando sismos de subducción. Por lo tanto, los 80 s establecidos en las NTC-2023 subestiman la duración del movimiento fuerte. De manera similar, la subestimación se observa para duraciones asociadas a sismos de profundidad intermedia.

Tabla 3. Duración del movimiento del suelo en la superficie (D_s) según las NTC-2023 para sismos de subducción y de profundidad intermedia en los sitios CUP5, UC44 y BO39.

	Subducción			Profundidad intermedia		
	CUP5	UC44	BO39	CUP5	UC44	BO39
80 s	96 s	120 s		40 s	56 s	80 s

Observaciones similares se obtienen para sitios en las Zonas B y C, donde la relación entre T_s y la duración no es lineal, lo que sugiere que la ecuación (9) introduce sesgo.

Finalmente, Jaimes et al. (2024) estimaron la duración de movimientos ocasionados por sismos de profundidad intermedia en la Ciudad de México. Aunque sus resultados difieren de los de López-Castañeda et al. (2024b), también concluyen que las duraciones provistas por las NTC-2023 presentan discrepancias respecto a las estimaciones basadas en registros instrumentales.

RESPUESTA ESTRUCTURAL

En muchos casos no se cuenta con un número suficiente de acelerogramas reales específicos del sitio de interés para realizar múltiples análisis dinámicos no lineales, como los requeridos en un IDA. Por ello, se recurre a la simulación de acelerogramas. En un trabajo reciente, López-Castañeda et al. (2024a) propusieron simular acelerogramas para propósitos de diseño sísmico a partir de parámetros del movimiento del suelo —tanto de amplitud como de duración— consistentes con un mismo nivel de peligro (es decir, asociados a un mismo valor de T_r).

Siguiendo este enfoque, y con el objetivo de comparar la influencia de la duración del movimiento fuerte ocasionado por sismos de subducción y de profundidad intermedia en la respuesta estructural inelástica, se analizaron sistemas de un solo grado de libertad con diferentes frecuencias fundamentales. Esta comparación es relevante porque la respuesta del suelo en la Ciudad de México, y por ende la de las estructuras, puede diferir significativamente según el entorno tectónico que origina los movimientos (Montalvo-Arrieta et al., 2003; García et al., 2005; Jaimes y Reinoso, 2006; Singh et al., 2015). Por ejemplo, los sismos de profundidad intermedia tienden a afectar estructuras de baja altura debido a su mayor contenido de energía en altas frecuencias, mientras que los sismos de subducción afectan principalmente estructuras de largo período por su contenido predominante en frecuencias bajas.

El comportamiento estructural de los sistemas de un solo grado de libertad se representó mediante un modelo constitutivo bilineal, definido por μ_e y β_e . La ductilidad μ_e se fijó en 1 (respuesta elástica), 2, 3 y 4, mientras que β_e se fijó en 0.25. Análisis preliminares mostraron que la variación en β_e en el intervalo 0–0.25 tuvo poca influencia en los desplazamientos inelásticos máximos, por lo que se adoptó únicamente el valor de 0.25. Cabe señalar que este ejemplo busca cubrir casos generales y no profundiza en detalles específicos del comportamiento estructural; por ello, el modelo histerético seleccionado no considera, por ejemplo, la degradación de la rigidez.

Los sistemas se sometieron a acelerogramas simulados representativos de los sitios CUP5, UC44 y BO39. Se generaron ocho acelerogramas por sitio y por tipo de mecanismo focal, utilizando ventanas de tiempo delimitadas mediante D_{S_r} que representan la fase intensa del movimiento. Los acelerogramas se simularon considerando los espectros de peligro uniforme para $T_r = 250$ años provistos en las NTC-2023 y los valores de D_{S_r} asociados a dicho período de retorno (ver Tabla 2). Los espectros de respuesta elásticos de los acelerogramas simulados se presentan en las Figuras 16 y 17. Con estos registros se realizaron análisis dinámicos no lineales para construir espectros de respuesta inelásticos. El desplazamiento δ y E_h se seleccionaron como parámetros de evaluación. En este estudio se reportan principalmente valores centrales (medianas) con el propósito de facilitar la comparación entre escenarios derivados de acelerogramas simulados y acelerogramas provistos por las NTC-2023. La cuantificación detallada de la dispersión asociada a estos resultados se reconoce como un aspecto relevante que podrá abordarse en trabajos posteriores. Las Figuras 10 y 11 muestran la mediana de los espectros de δ y E_h asociados a sismos de subducción y de profundidad intermedia, respectivamente. En el intervalo de períodos analizado, se observa que los sismos de subducción generan mayores demandas a los sistemas analizados.

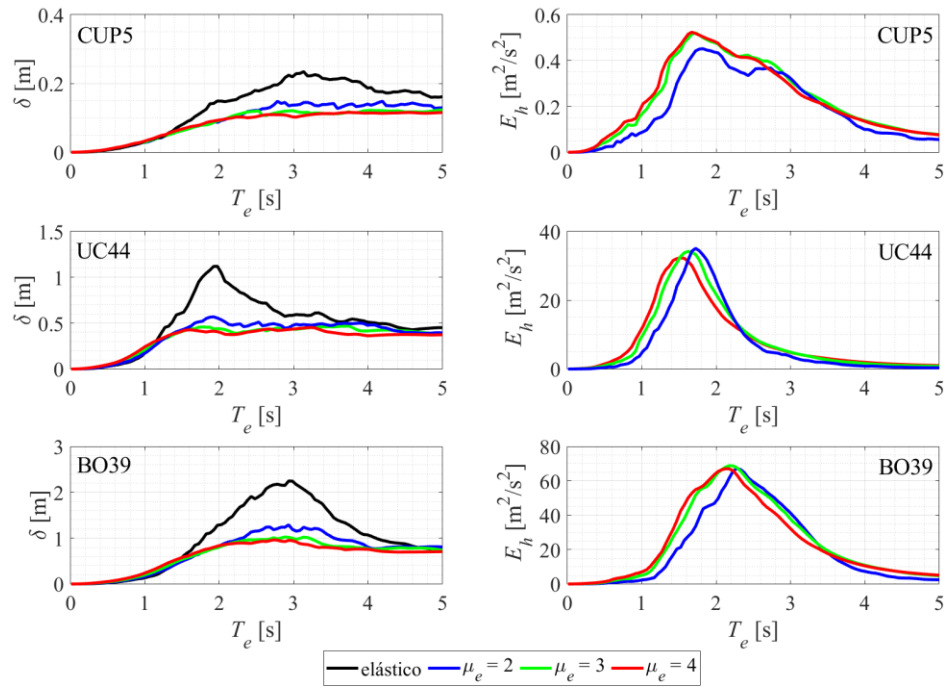


Figura 10. Medianas de los espectros de δ y E_h obtenidos con acelerogramas de sismos de subducción.

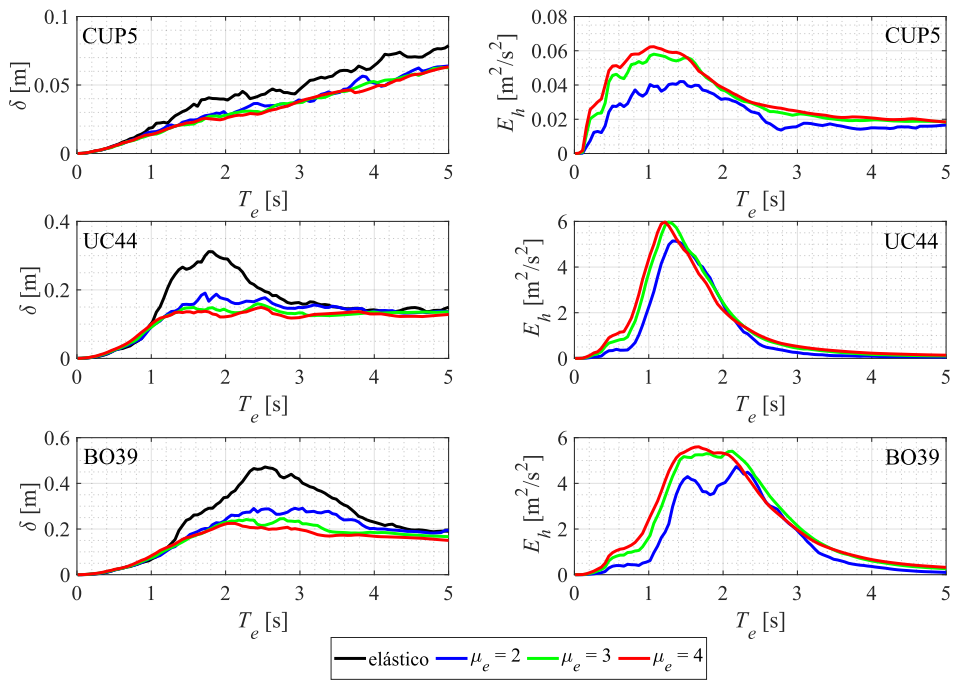


Figura 11. Medianas de los espectros de δ y E_h obtenidos con acelerogramas de sismos de profundidad intermedia.

Se realizó también una comparación entre los espectros de respuesta inelástica obtenidos con los acelerogramas provistos por las NTC-2023 y los generados en este estudio. Para una comparación justa, se utilizó únicamente la fase de movimiento fuerte de los acelerogramas, delimitada por 2 cm/s^2 . Las Figuras 12 y 13 muestran los espectros asociados a sismos de subducción y profundidad intermedia, respectivamente. Se observa que los espectros de desplazamiento y de energía histerética derivados de los acelerogramas simulados en este estudio presentan mayores amplitudes que los obtenidos con los acelerogramas de las NTC-2023, debido a que los valores de duración considerados en este estudio son mayores.

Las diferencias entre los espectros de desplazamiento obtenidos con los acelerogramas simulados en este estudio y los provistos por las NTC-2023 son menores que las observadas en los espectros de energía histerética. Mientras que las diferencias en E_h se deben principalmente a los distintos valores de duración del movimiento, las diferencias en δ se atribuyen también a otros factores. Si ambos conjuntos de acelerogramas se hubieran simulado con un método similar, los cocientes entre los espectros serían casi horizontales en torno a 1, al menos para respuestas elásticas. Sin embargo, como se observa en las Figuras 10 a 13, existen intervalos de períodos estructurales donde los espectros de desplazamiento divergen, lo que podría implicar una subestimación del desplazamiento estructural en las NTC-2023, especialmente en sitios con períodos largos.

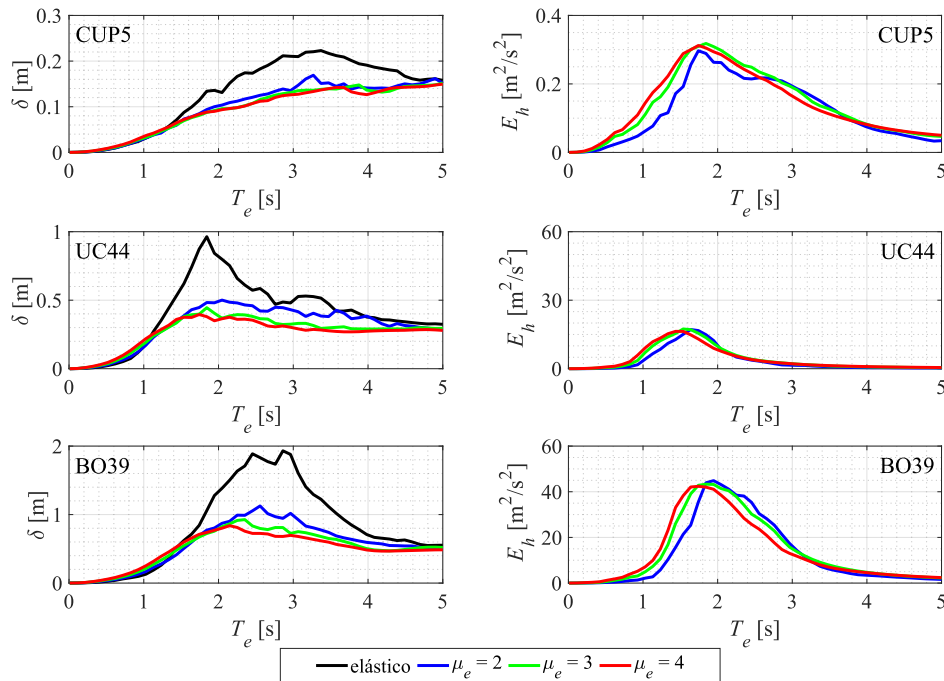


Figura 12. Medianas de los espectros de δ y E_h obtenidos con acelerogramas de sismos de subducción provistos por las NTC-2023.

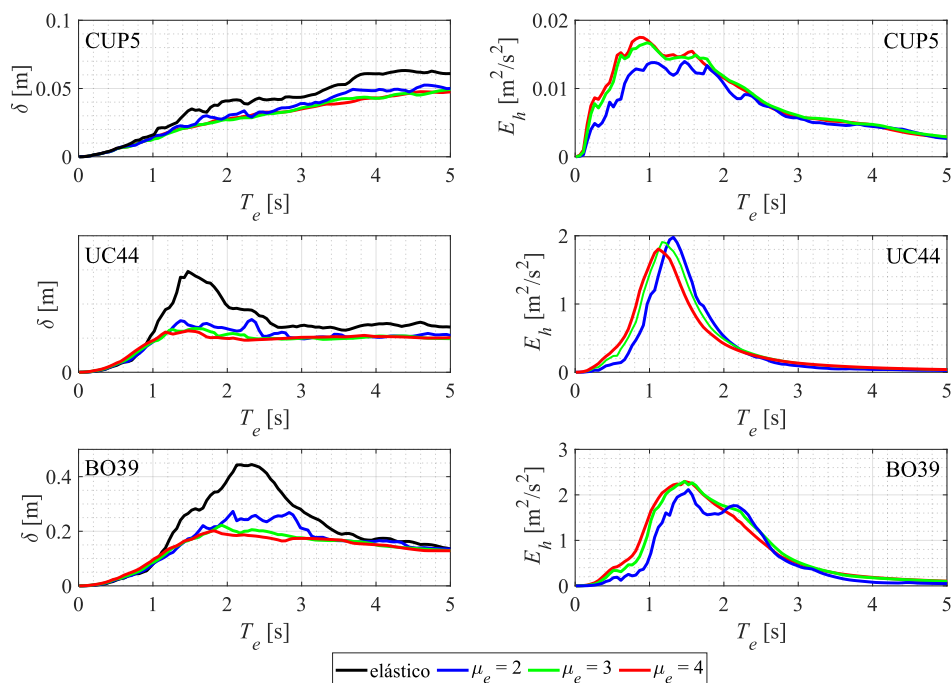


Figura 13. Medianas de los espectros de δ y E_h obtenidos con acelerogramas de sismos de profundidad intermedia provistos por las NTC-2023.

En este estudio se utilizó el programa SIMQKE para simular los acelerogramas. Este software estima una función de densidad espectral de potencia a partir de un espectro de respuesta objetivo (en este caso, el espectro de peligro uniforme) y, mediante iteraciones, genera acelerogramas artificiales estadísticamente independientes que reproducen dicho espectro (Gasparini y Vanmarcke, 1976). Cabe recordar que solo se simuló las ventanas de tiempo de fase intensa de los acelerogramas, por lo que fue necesario establecer envolventes de amplitud-duración consistentes con acelerogramas registrados en cada sitio durante terremotos de gran amplitud (ver Figura 1).

Con el fin de evaluar el grado de ajuste espectral de los acelerogramas utilizados, a continuación se comparan los espectros elásticos derivados de los registros provistos por las NTC-2023 con aquellos generados en este estudio. Las Figuras 14 y 15 presentan un resumen de los espectros de aceleración y desplazamiento elástico de los acelerogramas proporcionados por las NTC-2023 para $T_r = 250$ años para sismos de subducción y de profundidad intermedia, respectivamente. De manera análoga, las Figuras 16 y 17 muestran los espectros derivados de los acelerogramas simulados en este estudio. Se observa que, en términos generales, los espectros generados en este estudio muestran un mejor ajuste a los espectros objetivos que los provistos por las NTC-2023. En particular, las Figuras 14 y 15 muestran que algunos espectros asociados a UC44 y BO39 están desfasados respecto al espectro objetivo: la “meseta” presenta menor amplitud y se desplaza hacia la izquierda. Los autores atribuyen esto a que los acelerogramas de las NTC-2023 se agrupan según valores de T_s que reflejan el comportamiento dinámico del suelo en distintas épocas (ACT, EF1, EF2 y EF3), considerando la desecación y el cambio del período del suelo.

Sobre la definición de acelerogramas asociados a distintas épocas en las NTC-2023, los autores consideran adecuada la correlación positiva que existe entre los valores de T_s y los parámetros del movimiento del suelo basados en amplitud. Sin embargo, se omite la correcta caracterización de la duración. En particular, se estimó la variación de T_s a lo largo del tiempo a partir de registros de sismos ocurridos

entre 1985 y 2024 (ver Figura 18). Como puede observarse, el valor de T_s se ha mantenido constante (~ 1.4 s) en UC44, mientras que en BO39 varía de 3.4 s a 2.3 s. El valor de T_s se calculó como el inverso de la frecuencia f , definida como (López-Castañeda y Reinoso, 2022):

$$T_s = \frac{1}{\sqrt{\frac{[\max(\frac{F_1(\omega)}{F_V(\omega)})]^2 + [\max(\frac{F_2(\omega)}{F_V(\omega)})]^2}{2}}} \quad (10)$$

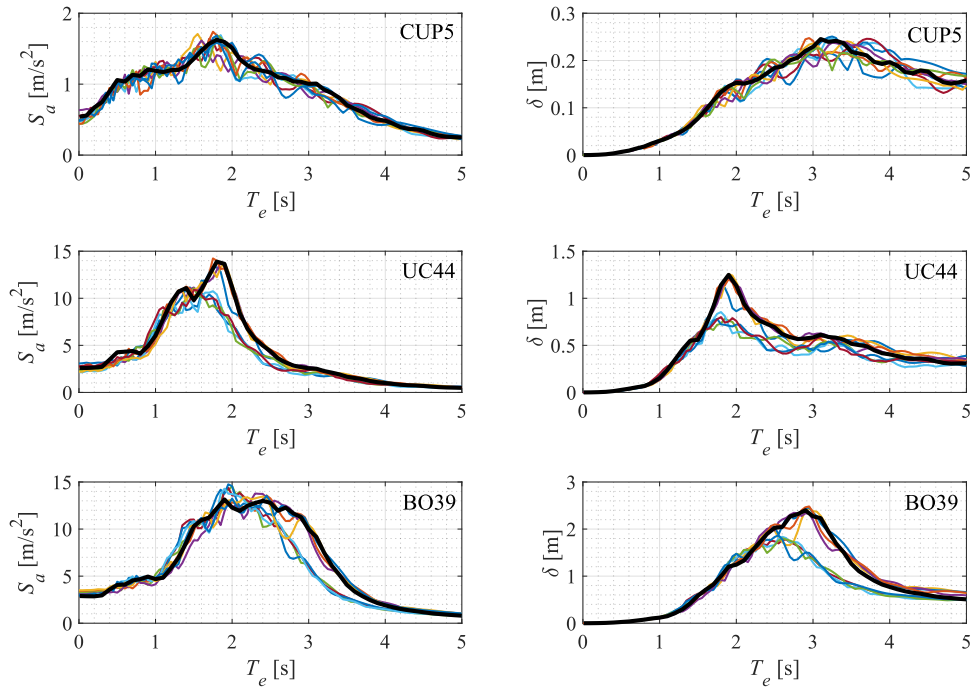


Figura 14. Espectros de aceleración y desplazamiento derivados de acelerogramas de sismos de subducción provistos por las NTC-2023.

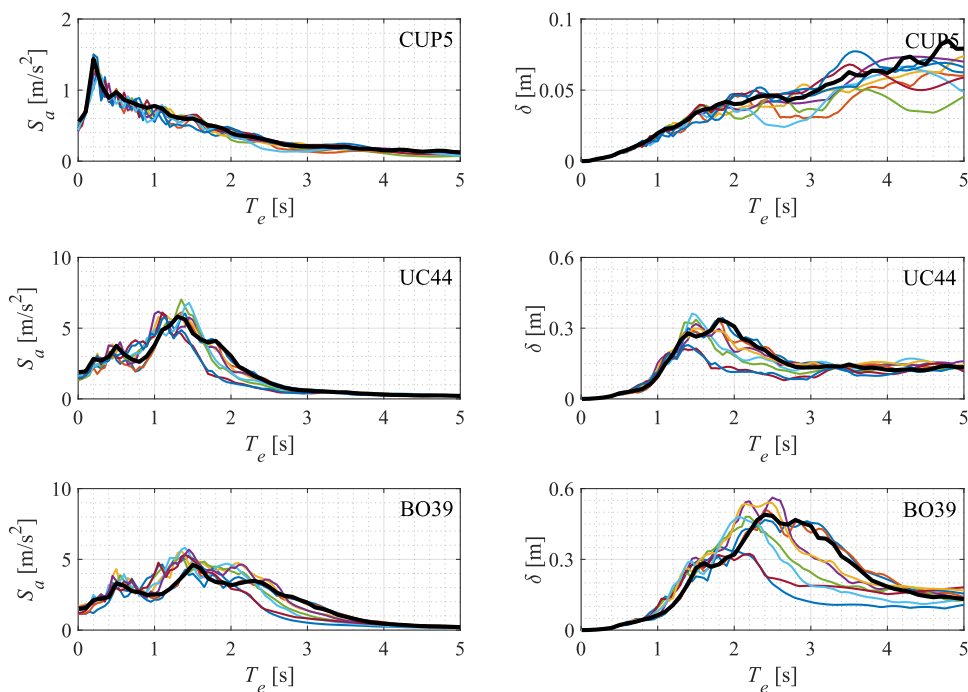


Figura 15. Espectros de aceleración y desplazamiento derivados de acelerogramas de sismos de profundidad intermedia provistos por las NTC-2023.

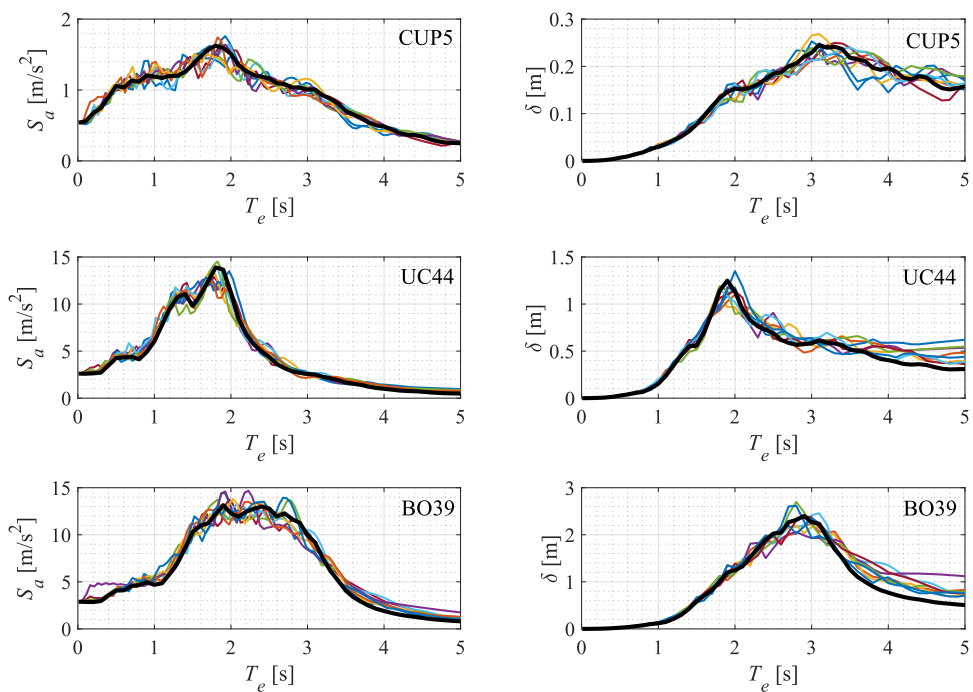


Figura 16. Espectros de aceleración y desplazamiento derivados de acelerogramas de sismos de subducción generados en este estudio.

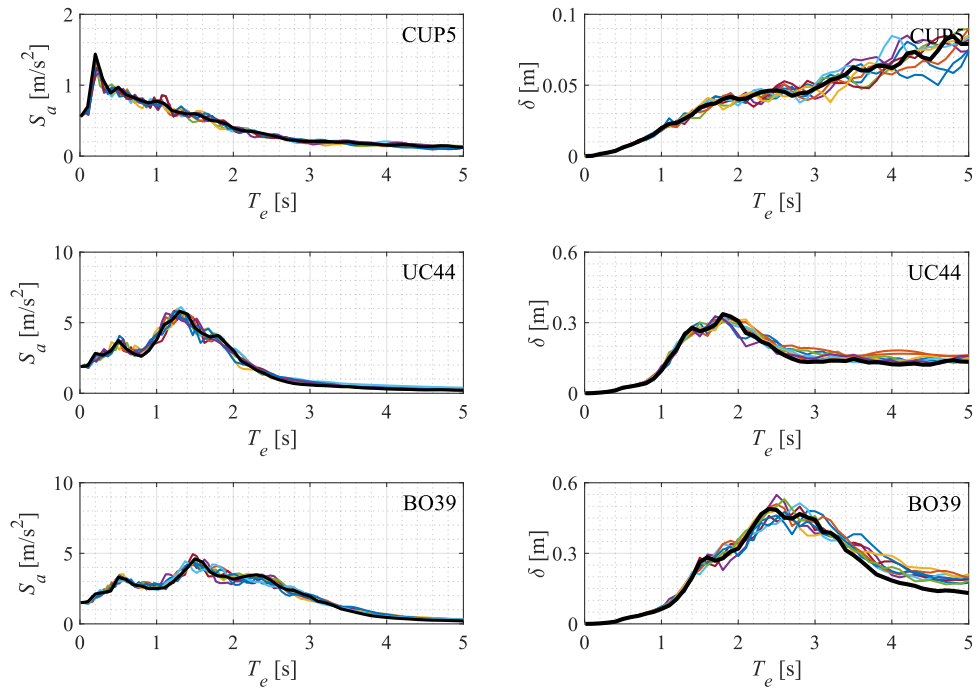


Figura 17. Espectros de aceleración y desplazamiento derivados de acelerogramas de sismos de profundidad intermedia generados en este estudio.

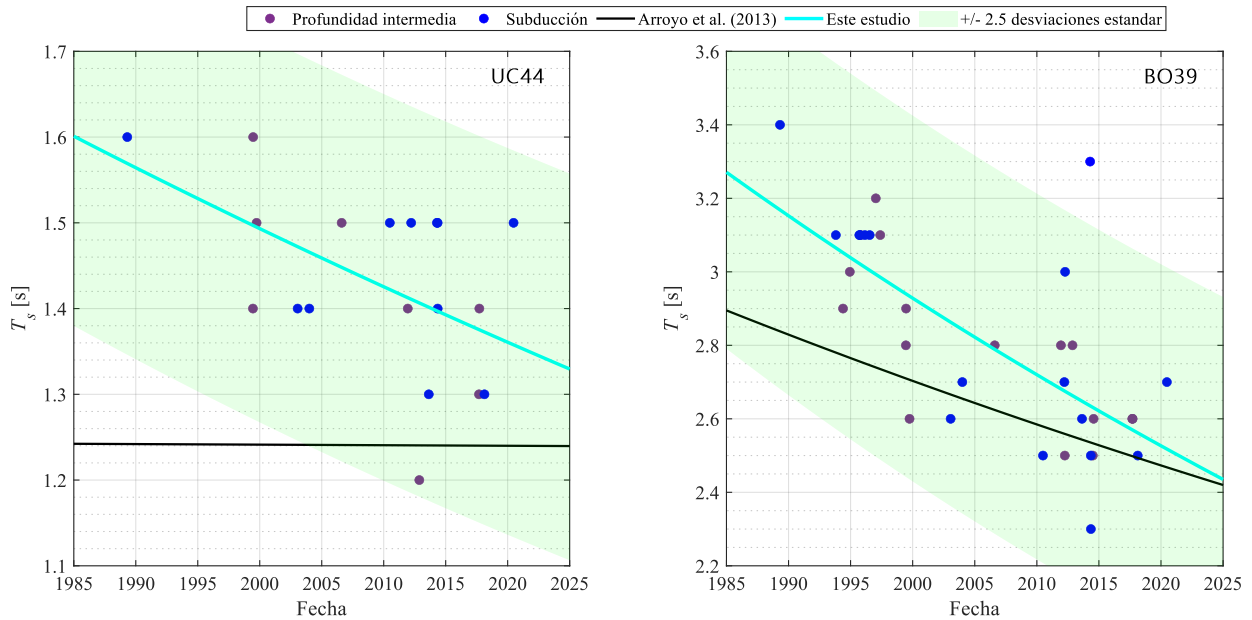


Figura 18. Valores medidos del período característico del suelo T_s en los sitios UC44 y BO39.

donde ω es la frecuencia angular, y los cocientes corresponden a las máximas razones entre los espectros de Fourier de las dos componentes horizontales, $\ddot{u}_{g_1}(t)$ y $\ddot{u}_{g_2}(t)$, y el espectro de Fourier de la componente vertical, $\ddot{u}_{g_v}(t)$.

En la Figura 18 se ilustra la línea de tendencia propuesta por Arroyo et al. (2013), definida como:

$$T_s = T_{min} + b_0 \exp[-b_1(y - y_{ref})] \quad (11)$$

donde y es el año de estimación y $y_{ref} = 1985$. Los valores de b_0 y b_1 se resumen en la Tabla 4. Arroyo et al. (2013) definieron T_{min} como el valor asintótico de T_s en un horizonte temporal lo suficientemente largo. Para UC44 y BO39, T_{min} es igual a 0.58 s y 0.69 s, respectivamente. Como se observa en la Figura 18, este modelo subestima los valores esperados de T_s : en UC44 se mantiene en ~ 1.2 s, mientras que en BO39 varía de ~ 2.8 s a 2.5 s.

Utilizando valores de T_s estimados con la ecuación (10), se construyó un modelo exponencial ajustado mediante mínimos cuadrados no lineales, conservando la forma funcional y los parámetros y_{ref} y T_{min} de Arroyo et al. (2013). Los nuevos valores de b_0 y b_1 se presentan en la Tabla 4. La Figura 18 muestra la línea de tendencia propuesta en este estudio, que describe con mayor precisión la evolución de T_s . La raíz del error cuadrático medio (RECM) fue de 0.0902 s para UC44 y 0.1996 s para BO39. En una distribución normal, ~ 98.76 % de los datos se encuentran dentro de ± 2.5 desviaciones estándar respecto a la media; este intervalo se enmarca en la Figura 18.

La Figura 19 presenta la evolución de T_s entre 1985 y 2300 para UC44 y BO39, comparando ambos modelos. Según Arroyo et al. (2013), UC44 alcanzaría T_{min} en un tiempo indefinido, mientras que BO39 lo haría en ~ 700 años. En contraste, el modelo propuesto estima que dichos valores se alcanzarán en ~ 500 años.

La Figura 20 muestra las curvas de peligro para D_{S_r} en UC44 y BO39 considerando valores de T_s correspondientes al año 2025 calculados con la ecuación (11). La Tabla 5 resume los valores estimados de T_s . Las Tablas 6 y 7 presentan los valores de D_{S_r} asociados a períodos de retorno T_r de 250 y 475 años. En general, los valores de T_s calculados con el modelo de Arroyo et al. (2013) son menores que los obtenidos en este estudio.

Aunque las diferencias en T_s entre ambos modelos no parecen significativas en la época actual, sí los son en escenarios intermedios y de largo plazo. Por ejemplo, se analizaron los efectos de la evolución temporal de T_s sobre D_{S_r} y las curvas de peligro en distintos escenarios: corto plazo (+25 años), intermedio (+50 años) y largo plazo (2100 y 2200 años). La Tabla 5 resume los valores de T_s para todos los escenarios, mientras que las Tablas 6 y 7 presentan los valores de D_{S_r} para períodos de retorno T_r de 250 y 475 años. Las Figuras 21 y 22 muestran las curvas de peligro para D_{S_r} considerando períodos actuales y futuros.

Tabla 4. Parámetros b_0 y b_1 (con intervalos de confianza al 95%) de los modelos exponenciales para la evolución temporal de T_s en UC44 y BO39, comparando Arroyo et al. (2013) y este estudio.

Parámetro	Arroyo et al. (2013)		Este estudio	
	UC44	BO39	UC44	BO39
b_0	0.6623	2.2050	1.0203 (0.9437, 1.0969)	2.5852 (2.4479, 2.7225)
b_1	0.0001	0.006067	0.007535 (0.00438, 0.01069)	0.00975 (0.00720, 0.01230)

*En esta tabla se reporta $b_1 > 0$ de acuerdo con la forma $\exp[-b_1(y - y_{ref})]$ mostrada en la ecuación (11).

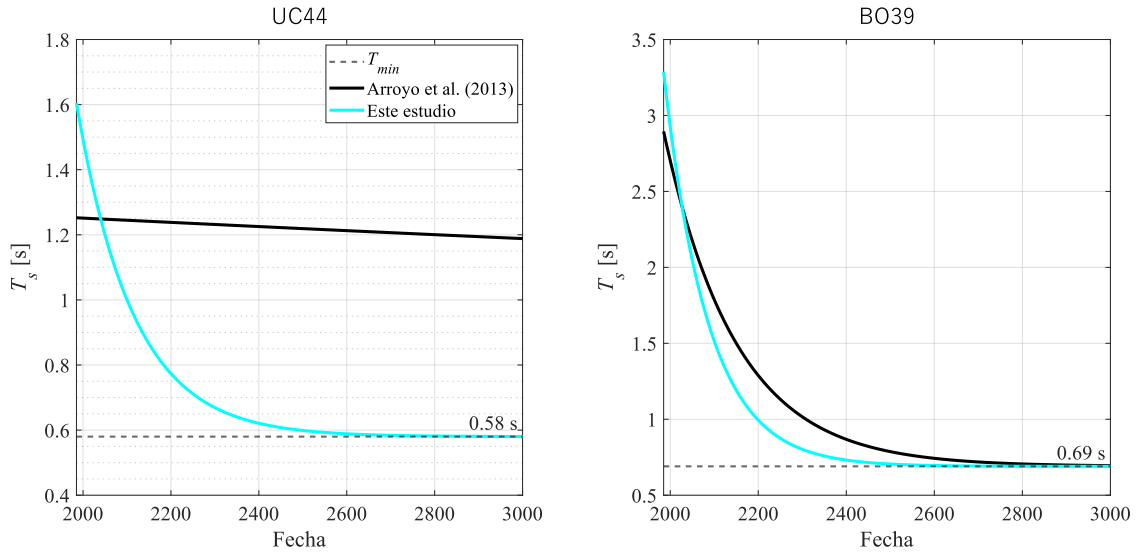


Figura 19. Evolución temporal de T_s en UC44 y BO39 según el modelo propuesto en este estudio y el de Arroyo et al. (2013).

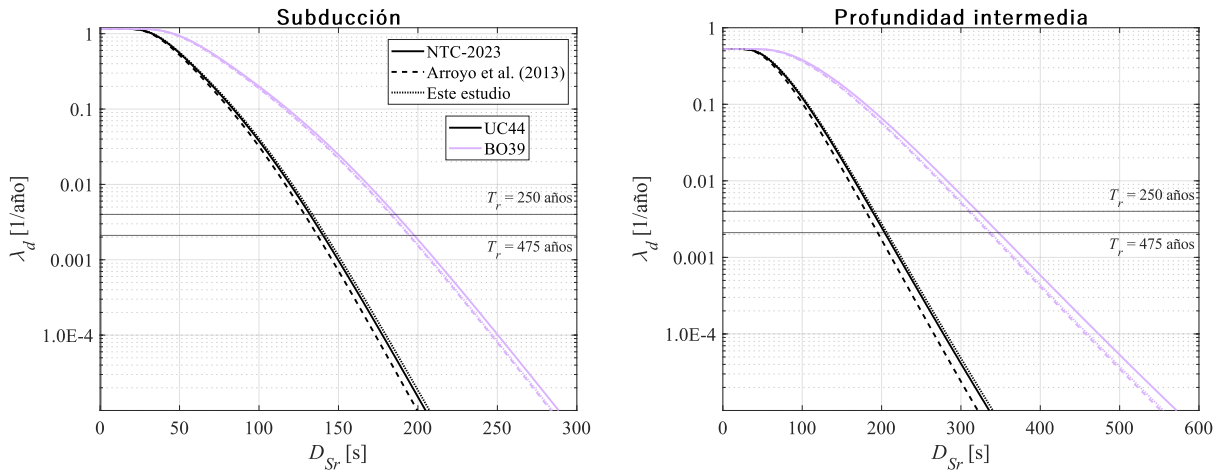


Figura 20. Curvas de peligro de D_{Sr} en UC44 y BO39 considerando valores actuales de T_s .

Tabla 5. Valores estimados de T_s para distintos escenarios temporales: época actual (2025), corto plazo (+25 años), intermedio (+50 años) y largo plazo (2100 y 2200), en UC44 y BO39.

Año	UC44		BO39	
	Arroyo et al. (2013)	Este estudio	Arroyo et al. (2013)	Este estudio
2025	1.2397 s	1.3300 s	2.4199 s	2.4338 s
2050	1.2380 s	1.1995 s	2.1764 s	2.0490 s
2075	1.2364 s	1.0904 s	1.9672 s	1.7491 s
2100	1.2347 s	1.0004 s	1.7875 s	1.5154 s
2200	1.2282 s	0.7737 s	1.2883 s	0.9945 s

Tabla 6. Valores esperados de D_{Sr} en UC44 para períodos de retorno T_r de 250 y 475 años, considerando escenarios temporales (2025, 2050 y 2075) y comparando Arroyo et al. (2013) con este estudio.

Tipo	T_r	2025		2050		2075	
		Arroyo et al. (2013)	Este estudio	Arroyo et al. (2013)	Este estudio	Arroyo et al. (2013)	Este estudio
S	250 años	128 s	131 s	128 s	126 s	128 s	120 s
	475 años	136 s	142 s	136 s	134 s	136 s	127 s
PI	250 años	183 s	191 s	180 s	180 s	179 s	171 s
	475 años	198 s	206 s	194 s	194 s	194 s	185 s

S = subducción y PI = profundidad intermedia.

Tabla 7. Valores esperados de D_{Sr} en BO39 para períodos de retorno T_r de 250 y 475 años, considerando escenarios temporales (2025, 2050 y 2075) y comparando Arroyo et al. (2013) con este estudio.

Tipo	T_r	2025		2050		2075	
		Arroyo et al. (2013)	Este estudio	Arroyo et al. (2013)	Este estudio	Arroyo et al. (2013)	Este estudio
S	250 años	182 s	183 s	172 s	167 s	163 s	154 s
	475 años	194 s	194 s	183 s	178 s	174 s	163 s
PI	250 años	309 s	311 s	277 s	262 s	253 s	229 s
	475 años	335 s	337 s	300 s	284 s	274 s	248 s

S = subducción y PI = profundidad intermedia.

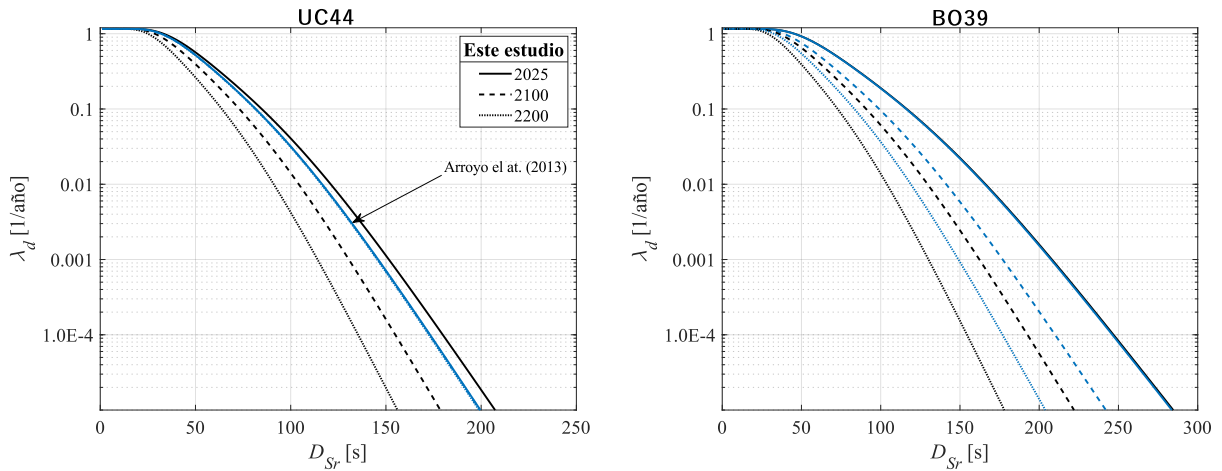


Figura 21. Curvas de peligro de D_{Sr} para sismos de subducción considerando escenarios temporales: actual (2025) y largo plazo (2100 y 2200).

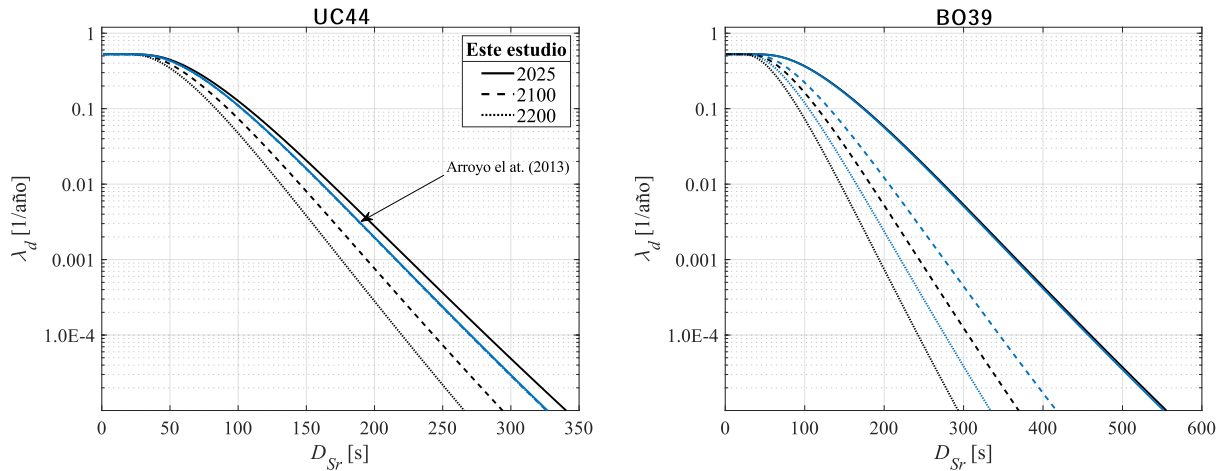


Figura 22. Curvas de peligro de D_{Sr} para sismos de profundidad intermedia considerando escenarios temporales: actual (2025) y largo plazo (2100 y 2200).

Se observa que, en UC44, las curvas de peligro de D_{Sr} son prácticamente iguales con el modelo de Arroyo et al. (2013). En cambio, con el modelo propuesto, a medida que T_s disminuye con el tiempo, también se reducen los valores de duración esperados para un mismo nivel de amenaza. Este efecto es más notorio en sitios con períodos actualmente elevados, como BO39, donde se anticipa una mayor variabilidad temporal. En conclusión, la duración del movimiento fuerte no es un parámetro estático, sino dependiente de la evolución física del suelo y del período de retorno considerado. Por ello, es fundamental que las curvas de peligro basadas en duración incorporen modelos actualizados de evolución de T_s .

CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una evaluación de acelerogramas sintéticos definidos en la versión más reciente de las NTC para la Ciudad de México y proporcionados por el SASID. Dichos acelerogramas están asociados a espectros de peligro uniforme correspondientes a períodos de retorno T_r de 250 y 475 años. El estudio incluyó el análisis de parámetros que caracterizan la amplitud, el contenido de frecuencias y la duración de la fase intensa del movimiento del suelo en sitios con diferentes tipologías geotécnicas —con valores de T_s de 0.5 s (Zona A), 1.3 s y 2.5 s (Zona C)—. Se desarrollaron nuevas GMPEs y curvas de peligro para estimar los niveles de intensidad de los parámetros estudiados. Como parte de los modelos predictivos, se propone una GMPE para estimar la PGA y $S_a(T_e)$ en sitios de la Zona A considerando movimientos del suelo producidos por sismos de profundidad intermedia.

Los resultados indicaron que los acelerogramas provistos por las NTC-2023 satisfacen adecuadamente las demandas de intensidad asociadas a parámetros de amplitud y contenido de frecuencias en sitios de la Zona A. Sin embargo, se observó que las mesetas de algunos espectros asociados a los sitios con $T_s = 1.3$ s y $T_s = 2.5$ s están desplazadas hacia la izquierda y presentan menor amplitud con respecto a los espectros objetivos definidos en este estudio. Los autores atribuyen esta diferencia a que los acelerogramas de las Zonas B y C fueron definidos con valores de T_s que no reflejan el comportamiento dinámico actual del suelo, lo que motivó un análisis detallado de la evolución temporal de T_s en los sitios UC44 y BO39.

Los resultados sugieren que los valores definidos en las NTC-2023 podrían subestimar T_s , probablemente debido al uso del modelo de Arroyo et al. (2013). Por ejemplo, para UC44 las NTC-2023 asumen un valor constante de $T_s \approx 1.2$ s, mientras que el modelo propuesto en este estudio, basado en datos registrados de sismos de subducción e intermedios, indica una disminución progresiva de T_s de 1.6 s a 1.3 s entre 1985 y 2025. Para BO39, el valor disminuye de 3.3 s a 2.4 s en el mismo período. En consecuencia, se recomienda revisar los valores de T_s considerados en las NTC-2023, dado que estos impactan directamente la caracterización de los espectros de peligro utilizados en el diseño estructural.

Adicionalmente, el análisis mostró que los acelerogramas provistos por las NTC-2023 tienden a subestimar la duración del movimiento fuerte, lo cual conduce a estimaciones sesgadas de la respuesta estructural inelástica. Para demostrarlo, se compararon espectros inelásticos de δ y E_h utilizando tanto acelerogramas de la NTC-2023 como acelerogramas sintéticos generados en este estudio para un período de retorno de 250 años. Se evaluó la respuesta de sistemas de un solo grado de libertad con comportamiento bilineal, considerando diferentes niveles de ductilidad (1, 2, 3 y 4) y una rigidez secundaria equivalente al 25 % de la rigidez elástica. Los resultados muestran un incremento apreciable en δ y E_h cuando se emplean acelerogramas con duraciones consistentes con el nivel de peligro considerado.

Finalmente, se incorporó el efecto de la evolución temporal del período T_s sobre la duración del movimiento, y se propusieron curvas de peligro para distintos horizontes temporales (época actual, +20 años y +50 años). Se destaca que la duración del movimiento sísmico no debe asumirse constante en el tiempo, ya que depende tanto del comportamiento del suelo como del período de retorno considerado. En conclusión, dado que es requerido realizar análisis dinámicos no lineales para estructuras poco convencionales o críticas, se considera pertinente revisar los valores de duración propuestos en las NTC-2023 para la selección o simulación de acelerogramas, a fin de evitar una subestimación de la respuesta estructural inelástica.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a los revisores por su valiosa labor; sus observaciones y sugerencias contribuyeron de manera significativa a mejorar la calidad del manuscrito y a enriquecer su contenido técnico. El segundo autor agradece el apoyo financiero recibido para la realización de esta investigación a través del proyecto DGAPA-PAPIIT-UNAM No. PAPIIT IN100126.

REFERENCIAS

- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2022) Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.
- Arias A (1970) A measure of earthquake intensity. In: Hansen RJ (ed) Seismic Design for Nuclear Power Plants. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp 438–483.
- Arroyo D, Ordaz M, Ovando-Shelley E, et al (2013) Evaluation of the change in dominant periods in the lake-bed zone of Mexico City produced by ground subsidence through the use of site amplification factors. *Soil Dyn Earthq Eng* 44:54–66. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.08.009>
- Bates DM, Watts DG (1988) Nonlinear Regression Analysis and Its Applications. John Wiley & Sons, Inc
- Bommer JJ, Martínez-Pereira A (1999) The effective duration of earthquake strong motion. *J Earthq Eng* 3:127–172. <https://doi.org/10.1080/13632469909350343>
- Chandramohan, R., Baker, J. W., Deierlein, G. G. (2016). Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records. *Earthquake Spectra*, 32(2):927-950.
- Demidenko E (2004) Mixed Models: Theory and Applications. John Wiley and Sons, Inc, New Jersey

- Douglas J (2022) Ground motion prediction equations 1964-2021. Glasgow, UK.
- European Committee for Standardization (CEN) (2010) Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. London.
- Furumura, T., Singh, S. K. (2002). Regional wave propagation from Mexican subduction zone earthquakes: The attenuation functions for interplate and inslab events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6):2110-2125.
- García D, Singh SK, Herráiz M, et al (2005) Inslab earthquakes of central Mexico: peak ground-Motion parameters and response spectra. *Bull Seismol Soc Am* 95:2272–2282. <https://doi.org/10.1785/0120050072>
- Gasparini DA, Vanmarcke EH (1976) SIMQKE: A program for artificial motion generation. User's manual and documentation. M.I.T. Department of Civil Engineering, Cambridge, Massachusetts.
- Hancock, J., Bommer, J. J. (2007). Using spectral matched records to explore the influence of strong-motion duration on inelastic structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(4):291-299.
- Huang Y-N, Whittaker AS, Luco N, Hamburger RO (2011) Scaling earthquake ground motions for performance-based assessment of buildings. *J Struct Eng* 137:311–321. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000155](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000155)
- Jaimes MÁ, García-Soto AD, Candia G (2024) Horizontal and vertical ground-motion duration prediction models from interplate and intermediate-depth intraslab earthquakes in Mexico City. *Bull Seismol Soc Am*. <https://doi.org/10.1785/0120230153>
- Jaimes MÁ, Reinoso E (2006) Comparación del comportamiento de edificios en el Valle de México ante sismos de subducción y de falla normal. *Rev Ing Sísmica* 75:1–22.
- Kramer SL (1996) *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey
- López-Castañeda AS (2022) Evaluation of strong-motion duration as design parameter in earthquake engineering. Universidad Nacional Autónoma de México.
- López-Castañeda AS, Martín del Campo JO, Reinoso E (2024a) Amplitude and duration hazard-consistent ground-motion selection for seismic risk assessment in Mexico City. *Bull Earthq Eng*. <https://doi.org/10.1007/s10518-024-01976-z>
- López-Castañeda AS, Martín del Campo JO, Reinoso E (2024b) Seismic hazard study for the duration of ground-motions triggered by intraslab earthquakes. *Nat Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06682-2>
- López-Castañeda AS, Reinoso E (2021) Strong-motion duration predictive models from subduction interface earthquakes recorded in the hill zone of the Valley of Mexico. *Soil Dyn Earthq Eng* 144:106676. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106676>
- López-Castañeda AS, Reinoso E (2022) Significant duration predictive models developed from strong-motion data of thrust faulting earthquakes recorded in Mexico City. *Earthq Eng Struct Dyn* 51:129–152. <https://doi.org/10.1002/eqe.3559>
- López-Castañeda AS, Reinoso E, Martín del Campo JO (2022) Influence of site-specific strong-motion duration on structural performance. *Bull Earthq Eng* 20:7047–7075. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01499-5>
- Molas, G. L., Yamazaki, F. (1995). Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(5):1343-1358.
- Montalvo-Arrieta JC, Reinoso E, Sánchez-Sesma FJ (2003) Observations of strong motion at hill sites in Mexico City from recent earthquakes. *Geofísica Int* 42:205–217.
- NEHRP Consultants Joint Venture, National Institute of Standards and Technology (NIST) (2011) *Selecting and Scaling Earthquake Ground Motions for Performing Response-HistoryAnalyses* (NIST GCR 11-917-15).
- Pinheiro JC, Bates DM (2000) *Mixed-Effects Models in S and S-Plus*. Springer-Verlag, New York.
- Secretaría de Obras y Servicios de la Ciudad de México (SOS-CDMX) (2023) *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo*. En Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Ciudad de México.

Singh SK, Ordaz M, Pérez-Campos X, Iglesias A (2015) Intraslab versus interplate earthquakes as recorded in Mexico City: Implications for seismic hazard. *Earthq Spectra* 31:795–812. <https://doi.org/10.1193/110612EQS324M>