

Probabilistic seismic hazard analysis using a new ground motion intensity measure

Robespierre Chávez-López^a & Edén Bojórquez-Mora^b

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México. robespierre_chavez@hotmail.com, est.robepierre_chavez@uas.edu.mx

^b Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, México. eden_bmseg@hotmail.com, eden@uas.edu.mx

Received: April 16th, 2015. Received in revised form: July 29th, 2015. Accepted: August 18th, 2015.

Abstract

The main objective of this work is to compute the probabilistic seismic hazard analysis for a region of Mexico using a new ground motion intensity measure which is based on the spectral acceleration and a parameter proxy of the spectral shape named N_p . The motivation of using this new ground motion intensity measure is because recently it has demonstrated its potential in predicting the response of buildings subjected to earthquakes. In fact, it was demonstrated that intensity measures based on N_p are more efficient compared with other parameter of the literature. It is important to mention that this is the first time that a probabilistic seismic hazard analysis is performed using this new intensity measurement.

Keywords: probabilistic seismic hazard analysis; ground motion intensity measure, spectral acceleration.

Análisis de peligro sísmico probabilístico usando una nueva medida de intensidad sísmica

Resumen

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis de peligro sísmico probabilístico para una región de México utilizando una nueva medida de intensidad sísmica basada en la aceleración espectral y en un parámetro para caracterizar la forma espectral llamado N_p . La motivación para usar esta nueva medida de intensidad sísmica es porque recientemente se ha demostrado su potencial en la predicción de la respuesta de edificaciones sometidas a sismos. De hecho, se ha demostrado que las medidas de intensidad basadas en N_p son más eficientes en comparación con otros parámetros propuestos en la literatura. Es importante decir que esta es la primera vez que se realiza un análisis de peligro sísmico probabilístico utilizando esta nueva medida de intensidad sísmica.

Palabras clave: análisis de peligro sísmico probabilístico; medida de intensidad sísmica; aceleración espectral.

1. Introducción

El análisis de peligro sísmico probabilístico es un procedimiento para estimar la probabilidad de que un determinado nivel de intensidad sísmica sea excedido en un sitio y durante un periodo de tiempo. Debido a la importancia del análisis de peligro sísmico probabilístico, varios estudios de este tipo han sido desarrollados para diferentes sitios alrededor del mundo [1-5]. El uso de conceptos probabilísticos ha permitido considerar explícitamente las incertidumbres en el tamaño, localización y tasa de recurrencia sísmica, así como la variación de las

características del movimiento sísmico con el tamaño y la ubicación del terremoto. El análisis de peligro sísmico probabilístico permite identificar, cuantificar y combinar en una manera racional estas incertidumbres, proporcionando una evaluación más completa del peligro sísmico. Comúnmente, en los códigos de diseño sísmico, el movimiento sísmico es expresado en términos de una medida de la intensidad. Actualmente, las medidas de intensidad más utilizadas para el análisis de peligro sísmico probabilístico son la aceleración máxima del suelo (A_{ms}) y la aceleración espectral en el primer modo de vibración ($Sa(T_1)$). Sin embargo, varios estudios han demostrado la limitación de

estos dos parámetros para representar el potencial del movimiento de suelo durante un terremoto, de tal manera que la evaluación del peligro sísmico requiere el uso de medidas de intensidad más sofisticadas.

Como se mencionó anteriormente, para poder evaluar el peligro sísmico en un sitio es de vital importancia contar con un parámetro que pueda describir la severidad de un movimiento sísmico, uno de los objetivos principales de dicho parámetro que se conoce como medida de intensidad sísmica, es estar íntimamente relacionado con la demanda sísmica, lo cual permite reducir las incertidumbres en la respuesta estructural de edificios. Algunas características de dicha medida son su relación con la respuesta estructural y su capacidad para desacoplar las incertidumbres sísmológicas y estructurales. Debido a la gran importancia que representa contar con una medida de intensidad sísmica apropiada, se han desarrollado varios estudios orientados en encontrar un parámetro que refleje el potencial destructivo de un movimiento sísmico [6-9].

La evidencia existente muestra que los esfuerzos en plantear parámetros para definir una medida de intensidad sísmica apropiada se concentran en la forma espectral debido a su relación con la respuesta estructural. Lo anterior indica que el primer paso es tratar de encontrar un parámetro capaz de representar con la mejor aproximación la forma espectral. Por ello, utilizando este razonamiento, recientemente una medida de intensidad sísmica conocida como I_{Np} fue propuesta por Bojórquez y Iervolino [10] cuyo objetivo es capturar con buena aproximación la forma espectral, a partir de un parámetro conocido como N_p . Ellos observaron que medidas escalares y vectoriales basadas en $Sa(T_i)$ y en la variable N_p , presentan una mejor relación con la respuesta sísmica no lineal de las estructuras. La motivación para usar esta nueva medida de intensidad sísmica (I_{Np}) para realizar el análisis de peligro sísmico para una región de México es porque Buratti [11] demostró el gran potencial de la medida propuesta por Bojórquez y Iervolino [10] y su gran eficiencia, además concluyó que una medida de intensidad sísmica eficiente resulta, al mismo tiempo, suficiente.

2. Sismología de México

La República Mexicana está situada en una de las regiones sísmicamente más activas del mundo, enclavada dentro del área conocida como el Cinturón Circumpacífico donde se concentra la mayor actividad sísmica del planeta [12].

La alta sismicidad en el país, es debido principalmente a la interacción entre las placas de Norteamérica, la de Cocos, la del Pacífico, la de Rivera y la del Caribe, así como a fallas locales que corren a lo largo de varios estados aunque estas últimas menos peligrosas. La Placa Norteamericana se separa de la del Pacífico pero roza con la del Caribe y choca contra las de Rivera y Cocos, de aquí la incidencia de sismos.

El estudio de la actividad sísmica de México comenzó a principios del siglo XX; sin embargo, los antecedentes históricos de grandes sismos del país fueron registrados en un gran número de documentos. En 1910 se inauguró la red sísmológica mexicana y desde esa fecha hasta nuestros días se ha mantenido una observación continua de los temblores cuyos registros se conservan en la Estación Sísmológica de

Tacubaya y otras instalaciones del Instituto de Geofísica de la UNAM, encargada de operar el Servicio Sísmológico Nacional -SSN- y su red de estaciones sísmológicas. El SSN reporta en el país, en promedio, la ocurrencia de 4 sismos por día de magnitud $M > 3.0$.

Existe otro grupo de trabajo en el Centro de Investigaciones y de Educación Superior de Ensenada, B.C. (CICESE), que enfoca su estudio entre otros aspectos, a la actividad sísmica asociada tanto al Golfo de California como a la falla de San Andrés, al igual que la Red Sísmológica del Noroeste (RESNOR). Adicionalmente, algunas instituciones de enseñanza superior en el interior del país, hacen estudios de sismicidad regional. Los diferentes grupos mantienen comunicación para dar a conocer sus avances.

3. Peligro sísmico

El análisis de peligro sísmico probabilístico considera todos los posibles eventos sísmicos, junto con sus probabilidades asociadas de ocurrencia, con el fin de encontrar el nivel de intensidad de movimiento del suelo que sea igual o mayor que cierta tasa de excedencia [13]. En esta sección se muestra la información requerida para aplicación de esta metodología.

3.1. Sitios en estudio

En este estudio fueron considerados cuatro sitios para realizar los análisis de peligro sísmico probabilístico, estos sitios se encuentran ubicados en el estado de Sinaloa, que es una región del noroeste de México de sismicidad moderada a alta. En la Fig. 1 se muestra la localización de cada uno de estos sitios, que se encuentran en las cuatro principales ciudades del Estado de Sinaloa que son Los Mochis, Guasave, Culiacán y Mazatlán.

3.2. Catálogo sísmico homogeneizado

El catálogo sísmico utilizado para la regionalización sísmo tectónica de México fue sugerido por Zúñiga y aplicado en un estudio reciente [14]. Es un catálogo a primera aproximación de terremotos que ocurrieron en México entre



Figura 1. Ubicación de los lugares en estudio.

Fuente: <https://www.google.com.mx/maps/@23.8534243,-108.7385837,678294m/data=!3m1!1e3>.

1899 y 2007, y comprende 60,606 eventos. Para esta compilación se tomaron en cuenta catálogos sísmicos previamente publicados [15-20]. Además fueron consultados catálogos producidos por reconocidas agencias como: El Centro Internacional de Sismología (ISC), Servicio Geológico de los E.U. (PDE reportados por NEIC), La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA), el Servicio Sismológico Nacional (SSN) y la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM). Se documentaron sismos históricos y estudios paleosismológicos. La mayoría de los eventos con magnitud superior a 7.0 fueron estudiados individualmente por varios autores, de estos estudios, se incluyeron las estimaciones de la magnitud consideradas como las más fiables.

Se consideraron las localizaciones y magnitudes para datos anteriores a 1988 en la siguiente prioridad: 1) Estudios individuales para sismos grandes, 2) Catálogo ISC, 3) Catálogo PDE, 4) Catálogo SSN y RESNOM, 5) Catálogos históricos y otros catálogos, debido a la precisión en estos datos. Para datos posteriores a 1988 se consideraron básicamente los datos de localización y magnitud del SSN y la RESNOM; sin embargo, para los sismos mayores que 6.5, únicamente las magnitudes fueron tomadas del catálogo CMT [21].

En general, el catálogo sísmico se compilo usando estimaciones de magnitud y/o momento, así como de localizaciones consideradas óptimas, ya que se tomaron en cuenta los errores de localización [14]. Además, se homogeneizó la magnitud para todos los eventos.

El catálogo instrumental se complementa con los terremotos históricos más importantes reportados en una compilación reciente de la historia sísmica de México [22]. Se estimó una magnitud basada sobre datos de intensidad [23] para los eventos más grandes y estos datos fueron usados para definir los límites de las regiones sismotectónicas descritas a continuación, y en la estimación de la magnitud máxima aproximada de las provincias. Los ejemplos más claros son La Faja Volcánica Mexicana y la costa sureste del Golfo de México ya que son regiones que han mostrado una historia de grandes eventos históricos, pero el catálogo instrumental es relativamente pobre. La discusión de importantes sismos históricos se incorpora a continuación en la descripción y definición de las regiones sismotectónicas.

3.3. Selección de regiones sismotectónicas

Los catálogos instrumentales e históricos descritos anteriormente fueron utilizados por Zúñiga et al. [24] como base para la división del territorio de la República Mexicana en unidades o regiones sismotectónicas. Las zonas en que fue dividido México se presentan en la Fig. 2.

Esta regionalización no es de ningún modo única; sin embargo, proporciona una división coherente y sistematizada que incorpora la mayor parte de los conocimientos sobre características generales de los sismos en diferentes partes del país. Además considera el potencial destructivo de los eventos más importantes que han ocurrido en el pasado. Esta regionalización se destina a ser utilizada como una herramienta en la definición de una zonificación de primer orden del peligro sísmico de México [24].

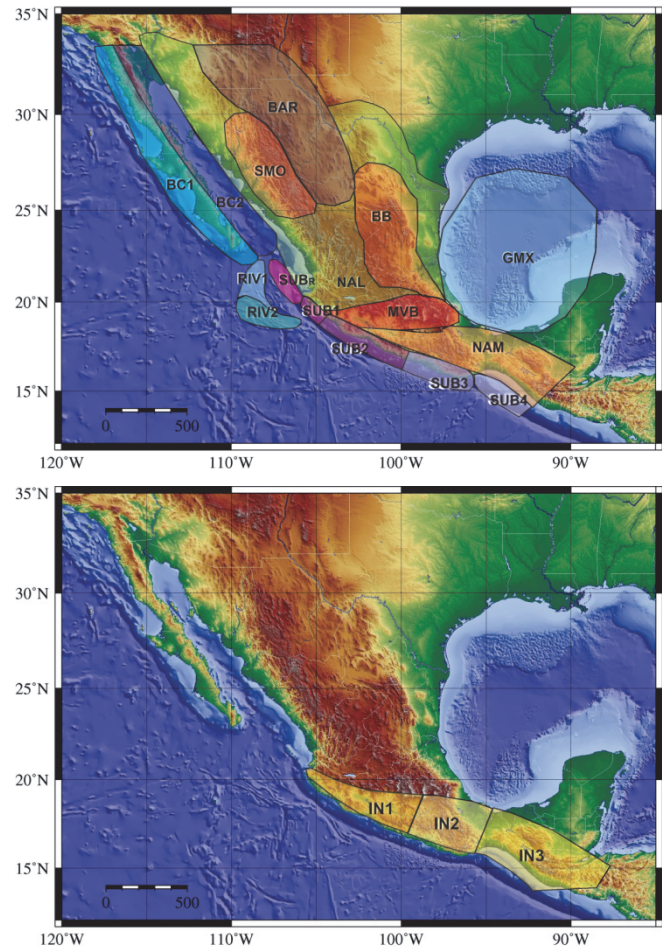


Figura 2. Zonas sismotectónicas de México. Arriba: Regiones correspondientes a sismos de profundidad somera. Abajo: Regiones de sismos de profundidad intermedia.

Fuente: Zúñiga et al., 1997.

3.4. Selección de relaciones de atenuación sísmica

El Servicio Sismológico Nacional en México inició sus operaciones en 1910, con la información recabada se han podido desarrollar varias relaciones de atenuación para la zona centro del país [25-28], pero en caso contrario, para la parte noroeste de México no se cuenta con la información suficiente para desarrollar una relación de atenuación. Por lo tanto, es necesario seleccionar una relación de atenuación de las existentes en la literatura, extraída de datos estadísticamente significativos y que comprenda un amplio intervalo de magnitud y distancia.

Para seleccionar la relación de atenuación se consideraron principalmente dos criterios: a) que debería ser derivada de una extensa base de datos y de preferencia desarrollada para sitios localizados con características sismotectónicas similares, b) que la variable independiente debería ser dada en términos de la aceleración máxima del suelo y ordenadas espectrales para un amplio intervalo de periodos de vibración. Considerando los criterios antes mencionados, se optó por seleccionar la relación de atenuación de Boore y Atkinson [29], la cual se define en la siguiente expresión:

$$\ln Y = F_M(M) + F_D(R_{JB}, M) + F_S(V_{S30}, R_{JB}, M) + \varepsilon \sigma_T \quad (1)$$

En la ec. (1), F_M , F_D y F_S representan el escalamiento de la magnitud, función de distancia y amplificación del sitio, respectivamente. M es la magnitud momento, R_{JB} es la distancia de Joyner-Boore (definida como la distancia más cercana a la superficie de proyección de la falla, que es aproximadamente igual a la distancia epicentral para eventos de $M \leq 6$), y V_{S30} es la velocidad promedio de las ondas de cortante en los primeros 30 metros de profundidad en el sitio. ε es el número fraccional de desviaciones estándar de un solo valor predicho de $\ln Y$ lejos del valor medio de $\ln Y$ (e. g., $\varepsilon = -1.5$, sería 1.5 desviaciones estándar menor que el valor medio). Todos los términos, incluyendo el coeficiente σ_T , son periodo dependientes. σ_T es calculado usando la ec. (2).

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \quad (2)$$

donde σ es la incertidumbre aleatoria intra-evento y τ es la incertidumbre aleatoria inter-evento.

3.5. Análisis de peligro sísmico probabilístico para I_{Np}

Las medidas escalares tradicionales de intensidad sísmica (e.g. $Sa(T_i)$, A_{ms}) tienen ciertas deficiencias como la insuficiencia o limitada eficiencia, las cuales han sido superadas por otras medidas de intensidad sísmica tanto escalares como vectoriales. Una medida de intensidad sísmica vectorial basada en $Sa(T_i)$ y en combinación con el parámetro N_p ya ha sido investigada y se describirá enseguida. Bojórquez *et al.* [30] han explorado el potencial del vector $\langle Sa, N_p \rangle$ en comparación con otras medidas de intensidad.

El vector $\langle Sa, N_p \rangle$ resulta mucho más eficiente que las medidas de intensidad frecuentemente utilizadas. Sin embargo, el uso de una medida de intensidad vectorial con la cual se pretenda desarrollar análisis probabilístico de la demanda sísmica de una estructura, requerirá la estimación de distribuciones condicionales de N_p dada $Sa(T_i)$. Por otro lado, el análisis probabilístico de la demanda sísmica se facilita por medio del uso de medidas de intensidad escalar, y la relación con la respuesta estructural también se vuelve más clara. Por esta razón, Bojórquez y Iervolino [10] propusieron una medida de intensidad sísmica escalar basada en los parámetros $Sa(T_i)$ y N_p con características similares a la medida de intensidad propuesta por Córdova *et al.* [31], la cual se define de la siguiente manera:

$$I_{Np} = Sa(T_1) \cdot N_p^\alpha \quad (3)$$

$$N_p = \frac{Sa_{avg}(T_1 \dots T_N)}{Sa(T_1)} \quad (4)$$

En la ec. (3), I_{Np} es la medida de intensidad sísmica escalar, y el valor α es un parámetro que debe ser calibrado, en función de la estructura y el parámetro de demanda sísmica seleccionado. Buratti [11] demostró que I_{Np} resulta más eficiente que un gran de número de medidas de

intensidad sísmica encontradas en la literatura [6,8,9,31-37].

En la ec. (3) se puede observar lo siguiente: a) la aceleración espectral en el primer modo de vibrar o el periodo de la estructura es un caso particular de I_{Np} , y este ocurre cuando α es igual a cero; b) la media geométrica $Sa_{avg}(T_1 \dots T_N)$ representa el caso particular de I_{Np} cuando $\alpha=1$; y c) la medida de intensidad vectorial propuesta por Córdova *et al.* [31], denominada $\langle Sa, R_{T1, T2} \rangle$, también corresponde a un caso particular cuando solo dos puntos del espectro son tomados en consideración, por ejemplo, T_1 y T_N . Bojórquez y Iervolino [10] sugieren que los valores óptimos de α están en un intervalo que va desde cero hasta uno, lo cual significa dotar a las ordenadas espectrales con un nivel diferente de importancia cuando se analice I_{Np} más allá del primer modo.

Debido a la posibilidad actual de calcular el peligro sísmico que es de gran utilidad para cualquier medida de intensidad propuesta, en esta sección se muestra como puede ser empleado I_{Np} para análisis de peligro sísmico probabilístico con herramientas actualmente disponibles para otras medidas de intensidad sísmica. La formulación general para el cálculo de peligro puede obtenerse de Bojórquez y Iervolino [10].

$$E[\ln(I_{Np})] = (1 - \alpha)E\{\ln[Sa(T_1)]\} + \frac{\alpha}{N} \sum_{i=1}^N E\{\ln[Sa(T_i)]\} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Var[\ln(I_{Np})] &= \alpha^2 Var\{\ln[Sa_{avg}(T_1 \dots T_N)]\} \\ &+ (1 - \alpha)^2 Var\{\ln[Sa(T_1)]\} \\ &+ 2\alpha(1 - \alpha)\rho_{\ln[Sa_{avg}(T_1 \dots T_N)], \ln[Sa(T_1)]} \sigma_{\ln[Sa_{avg}(T_1 \dots T_N)]} \sigma_{\ln[Sa(T_1)]} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} Var\{\ln[Sa_{avg}(T_1 \dots T_N)]\} &= \\ \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N &[\rho_{\ln[Sa(T_i)], \ln[Sa(T_j)]} \sigma_{\ln[Sa(T_i)]} \sigma_{\ln[Sa(T_j)]}] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rho_{\ln[Sa_{avg}(T_1 \dots T_N)], \ln[Sa(T_i)]} &= \\ \frac{\sum_{i=1}^N \rho_{\ln[Sa(T_i)], \ln[Sa(T_i)]} \sigma_{\ln[Sa(T_i)]}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [\rho_{\ln[Sa(T_i)], \ln[Sa(T_j)]} \sigma_{\ln[Sa(T_i)]} \sigma_{\ln[Sa(T_j)]]}}} \end{aligned} \quad (8)$$

donde $E(\cdot)$ representa la esperanza de un valor, en las ec. (7)-(8), $\rho_{\ln[Sa(T_i)], \ln[Sa(T_j)]}$ es la correlación y puede obtenerse con varias formulaciones propuestas en la literatura, en este estudio se obtiene mediante la correlación de Baker y Jayaram [38] que se muestra en la ec. (9):

$$\begin{aligned} \text{si } T_{\max} < 0.109 \quad \rho_{\ln[Sa(T_i)], \ln[Sa(T_j)]} &= C_2 \\ \text{si } T_{\min} > 0.109 \quad \rho_{\ln[Sa(T_i)], \ln[Sa(T_j)]} &= C_1 \\ \text{si } T_{\max} < 0.2 \quad \rho_{\ln[Sa(T_i)], \ln[Sa(T_j)]} &= \min(C_2, C_4) \\ \text{de otra manera} \quad \rho_{\ln[Sa(T_i)], \ln[Sa(T_j)]} &= C_4 \end{aligned} \quad (9)$$

En la ec. (9) C_1 , C_2 y C_4 son calculados mediante la ec. (10):

$$C_1 = 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2} - 0.366 \ln\left(\frac{T_{\max}}{\max(T_{\min}, 0.109)}\right)\right)$$

$$C_2 = \begin{cases} 1 - 0.105 \left(1 - \frac{1}{1 + e^{100T_{\max}^{-5}}}\right) \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} - 0.0099}\right) & \text{si } T_{\max} < 0.2 \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases} \quad (10)$$

$$C_3 = \begin{cases} C_2 & \text{si } T_{\max} < 0.109 \\ C_1 & \text{de lo contrario} \\ C_4 = C_1 + 0.5(\sqrt{C_3} - C_3) \left(1 + \cos\left(\frac{\pi T_{\min}}{0.109}\right)\right) \end{cases}$$

Finalmente, porque los valores de $\ln[Sa(T_1)]$ son conjuntamente Gausiano, las ec. (5)-(6) pueden ser obtenidas de relaciones de atenuación existentes, y estas ecuaciones son suficientes para describir la distribución completa de I_{Np} , y con esto realizar el análisis de peligro sísmico probabilístico como se hace para un solo valor de aceleración espectral.

El resultado de un análisis de peligro sísmico probabilístico puede ser expresado en muchas diferentes formas. Todas implican algunos niveles de cálculos probabilísticos a combinar las incertidumbres en tamaño del terremoto, localización, frecuencia, y efectos para estimar el peligro sísmico. Una aproximación común implica el desarrollo de curvas de peligro sísmico, que indican la probabilidad anual de excedencia de diferentes valores de un parámetro de movimiento sísmico seleccionado. Las curvas de peligro sísmico pueden entonces ser usadas para calcular la probabilidad de excedencia de un parámetro de movimiento sísmico seleccionado en un periodo específico de tiempo.

Las curvas de peligro sísmico pueden ser obtenidas para zonas fuentes individuales y combinadas para expresar el peligro total en un sitio particular. El concepto básico de los cálculos requeridos para desarrollar curvas de peligro sísmico es bastante simple. La probabilidad de exceder un valor particular, y^* , de un parámetro de movimiento de suelo, Y , es calculado para un posible terremoto en un lugar posible de la fuente y entonces multiplicado por la probabilidad de que un terremoto de magnitud particular podría ocurrir en esa ubicación particular. El proceso es entonces repetido para todas las magnitudes y localizaciones posibles con la probabilidad de cada suma. La formulación básica para el cálculo de las curvas de peligro sísmico se muestra en la ec. (11).

$$\lambda_{y^*} = \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=1}^{N_M} \sum_{k=1}^{N_R} v_i P[Y > y^* | m_j, r_k] P[M = m_j] P[R = r_k] \quad (11)$$

donde λ_{y^*} es la tasa anual de excedencia, v_i es la tasa media anual de excedencia de una magnitud asociada a una fuente sísmica, $P[Y > y^* | m_j, r_k]$ es la probabilidad que algún parámetro del movimiento del suelo Y estimado para un sismo de una magnitud m_j y una distancia r_k , exceda cierto valor y^* , $P[M = m_j]$ es la probabilidad que una magnitud M sea igual a una magnitud m_j y $P[R = r_k]$ es la probabilidad que una distancia R sea igual a una distancia r_k .

Las curvas de peligro sísmico pueden ser fácilmente

combinadas con el modelo de Poisson para estimar probabilidades de excedencia en intervalos de tiempo finito. La probabilidad de excedencia de y^* en un periodo de tiempo T es dado por la ec. (12):

$$P[Y_T > y^*] = 1 - e^{-\lambda_{y^*} T} \quad (12)$$

4. Estimación del peligro sísmico

Para el análisis de peligro sísmico se representó la distribución de distancias de la fuente al sitio por un histograma. Para ello se divide la zona fuente en una fina malla de 0.1 grado de separación entre puntos coordenados, conocido el intervalo total de distancia se agrupa en intervalos de 20 km, para caracterizar la distribución de distancias de la fuente al sitio, se determina que tantos segmentos forman parte de cada intervalo de distancias. Las ordenadas del histograma normalizado representan la frecuencia relativa que deberá ser igual a la probabilidad si un infinito número de segmentos fue usado, pero que es una aproximación a la probabilidad en este caso. De la misma manera se realiza para cada fuente sismotectónica.

Con fin de trazar espectros de peligro uniforme para periodos de retorno de 475 y 2475 años se obtienen curvas de peligro sísmico considerando un amplio intervalo de periodos que van de 0.2 a 3 segundos en intervalos de 0.2 segundos.

Los resultados se clasificaron según el tipo de suelo de acuerdo a la velocidad promedio de las ondas de cortante (V_{S30}), las cuales son un indicador del tipo de suelo en un sitio. Es decir, si se desea diseñar una estructura se debe realizar un estudio de mecánica de suelos en el sitio de interés para poder conocer la V_{S30} , una vez conocida la V_{S30} es posible trazar las curvas de peligro sísmico y el espectro de peligro uniforme para un periodo de retorno deseado, para un sitio en específico. La Tabla 1 muestra la relación entre la velocidad de ondas de cortante y el tipo de suelo.

La ventaja de los resultados obtenidos es que las curvas están asociadas a distintos valores de la velocidad de ondas de cortante, por lo tanto bastará con seleccionar la curva adecuada al tipo del suelo del sitio. En las Fig. 3-6 se muestran las curvas de peligro sísmico para los cuatro sitios en estudio para un periodo estructural de un segundo y distintas velocidades promedio de ondas de cortante. Se observa como a medida que la velocidad promedio de ondas de cortante disminuye, se incrementa I_{Np} para una tasa de excedencia en particular. Por ejemplo, para un periodo de retorno de 475 años, la Tabla 2 indica los valores de I_{Np} para distintas velocidades de ondas de cortante para el sitio FIC-UAS.

Tabla 1. Clasificación de suelos NEHRP.

Tipo de suelo	Descripción	Velocidad promedio de las ondas de cortante (V_{S30}) (m/s)
A	Roca dura	> 1500
B	Roca	760 - 1500
C	Suelo muy denso o roca blanda	360 - 760
D	Suelo rígido	180 - 360
E	Suelo blando	< 180

Fuente: NEHRP.

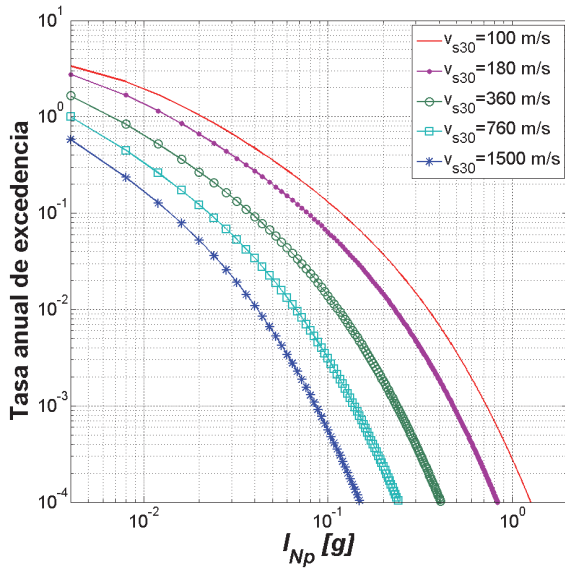


Figura 3. Curvas de peligro sísmico para un periodo estructural de un segundo para distintas velocidades de ondas de cortante para el sitio FIC-UAS.

Fuente: Propia.

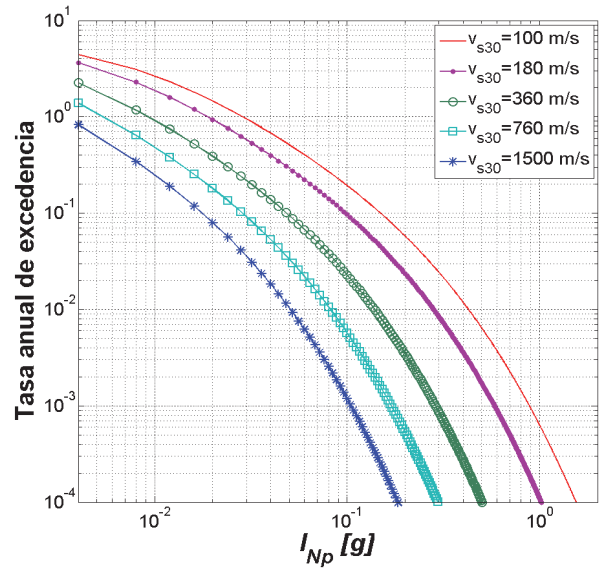


Figura 5. Curvas de peligro sísmico para un periodo estructural de un segundo para distintas velocidades de ondas de cortante para el sitio GSV.

Fuente: Propia.

Tabla 2.

Valores de la intensidad en términos de I_{Np} para el sitio FIC-UAS y periodo estructural de un segundo para distintas velocidades de ondas de cortante para un periodo de retorno de 475 años.

Velocidad de ondas de cortante (V_{s30})	I_{Np} [g]
100	0.59
180	0.39
360	0.19
760	0.11
1500	0.07

Fuente: Propia.

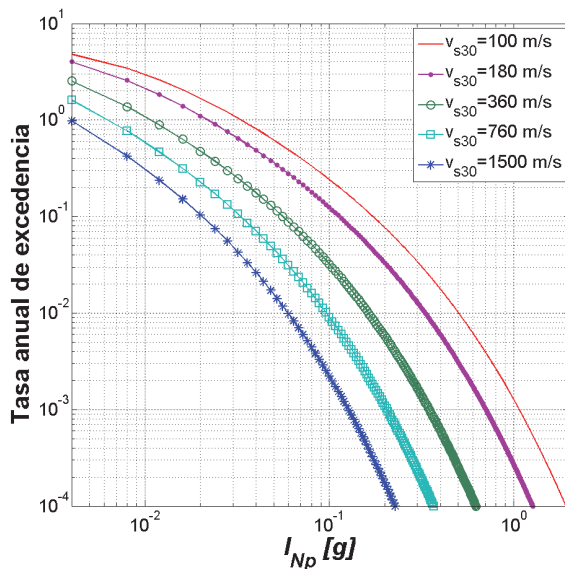


Figura 4. Curvas de peligro sísmico para un periodo estructural de un segundo para distintas velocidades de ondas de cortante para el sitio FIM-UAS.

Fuente: Propia.

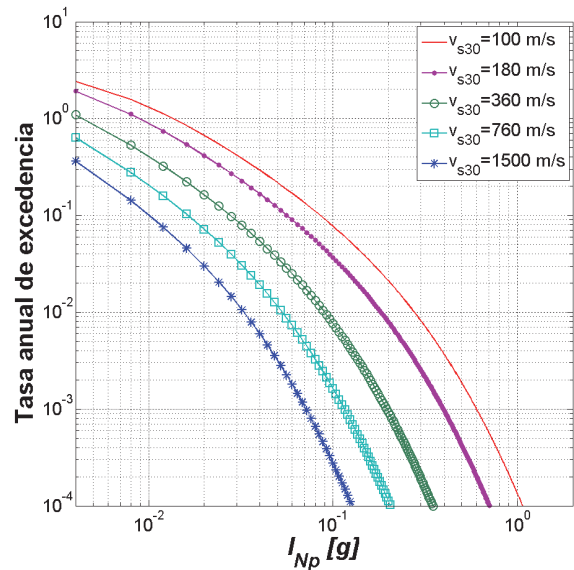


Figura 6. Curvas de peligro sísmico para un periodo estructural de un segundo para distintas velocidades de ondas de cortante para el sitio MZT-UAS.

Fuente: Propia.

Con el fin de mostrar cómo influye la velocidad promedio de las ondas de cortante sobre I_{Np} se elaboraron las Figs. 7-9, donde se grafican algunas curvas de peligro sísmico asociadas a periodos de 0.2, 0.6, 1.0, 2.0 y 3.0 segundos para el sitio FIC-UAS para velocidades promedio de ondas de cortante de 100, 360 y 1500 m/s. En las Figs. 7-9 se observa claramente como I_{Np} se ve afectada por la velocidad promedio de ondas de cortante, al ir incrementando la velocidad en un sitio en específico, I_{Np} va disminuyendo. En otras palabras a medida que la rigidez del suelo crece, los valores de I_{Np} tienden a reducirse.

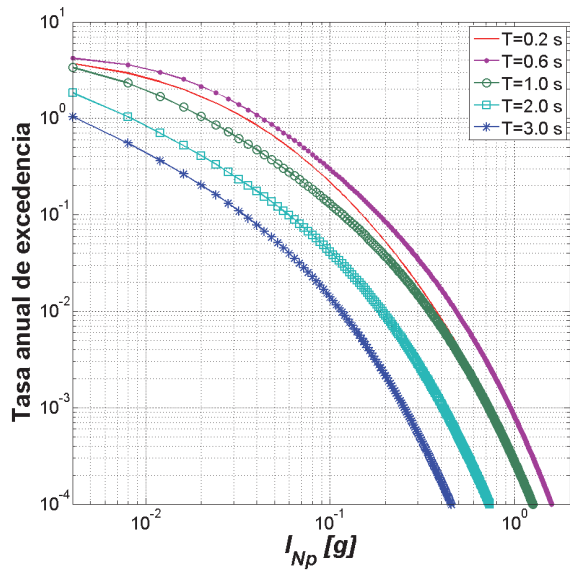


Figura 7. Curvas de peligro sísmico para el sitio FIC-UAS para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s. Fuente: Propia.

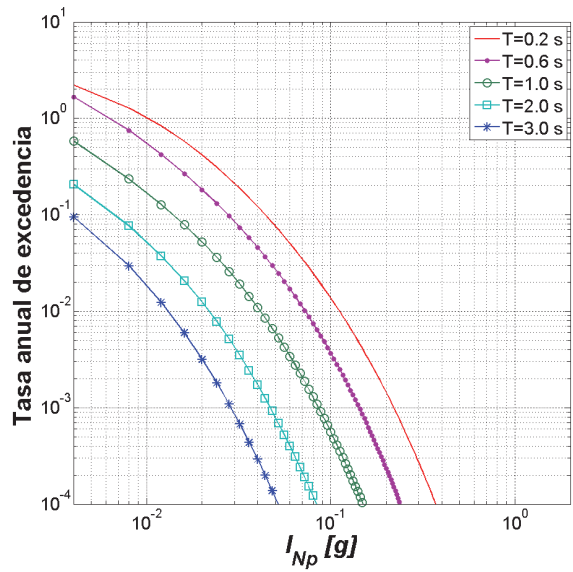


Figura 9. Curvas de peligro sísmico para el sitio FIC-UAS para una velocidad de ondas de cortante de 1500 m/s. Fuente: Propia.

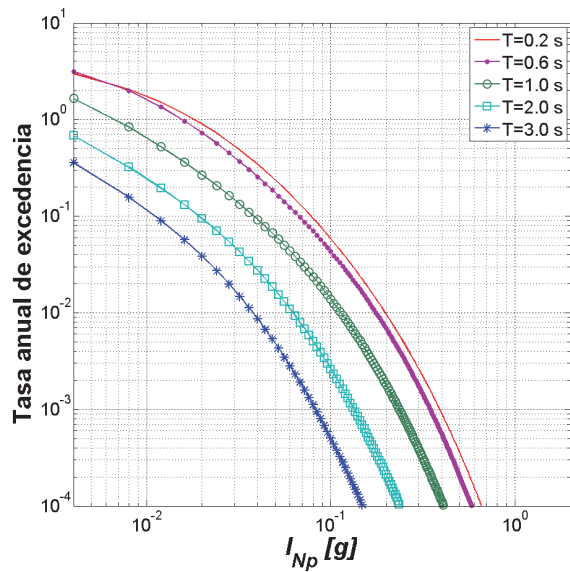


Figura 8. Curvas de peligro sísmico para el sitio FIC-UAS para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s. Fuente: Propia.

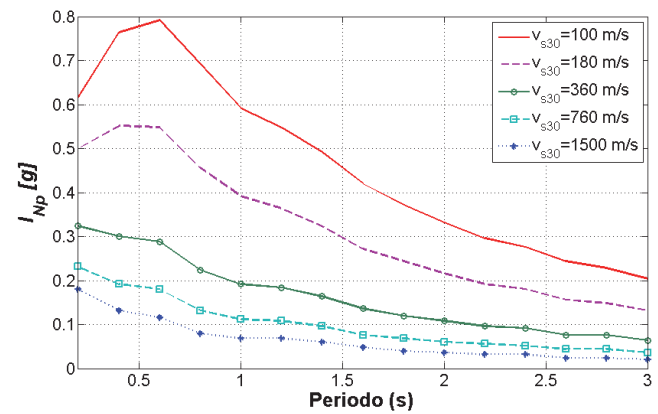


Figura 10. Espectros de I_{Np} y peligro uniforme para el sitio FIC-UAS para diferentes velocidades de ondas de cortante para un periodo de retorno de 475 años. Fuente: Propia.

Un objetivo común del análisis de peligro sísmico probabilístico es obtener un espectro de respuesta de diseño a utilizar para el análisis estructural. Un enfoque para el desarrollo de un espectro de diseño es calcular un espectro de peligro uniforme. Este espectro se obtiene realizando los cálculos anteriores involucrados en el análisis de peligro sísmico para un intervalo de periodos, después se elige una tasa de excedencia objetivo, y para cada período se identifica la amplitud de la intensidad correspondiente a esa tasa. Estas amplitudes de intensidad se grafican contra sus respectivos periodos, este espectro es llamado espectro de peligro uniforme porque cada ordenada tiene una probabilidad igual de ser excedida.

En la Fig. 10 se ilustran los espectros de I_{Np} con peligro uniforme para un periodo de retorno de 475 años, y velocidades promedio de ondas de cortante 100, 180, 360, 760 y 1500 m/s, para el sitio FIC-UAS. Se observa que a medida que la velocidad de ondas de cortante disminuye, se incrementa la intensidad en términos de I_{Np} . También se muestra que la forma del espectro de peligro uniforme se va suavizando conforme se incrementa la velocidad de las ondas de cortante pero tiende a mantener su forma, y las intensidades máximas en términos de I_{Np} se concentran entre los periodos estructurales de 0.2 a 0.6 segundos.

El resumen de los resultados obtenidos en los sitios de interés se muestra en las Figs. 11-13, donde se comparan los espectros de peligro uniforme para los sitios FIC-UAS, GVE, MZT-UAS y FIM-UAS utilizando diferentes velocidades de ondas de cortante y diferentes periodos de retorno. Es evidente

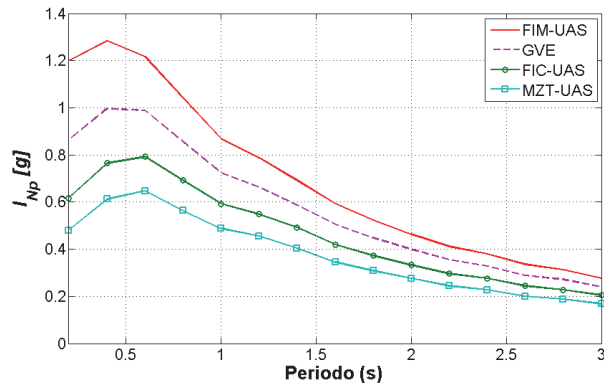


Figura 11. Espectros I_{Np} de peligro uniforme para los sitios FIC-UAS, GVE, MZT-UAS y FIM-UAS para una velocidad de ondas de cortante de 100 m/s para un periodo de retorno de 475 años.
Fuente: Propia.

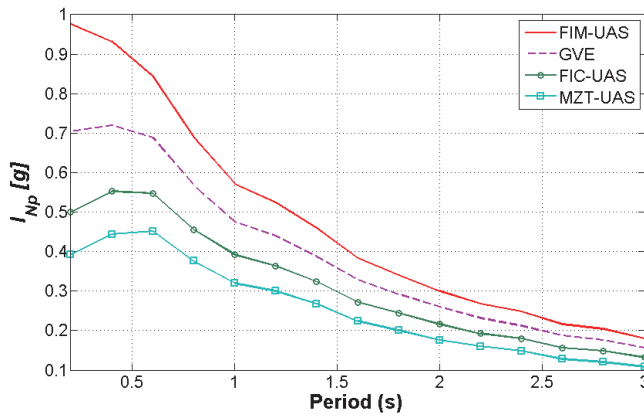


Figura 12. Espectros I_{Np} de peligro uniforme para los sitios FIC-UAS, GVE, MZT-UAS y FIM-UAS para una velocidad de ondas de cortante de 180 m/s para un periodo de retorno de 475 años.
Fuente: Propia.

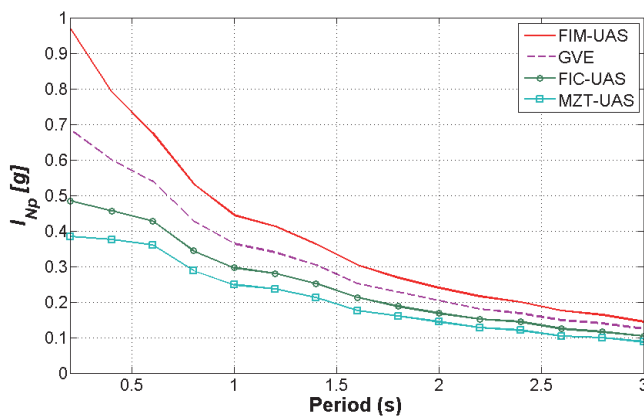


Figura 13. Espectros I_{Np} de peligro uniforme para los sitios FIC-UAS, GVE, MZT-UAS y FIM-UAS para una velocidad de ondas de cortante de 360 m/s para un periodo de retorno de 2475 años.
Fuente: Propia.

que el sitio FIM-UAS es el que presenta mayor peligro sísmico y va decreciendo para los sitios GVE y FIC-UAS,

hasta llegar el sitio MZT-UAS; es decir, en la parte norte de región de Sinaloa es donde se encuentran los sitios de mayor peligro sísmico, y conforme se analizan sitios de la parte sur del estado, se observa como el peligro sísmico va decreciendo. Lo anterior implica que los coeficientes sísmicos de diseño estructural son mayores en la parte norte del Estado de Sinaloa.

Una de las ventajas de utilizar I_{Np} como medida de intensidad es su eficiencia como lo demostró Buratti [11]; además, como se mencionó anteriormente él concluyó que una medida de intensidad sísmica eficiente resulta, al mismo tiempo, suficiente. La suficiencia se refiere a que la respuesta estructural depende solamente de la medida de intensidad utilizada y no de las características sísmicas de la fuente, tales como la magnitud del sismo y la distancia al sitio de interés. Por otro lado, una medida de intensidad sísmica eficiente es aquella que presenta una buena relación con la respuesta estructural.

Es de gran importancia mencionar que esta es la primera vez que se trazan espectros para I_{Np} , estos espectros son de gran utilidad para seleccionar acelerogramas. Supongamos que un código de diseño sísmico de alguna región nos pide un cierto número de registros sísmicos para el análisis estructural tomando como medida de intensidad $Sa(T_i)$, al utilizar I_{Np} se necesitan menos registros, esto es debido a la alta eficiencia de I_{Np} , lo cual a su vez se traduce en un diseño más eficaz y a la vez se ahorra tiempo de cómputo debido al uso de menos registros.

El trabajo aquí presentado solamente se llevó a cabo para una región específica de la República Mexicana; sin embargo, eso no quiere decir que únicamente se aplicable para esta región. La formulación desarrollada por Bojórquez y Iervolino [10] puede ser empleada en cualquier parte del planeta siempre y cuando se cuente con los elementos necesarios para llevar a cabo el análisis de peligro sísmico probabilístico.

5. Conclusiones

La estimación del peligro sísmico para la región de Sinaloa se efectuó tomando en cuenta la nueva medida de intensidad sísmica I_{Np} basada en el parámetro N_p , la característica principal de este parámetro es el uso de la forma espectral.

Se muestra la posibilidad de obtener tanto curvas de peligro sísmico como de espectros de peligro uniforme de manera sencilla utilizando la formulación desarrollada por Bojórquez y Iervolino [10]; además, se ilustra la importancia de la velocidad promedio de ondas de cortante, mientras mayor sea la velocidad, las curvas de peligro sísmico presentan menor intensidad en términos de I_{Np} para un sitio en específico, de igual manera se ven afectados los espectros de peligro uniforme por la velocidad de las ondas de cortante ya que estos son obtenidos a partir de las curvas de peligro.

De los resultados obtenidos se observa que el lugar que experimenta mayor peligro sísmico es el sitio FIM-UAS (es decir, la Ciudad de Los Mochis), lo cual indica que las ordenadas espectrales de diseño (coeficiente sísmico requerido) son mayores para este sitio. El segundo sitio con mayor peligrosidad sísmica corresponde a GVE. Para el sitio

FIC-UAS el peligro sísmico es menor que para el sitio GVE, y en este trabajo el lugar con menor peligro sísmico que se obtuvo corresponde al sitio MZT-UAS. Tomando en cuenta el análisis de peligro sísmico probabilístico desarrollado y la distribución geográfica de los sitios en estudios se concluye de manera preliminar que la parte norte de la región de Sinaloa es la que sufre de un mayor peligro sísmico, y conforme se avanza a la parte sur de la región de Sinaloa el peligro tiende a disminuir (al menos hasta la Ciudad de Mazatlán). Sin embargo, es importante resaltar que en todos los sitios considerados el peligro sísmico está presente, por lo tanto, las edificaciones deben diseñarse tomando en cuenta el efecto de los sismos. La distribución del peligro sísmico observada se debe a la cercana distancia entre la región de Sinaloa y la región sismotectónica BC2, y a la actividad sísmica de dicha región ya que es mayor en comparación con el resto de las otras fuentes que afectan al Estado. Por tal motivo, la región de Sinaloa se ve afectada considerablemente por las intensidades sísmicas que se generan a partir de eventos ocurridos en la región sismotectónica BC2.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló con el apoyo económico brindado por El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del Proyecto CB-2011-01-167419 y la Beca otorgada al primer autor. Se agradece el apoyo de la Universidad Autónoma de Sinaloa dentro del proyecto PROFAPI 2014/032.

Referencias

- [1] Romeo, R., Paciello, A. and Rinaldis, D., Seismic hazard maps of Italy including site effects. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20, pp. 85-92, 2000. DOI: 10.1016/S0267-7261(00)00040-3
- [2] Meletti, C., Galadini, F., Valensise, G., Stucchi, M., Basili, R., Barba, S., Vannucci, G. and Boschi, E., A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics*, 450, pp. 85-108, 2008. DOI: 10.1016/j.tecto.2008.01.003
- [3] Leyton, F., Ruiz, S. y Sepulveda, S.A., Reevaluación del peligro sísmico probabilístico en Chile central. *Andean Geology*, 37(2), pp. 455-472, 2010.
- [4] Secanell, R., Goula, X., Susagna, T., Fleta, J. and Roca, A., Seismic hazard zonation of Catalonia, Spain, integrating random uncertainties. *Journal of Seismology*, 8, pp. 25-40, 2004. DOI: 10.1023/B:JOSE.0000009516.91044.51
- [5] Sierra, C.A. y Jaramillo, J.D., IE - RISS: Una herramienta computacional para la estimación de pérdidas por sismo en edificaciones. *DYNA*, 79(175), pp. 34-42, 2012.
- [6] Housner, G.W., Spectrum intensities of strong motion earthquakes. *Proceedings of Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures*, Earthquake Engineering Research Institute, 1952.
- [7] Von-Thun, J.L., Rochin, L.H., Scott, G.A. and Wilson, J.A., Earthquake ground motions for design and analysis of dams. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advance in Ground-Motion Evaluation*, Geotechnical Special Publication 20 ASCE, New York, 1988, pp. 463-481
- [8] Shome, N., Probabilistic seismic demand analysis of nonlinear structures, PhD dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, USA, 1999.
- [9] Baker, J.W. and Cornell, C.A., A vector-valued ground motion intensity measure consisting of spectral acceleration and epsilon. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 34, pp. 1193-1217, 2005. DOI: 10.1002/eqe.474
- [10] Bojórquez, E. and Iervolino, I., Spectral shape proxies and nonlinear structural response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(7), pp. 996-1008, 2011. DOI: 10.1016/j.soildyn.2011.03.006
- [11] Buratti, N., A comparison of the performances of various ground-motion intensity measures. *Proceedings of The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, pp. 24-28, 2012.
- [12] SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. [En línea]. Disponible en: <http://portalweb.sgm.gob.mx/museo/es/riesgos/sismos/sismologia-de-mexico>
- [13] Reiter, L., *Earthquake hazard analysis - issues and insights*, Columbia University Press, New York, 1990, 254 P.
- [14] Mendoza, A., Estudio de la estabilidad del valor b para regiones sismotectónicas de México, MSc Thesis, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México, 2012.
- [15] Gutenberg, B. y Richter, C.F., *Seismicity of the earth (and associated phenomena)*. Princeton University Press, Princeton, NJ, EUA, 1954.
- [16] Duda, S.J., Secular seismic energy release in the circum-Pacific belt. *Tectono-physics*, 2, pp. 409-452, 1965. DOI: 10.1016/0040-1951(65)90035-1
- [17] Figueroa, J., Catálogo de sismos ocurridos en la República Mexicana, Reporte No. 272. Serie: Investigación y desarrollo (azul), Coordinación: Sismología e Instrumentación Sísmica, Instituto de Geología, UNAM, 1970.
- [18] Miyamura, S., Aspectos importantes de la sismicidad en Costa Rica, *Rev. Avances de Inv., Inst. Inv. Soc., Univ. De Costa Rica*, pp. 10-18, 1976.
- [19] Abe, K., Magnitude of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. *Phys. of the Earth and Planet. Int.*, 27, pp. 72-92, 1981. DOI: 10.1016/0031-9201(81)90088-1
- [20] Singh, S.K., Rodriguez, M. and Espindola, J.M., A catalogue of shallow earthquakes of Mexico from 1900 to 1981. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74, pp. 267-279, 1984.
- [21] The Global Centroid-Moment-Tensor. [Online]. Available at: <http://www.globalcmt.org/>
- [22] García-Acosta, V. y Suárez, G., Los sismos en la historia de México, vol. 1, Eds. Científicas Universitarias: Serie texto científico universitario. Universidad Nacional Autónoma de México, 1996.
- [23] Malagón, A., Calibración y estimación de magnitudes para sismos históricos de México, MSc Thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 1989.
- [24] Zúñiga, F.R., Suárez, G., Ordaz, M. y García-Acosta, V., Proyecto: Peligro sísmico en Latinoamérica y el Caribe, Instituto Panamericano de Geografía e Historia, proyecto 89-0190, 1997, 84 P.
- [25] Esteva, L. and Villaverde, R., Seismic risk, design spectra and structural reliability, *Proceedings of 5th World Conf. Earthquake Eng.*, 1973, pp. 2586-2597.
- [26] Bufalaza, M., Atenuación de intensidades sísmicas con la distancia en sismos mexicanos, MSc Thesis, Facultad de Ingeniería UNAM, 1984.
- [27] Ordaz, M., Jara, J.M. y Singh, S.K., Riesgo sísmico y espectros de diseño en el Estado de Guerrero, *Procedente del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Acapulco, México, 1989, pp. D40-D56.
- [28] García, J.D., Estimación de parámetros del movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en México Central, PhD Thesis, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2006.
- [29] Boore, D.M. and Atkinson, G.M., Boore-Atkinson NGA ground motion relations for geometric mean horizontal component of peak and spectral ground motion parameters, PEER 2007/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, 2007.
- [30] Bojórquez, E., Iervolino, I. and Manfredi, G., Evaluating a new proxy for spectral shape to be used as an intensity measure. *Seismic Engineering Conference, AIP Conference Proceedings 1020*, 2008, pp. 1599-1606. DOI: 10.1063/1.2963788
- [31] Cordova, P.P., Dierlein, G.G., Mehanny, S.S.F. and Cornell, C.A., Development of a two parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure. *The second U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering*

- Methodology for Reinforce Concrete Biilding Structures, Sapporo, Hokkaido, 2001, pp. 187-206.
- [32] Housner, G.W., Measures of severity of ground shaking. U.S. Conference on Earthquake Engineering. Earthquake Engineering Research Institute, 1975.
- [33] Arias, A., A measure of earthquake intensity. In Hansen, R.J., Ed. Seismic Design for Nuclear Power Plants, Massachusetts Institute of Technology Press, 1970, pp. 438-483.
- [34] FEMA., NEHRP Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings, 1994.
- [35] Mehanny, S.S. and Deierlein, G.G., Modelling of assessment of seismic performance of composite frames with reinforced concrete columns and steel beams. Report 135, Department of Civil and Enviromental Engineering, Stanford University, Sanford, USA, 2000.
- [36] Riddell, R. and Garcia, J.E., Hysteretic energy spectrum and damage control. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 30, pp. 1791-1816, 2001. DOI: 10.1002/eqe.93
- [37] Mehanny, S.S.F., A broad-range power-law form scalar-based seismic intensity measure. Engineering Structures, 31, pp. 1354-1368, 2009. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.02.003
- [38] Baker, J.W. and Jayaram, N., Correlation of spectral acceleration values from NGA ground motion models. Earthquake Spectra, 24(1), pp. 299-317, 2008. DOI: 10.1193/1.2857544

R. Chávez-López, obtuvo el grado de Ingeniero Civil en 2010, en 2012 obtuvo su grado de MSc. en Ciencias de la Ingeniería, ambos por la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. Actualmente se encuentra realizando sus estudios de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Facultad de Ingeniería, Culiacán, México en la misma universidad. Sus líneas de interés actual son ingeniería sísmica e ingeniería estructural. ORCID: 0000-0002-9043-9070

E. Bojórquez-Mora, es profesor investigador de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México. Terminó estudios de MSc y Dr. en la Universidad Nacional Autónoma de México en 2007 y su PhD en Ingeniería Sísmica en la Universidad de Nápoles, Italia en 2008. Coordinador de la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería (Estructuras) en la UAS, sede Culiacán, México. Actualmente es Editor de la Revista de Ingeniería Sísmica. Sus áreas de interés son: Ingeniería estructural, sísmica, eólica, sismología, inteligencia artificial, optimización multi-objetivo, entre otros. ORCID: 0000-0001-6402-1693



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería Civil

Oferta de Posgrados

Especialización en Vías y Transportes
Especialización en Estructuras
Maestría en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas
de Transporte
Maestría en Ingeniería – Geotecnia
Doctorado en Ingeniería - Ingeniería Civil

Mayor información:

E-mail: asisacic_med@unal.edu.co
Teléfono: (57-4) 425 5172