

Relación de la distorsión de entrepiso en edificios de acero con un nuevo índice del potencial de daño de los sismos

Ratio of the inter-story drift in steel buildings with a new damage potential index of earthquakes

—

Luis Eduardo Cornelio Gutiérrez
142d16117@egresados.ujat.mx
ORCID: 0000-0002-3873-7759

Sergio Alberto Díaz Alvarado
alberto.diaz@ujat.mx
ORCID: 0000-0003-3736-9154

René Sebastián Mora Ortiz
rene.mora@ujat.mx
ORCID: 0000-0001-9265-7621

Alberto Vásquez Martínez
alberto.vasquez@ujat.mx
ORCID: 0000-0003-4909-6501

UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO, CUNDUACÁN, TABASCO, MÉXICO



Para citar este artículo:

Cornelio Gutiérrez, L. E., Díaz Alvarado, S. A., Mora Ortiz, R. S., & Vásquez Martínez, A. Relación de la distorsión de entrepiso en edificios de acero con un nuevo índice del potencial de daño de los sismos. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 12(32). <https://doi.org/10.31644/IMASD.32.2023.a04>

RESUMEN

El daño esperado en las edificaciones por los sismos se puede determinar con la máxima distorsión de entrepiso (θ_{\max}) y depende del tipo de edificio y de las características del sismo. En esta investigación se presenta un nuevo índice del potencial del daño ($IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$) de los sismos, basado en su intensidad de Arias (I_A), la duración significativa (Δ_{IA}) y la aceleración espectral del periodo fundamental del edificio ($SaT1$). Además, se desarrollan ecuaciones predictivas para determinar la θ_{\max} en función del nuevo índice. Son usados dos edificios 2D, de 3 y 7 pisos y es considerada como zona de estudio la ciudad de Oaxaca, México. Se utilizaron 46 acelerogramas de componentes horizontales de sismos reales. Para este conjunto de acelerogramas con base en una técnica de un ajuste espectral, se generaron acelerogramas con respuesta espectral compatible con el espectro de diseño de la norma sísmica mexicana para la ciudad estudiada. La respuesta sísmica de los edificios es obtenida mediante análisis dinámico no lineal incrementales. Los resultados muestran una buena correlación entre θ_{\max} con la SA_{T1} e I_A en los análisis con el conjunto de acelerogramas compatibles. El $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$ propuesto tiene una mejor correlación con la θ_{\max} que la SA_{T1} e I_A para acelerogramas reales y compatibles en los dos edificios estudiados. Por lo cual puede ser una mejor alternativa para medir el potencial destructivo de una acción sísmica. Finalmente, las ecuaciones predictivas desarrolladas permiten relacionar correctamente el nuevo índice con el θ_{\max} para acciones sísmicas compatibles en edificios de acero.

Palabras Clave:

Distorsión de entrepiso; duración significativa; aceleración espectral para el periodo fundamental; edificios de acero; potencial destructivo de sismos.

— Abstract—

The expected damage in the buildings by earthquakes can be determined with the maximum inter-story drift (θ_{\max}) and depends on the building type and the earthquake characteristics. In this research, a new damage potential index ($IPD_{SaT_1-IA-\Delta IA}$) of the earthquakes is presented based on its Arias intensity (I_A), its significant duration (Δ_{IA}), and the spectral acceleration for the fundamental period of the building (Sa_{T_1}). In addition, predictive equations are developed to determine the θ_{\max} as a function of the new index. Two 2D buildings, with 3 and 7 floors, are used, and Oaxaca City, Mexico, is considered the study area. Forty-six accelerograms of horizontal components of real strong ground motion records are used. For these accelerograms set based on a spectral matching method, accelerograms with spectral response compatible with the design spectrum of the Mexican seismic standard from the city studied are generated. The seismic response of the buildings is obtained by the incremental non-linear dynamic analysis. The results show a good correlation between θ_{\max} with the SA_{T_1} and I_A in the analyzed set of compatible accelerograms. The $IPD_{SaT_1-IA-\Delta IA}$ proposed has a better correlation with θ_{\max} than SA_{T_1} and I_A , for real and compatible accelerograms in the two buildings studied. Therefore, it can be a better alternative to measure the destructiveness potential of seismic action. Finally, the predictive equations were developed to allow the new index to correctly relate to the θ_{\max} for compatible seismic actions in steel buildings.

Keywords:

Inter-story drift; significant duration; spectral acceleration for the fundamental mode; steel frames; destructive potential of earthquakes.

Como aprendizaje de los diferentes eventos sísmicos ocurridos en las últimas décadas, ha quedado demostrado que el daño que ocurre en las edificaciones durante estos eventos está relacionado con los desplazamientos laterales que se presenten en los pisos de los edificios (Barbat *et al.*, 2010; Kostinakis *et al.*, 2014; Perrault y Guéguen, 2015). Para garantizar un comportamiento adecuado de las edificaciones ante acciones sísmicas, los reglamentos actuales en el mundo, como el ASCE 7-16 en Estados Unidos (ASCE/SEI 7-16, 2016), el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad de México (MDOC-CFE, 2015), el Eurocódigo 8 (CEN, 2019), establecen los desplazamientos laterales permitidos para los diferentes sistemas estructurales. Esto lo realizan mediante la limitación de la máxima diferencia entre los desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las fuerzas sísmicas, dividido entre la altura del entrepiso; este valor es llamado “máxima distorsión de entrepiso” (θ_{\max}). Para que el θ_{\max} que se estime en una evaluación sísmica sea adecuado, resulta vital hacer una correcta definición de la amenaza sísmica de la zona de estudio. En el ámbito de la ingeniería sísmica, las dos formas más aceptadas para caracterizar la amenaza sísmica de un sitio son: los acelerogramas y los espectros de respuesta. Los acelerogramas son registros temporales del sitio a los valores de aceleración del terreno medidos en dos direcciones horizontales ortogonales (componente Norte – Sur [N-S] y Este – Oeste [E-W]) y una vertical que ocurren durante el evento sísmico. El uso de los acelerogramas en un análisis dinámico no lineal (ADNL) de un edificio en su modalidad incremental (*Incremental Dynamic Analysis, IDA*) (Vamvatsikos y Cornell, 2002), permite estimar la evolución temporal de la máxima respuesta de la estructura en términos de fuerzas, desplazamientos, etc., en función de la variable incrementada que, generalmente, es la intensidad de la acción sísmica. De esta manera se obtiene de forma adecuada las posibles consecuencias esperadas (daño) en las edificaciones (Díaz *et al.*, 2018; Kazantzi *et al.*, 2014; Vamvatsikos, 2014; Vargas *et al.*, 2018). Por otra parte, mediante los acelerogramas se puede obtener el respectivo “espectro de respuesta de aceleración (S_a)”; mismo que representa la máxima de aceleración del suelo esperada y las respectivas aceleraciones espectrales para diferentes periodos estructurales (Newmark y Hall, 1982). En las normativas sísmicas de forma simplificada se caracteriza la amenaza sísmica con base en los llamados “espectros de diseño (S_a diseño)”; obtenidos como un envolvente de los espectros de respuesta sísmica de un sitio o como resultado de un estudio de peligrosidad sísmica, en donde se contemple la influencia de todas las posibles fuentes sísmicas, su sismicidad histórica (o frecuencia con que se producen los sismos) y su intensidad; además del medio de propagación de la ondas sísmicas desde los hipocentros de los sismos hasta el sitio en estudio (leyes de atenuación en

función de magnitud y distancia) (McGuire, 2004; Pérez *et al.*, 2015). Así, para el periodo fundamental de oscilación (T_1) de cada edificación dentro del espectro de diseño, se determina la aceleración espectral que define las fuerzas sísmicas de diseño para la edificación.

El sistema estructural del edificio (concreto reforzado, acero, mampostería, etc.) y las características de las acciones sísmicas (intensidad, duración, máxima aceleración absoluta (*Peak ground acceleration, PGA*), respuesta espectral, etc.) tienen un papel fundamental en la estimación del grado de daño que podría tener una edificación (Bojórquez *et al.*, 2017; Bhanu *et al.*, 2019; Martineau *et al.*, 2020; Pinzón *et al.*, 2020). Por lo cual, resultará de interés encontrar la relación existente entre el potencial de daño o potencial destructivo de una acción sísmica debido a sus características con la máxima distorsión de entrepiso, θ_{\max} , que puede producir en el edificio. Esto puede ser útil para seleccionar las acciones sísmicas con mayor potencial de daño cuando se tiene un conjunto de acelerogramas. Por ejemplo, en un análisis de direccionalidad sísmica en edificios, donde se utilizan 360 acciones sísmicas, obtenidas de la combinación vectorial al rotar de 1° a 360° los dos componentes horizontales de un registro sísmico (Vargas *et al.*, 2018; Pinzón *et al.*, 2019).

En esta investigación se desarrollan, por una parte, un nuevo índice ($IPD_{SaT_1-IA-\Delta IA}$) para definir el potencial de daño probable de un sismo; considerando en este indicador, su intensidad de Arias (I_A), su duración significativa (Δ_{IA}) y la aceleración espectral para el periodo fundamental del edificio (Sa_{T_1}). Adicionalmente, se desarrollan ecuaciones predictivas para edificios de acero, que relacionan este nuevo indicador con la θ_{\max} . Para esto, se analizan dos edificios de acero en 2D, de 3 y 7 pisos ubicados en la ciudad de Oaxaca, México. La amenaza sísmica de la ciudad es definida mediante 23 registros sísmicos reales en sus dos componentes horizontales (46 acelerogramas reales). Además, usando estas acciones en una técnica de ajuste espectral en el programa SeismoMatch (Seismosoft, 2018a), se generan 46 acelerogramas compatibles con la amenaza sísmica definida por el espectro de diseño para la ciudad de Oaxaca por el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad de México (MDOC-CFE) (2015). La evaluación de la respuesta sísmica de los edificios se realiza mediante análisis dinámicos no lineales incrementales (ADNL-IDA), donde la PGA de los acelerogramas reales y compatibles es usada como variable incremental.

PROTOTIPO DE EDIFICIOS

En esta investigación son evaluados edificios de acero en dos dimensiones (2-D) de 3 pisos y 7 pisos. Los edificios tienen un sistema estructural de marcos a momento resistente con perfiles metálicos tipo W, de resistencia

de fluencia (f_y) de 50 ksi. Las conexiones se consideran totalmente rígidas (conexiones precalificadas FR definidas en el ANSI/AISC 358-16 (2016)) y con apoyos empotrados en las bases de las columnas. Para el diseño estructural es considerada una carga muerta (CM) y carga viva (CV) para los entrepisos de 6.5 kN/m^2 y 2.5 kN/m^2 (CV correspondiente con el uso de oficina de acuerdo a la NTC-RSEE-CD (2017)) respectivamente; mientras que para la azotea la carga muerta y carga viva fue de 5.5 kN/m^2 y de 1 kN/m^2 (CV correspondiente con el uso de azotea de acuerdo a la NTC-RSEE-CD (2017)) respectivamente. Para linealizar la carga en los marcos, se considera un ancho tributario de 6 m y se consideró el peso propio de los elementos estructurales. El diseño sismorresistente se realizó con el programa ECOgcW3 (GC Ingeniería y Diseño S.C., 2020), siguiendo las especificaciones del *Load and Resistance Factor Design* (LRFD) del ANSI/AISC 360-16 (2016) y para el espectro de diseño modificado de la ciudad de Oaxaca definido en el MDOC-CFE (2015) y el PRODISISv4.1 (INEEL-CFE, 2015). Se consideró las condiciones de un suelo blando y los valores de los factores de ductilidad ($Q=3$), sobre resistencia ($R_o=2$), redundancia ($\rho=1$) y de irregularidad ($\alpha=1$), con base en las características de los edificios.

En la Figura 1, se muestra la geometría 2-D y perfiles del marco de cada edificio obtenidos del diseño estructural. Del análisis modal espectral de cada marco de los edificios se obtiene que su periodo fundamental, T_1 , es de 0.50 segundos para el de 3 pisos y 0.86 segundos para el de 7 pisos.

Los ADNL-IDA de los marcos de los edificios se realiza en el programa SeismoStruct (Seismosoft, 2018b). Las cargas consideradas en estos análisis siguieron la combinación de 1.0 CM + 0.2 CV, con base en la recomendación del PEER/ATC 72-12 (2010), para realizar análisis no lineales. Las vigas y columnas se modelaron como elementos no lineales de esfuerzo-deformación a base de análisis uniaxial de fibras individuales de acero. Donde, el diagrama de esfuerzo-deformación del acero fue definido por un modelo de histéresis bilineal con endurecimiento (Seismosoft, 2018b). De esta forma se garantiza que la evaluación del comportamiento no lineal se realice a todo lo largo de la longitud de los elementos estructurales y a través de toda su sección transversal. Fueron usados dos criterios de desempeño, ambos basados en la deformación unitaria (ϵ) uniaxial de las fibras del acero; una para considerar la fluencia ($\epsilon_y=0.0025$) y otra para su fractura ($\epsilon_f=0.06$) (Seismosoft, 2018b).

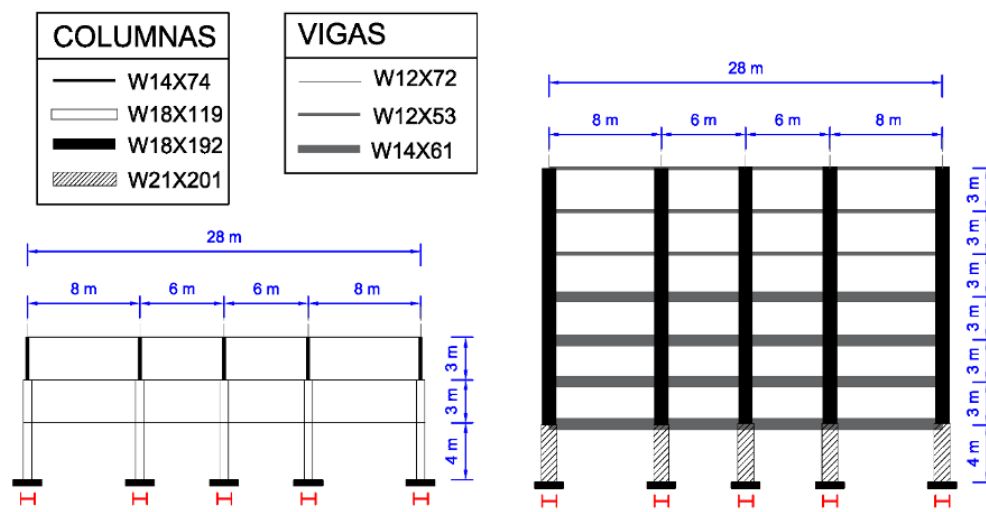


Figura 1. Geometría de los edificios 2-D usados en la evaluación. Fuente: Elaboración propia

ACCIONES SÍSMICAS

En esta investigación se considera como zona de estudio la ciudad de Oaxaca, Oaxaca, en México; que debido a su ubicación en la costa del Océano Pacífico está sujeta a una importante actividad sísmica, debido a las convergencias de las placas tectónicas de Cocos y Norteamericana (Vladimir y Pacheco, 1999). Para caracterizar la peligrosidad de esta ciudad son usados 23 registros de aceleraciones reales en sus dos componentes horizontales, Este-Oeste (E-O) y Norte-Sur (N-S) (46 acelerogramas reales). Los datos sísmicos fueron proporcionados por la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (RAII-UNAM, 2020), producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica. Los datos fueron distribuidos a través del Sistema de Base de Datos Acelerográficos en web: <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>

Mediante una técnica de ajuste espectral en el programa SeismoMatch (Seismosoft, 2018a) y considerando como espectro objetivo el espectro de diseño modificado para la ciudad de Oaxaca (MDOC-CFE, 2015) usado en el diseño estructural de los edificios; se generan 46 acelerogramas compatibles. En la Figura 2 se muestran los espectros del conjunto de acelerogramas reales y los compatibles, además del espectro de diseño objetivo. En la Tabla 1 se muestran las principales características del conjunto de acelerogramas reales y compatibles. Estas son: nombre del registro; distancia epicentral (D_{Epi}); Azimut estación – epicentro ($AZ_{Est-Epi}$); magnitud momento (M_w) del sismo registrado; duración total (Δ_r); la máxima aceleración absoluta (*Peak ground acceleration, PGA*), la aceleración espectral para el periodo

fundamental del edificio de 3 pisos ($Sa_{T_1-3 \text{ pisos}}$) y de 7 pisos ($Sa_{T_1-7 \text{ pisos}}$); la intensidad de Arias (I_A) y su respectiva la duración significativa (Δ_{IA}).

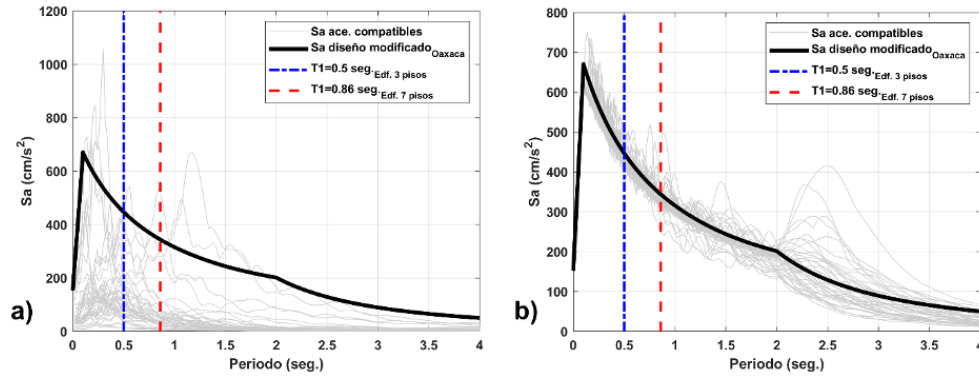


Figura 2. Espectros de respuestas del conjunto de acelerogramas a) reales y b) compatibles con el espectro de diseño modificado para la ciudad de Oaxaca, usado en el diseño estructural de los edificios. Fuente: Elaboración propia

En esta investigación se utilizó uno de los indicadores del potencial destructivo de una acción sísmica más usados en el mundo; la Intensidad de Arias (IA) (Arias, 1970), definida por la siguiente ecuación:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_{t_i}^{t_f} (a(t))^2 \cdot dt \quad (1)$$

Donde g es la aceleración debida a la gravedad, t_i es el comienzo del acelerograma, t_f es la duración total del acelerograma y $a(t)$ representa la historia del tiempo de aceleración de la componente del registro. De esta manera, la duración significativa (Δ_{IA}) se basa en la acumulación de energía y se define como el intervalo durante el cual se acumula del 5% al 95% de intensidad de Arias. Este intervalo se considera la fase fuerte de un sismo (Bommer y Martínez-Pereira, 1999; Trifunac y Brady, 1975). Como se observa en la Tabla 1, los 23 registros reales usados de la zona de estudio son variados en duración (en un rango de 9.9 segundos a 229.99 segundos) y con un potencial destructivo importante (con magnitud momento (M_w) mayores a 5.3° hasta los 8.2° y máxima aceleración absoluta (*Peak ground acceleration*, *PGA*) mayores de 10 cm/s^2 hasta 370.34 cm/s^2). De esta forma se tiene una adecuada caracterización de la amenaza sísmica para la ciudad de Oaxaca.

Tabla 1
Principales características del conjunto de acelerogramas usados en los ADNL-IDA

#	Registro (RAII-UNAM, 2020)	D _{Epi} (km)	AZ _{Epi} (°)	M _w	Δ _T (seg.)	Comp.	ESPECTROS DE ACELEROGRAMAS REALES					ESPECTROS DE ACELEROGRAMAS COMPATIBLES				
							PGA (cm/s ²)	Sa _{T1} -3 Pisos (cm/s ²)	Sa _{T1} -7 Pisos (cm/s ²)	I _A (seg.)	Δ _{IA} (seg.)	PGA (cm/s ²)	Sa _{T1} -3 Pisos (cm/s ²)	Sa _{T1} -7 Pisos (cm/s ²)	I _A (seg.)	Δ _{IA} (seg.)
1	OAXM7811.292	149.78	184.56	5.3	9.9	E-O	37.84	41.97	9.84	0.0171	7.36	228.23	501.56	352.86	0.9604	8.76
							57.22	46.03	10.43	0.0217	7.16	275.48	421.58	470.37	0.7189	7.64
2	OAXM7811.291	120.44	178.54	7.8	14.94	E-O	146.91	101.38	52.45	0.2325	7.61	265.83	430.67	313.59	0.9936	11.72
							217.10	190.93	78.18	0.5436	7.74	219.04	482.14	356.73	0.9227	11.53
3	OAXM7207.081	143.92	200.51	6.1	18.12	E-O	40.67	13.03	5.54	0.0074	7.14	239.64	421.78	316.42	0.7388	10.00
							36.12	12.29	9.67	0.0071	9.32	255.68	415.14	327.38	0.8976	13.73
4	OAXM8010.241	197.08	302.54	7	33.9	E-O	162.61	34.55	14.10	0.0991	15.36	275.23	445.79	329.72	0.9320	18.74
							116.35	53.31	22.73	0.0917	18.46	259.23	413.13	320.93	1.3081	19.63
5	OAXM7308.281	137.22	11.93	6.8	40.41	E-O	163.58	176.97	57.48	0.5821	14.58	235.83	416.71	334.32	1.3739	20.35
							199.03	336.87	86.00	0.8449	16.15	248.80	416.66	322.93	1.8062	23.76
6	OAXM9802.031	159.28	166.44	6.4	52.63	E-O	71.02	74.91	51.78	0.0451	27.48	231.85	453.49	322.24	1.2704	21.59
							45.69	65.09	29.95	0.0414	26.15	268.34	423.17	320.87	1.6259	30.36
7	OAXM0401.132	129.92	200.79	5.7	61	E-O	56.22	172.01	59.10	0.0340	11.60	287.87	428.87	330.68	0.9130	23.28
							42.96	137.50	38.61	0.0295	14.14	230.97	460.10	343.66	1.0672	19.77
8	OAXM0408.181	191.59	119.06	5.7	71	E-O	49.31	122.89	48.63	0.0446	14.37	252.89	412.76	379.62	1.3395	23.13
							38.92	155.38	52.61	0.0330	16.43	245.46	404.47	302.64	0.9696	17.21
9	OAXM0408.071	137.04	91.34	5.9	80	E-O	45.22	120.12	37.98	0.0581	22.73	298.88	499.86	324.33	1.4640	24.22
							48.14	122.19	42.53	0.0468	29.58	243.06	461.39	348.30	1.0282	19.43
10	OAXM0206.072	133.13	191.65	5.6	84	E-O	29.96	87.97	39.01	0.0171	18.97	243.31	463.52	327.62	1.0590	20.72
							26.41	85.60	38.60	0.0149	22.04	220.13	421.45	349.57	1.4753	40.24
11	OXTO0408.071	139.72	91.10	5.9	104	E-O	34.07	69.25	69.14	0.0277	30.77	255.11	410.67	324.54	1.2239	31.50
							28.22	49.39	66.63	0.0276	24.73	240.91	415.26	330.65	1.1384	27.92
12	OXPC1405.211	175.81	87.63	5.8	112	E-O	10.07	26.07	5.05	0.0017	22.97	228.56	447.90	323.37	1.9400	53.53
							12.70	34.77	10.58	0.0017	25.85	271.80	424.68	326.17	1.5316	37.99
13	OAXM9909.301	130.26	194.80	7.6	112.8	E-O	370.34	355.88	108.99	3.2614	19.49	239.52	466.78	333.01	2.2472	32.31
							352.60	342.93	74.39	2.8233	17.95	203.13	403.50	323.31	1.4493	23.65
14	OXCU1511.281	8.22	263.18	4.6	122.89	E-O	16.33	54.99	39.41	0.0103	27.19	294.21	414.53	367.74	1.5430	34.85
							20.40	56.41	40.31	0.0129	20.89	235.00	429.20	327.17	1.4667	32.52
15	OXPC1802.161	165.76	236.20	7.2	122.89	E-O	16.33	54.99	39.41	0.0103	27.19	294.21	414.53	367.74	1.5430	34.85
							20.40	56.41	40.31	0.0129	20.89	235.00	429.20	327.17	1.4667	32.52
16	OXCU1807.191	138.50	302.82	5.9	156.99	E-O	32.62	73.35	77.22	0.0257	27.57	220.33	438.27	248.40	0.7870	24.76
							34.84	61.87	106.54	0.0300	25.34	252.89	449.81	328.02	1.0362	28.38
17	OXPC1407.291	136.59	57.95	6.4	167	E-O	40.50	127.07	20.98	0.0490	33.10	222.43	482.97	326.71	1.6993	49.76
							48.47	103.92	26.01	0.0454	36.50	223.71	427.58	342.99	1.3203	42.62
18	OAXM1709.232	179.69	111.06	6.1	178.99	E-O	43.85	129.16	58.32	0.0358	20.65	300.12	416.80	318.86	1.2643	24.51
							43.85	129.16	58.32	0.0358	20.65	300.12	416.80	318.86	1.2643	24.51
19	OXAEO802.121	249.37	110.90	6.6	181.13	E-O	38.44	110.10	40.32	0.0367	44.53	227.25	502.84	329.83	1.2192	34.85
							30.14	96.24	54.18	0.0356	23.20	260.99	436.03	314.38	1.5198	38.56
20	OAXM1102.251	175.51	65.57	6	195.99	E-O	35.60	71.98	34.85	0.0262	39.11	255.41	426.60	356.12	1.3228	39.27
							36.77	101.86	27.48	0.0314	37.92	248.89	431.52	338.86	1.0816	37.89
21	OAXM1407.291	134.37	59.12	6.4	207	E-O	87.49	224.53	122.46	0.2253	29.34	219.84	410.98	274.00	0.9965	28.23
							98.23	415.33	104.25	0.2912	27.56	220.78	437.41	344.15	1.5029	37.70
22	OXCU1802.161	166.47	236.48	7.2	225.99	E-O	86.34	207.81	295.29	0.2832	28.41	293.95	416.20	313.73	1.5261	36.46
							100.74	202.89	523.54	0.3539	31.14	235.97	420.58	309.17	1.6972	40.91
23	OXPC1709.081	378.59	131.90	8.2	229.99	E-O	173.63	453.84	281.86	1.0618	39.50	233.15	494.08	334.82	1.7265	50.20
							143.38	391.97	315.68	1.0709	38.55	247.15	498.72	334.57	2.2974	48.38

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL INCREMENTAL

En esta sección se muestra la evaluación de la respuesta sísmica de los edificios, obteniendo como variable de salida la máxima distorsión de entrepiso (θ_{\max}). Para esto son llevados a cabo análisis dinámicos no lineales incrementales (ADNL-IDA), considerando la máxima aceleración absoluta (*Peak ground acceleration, PGA*) del conjunto de acelerogramas reales y compatibles de forma incremental hasta llevar al colapso a los edificios. En la Figura 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos de la relación θ_{\max} con la intensidad de Arias (I_A) de cada acelerograma y su respectiva aceleración espectral para el periodo del edificio (S_{aT1}). Se puede observar en la Figura 3 y 4 que los resultados del análisis de los edificios para el conjunto de los

acelerogramas reales presenta una mayor dispersión en comparación con los resultados para el conjunto de los acelerogramas compatibles; esto es debido a la gran aleatoriedad que presentan las acciones sísmicas reales al no tener un ajuste espectral (ver Figura 2).

En la Tabla 2, se muestran las correlaciones de θ_{\max} con la I_A y Sa_{T1} . Se observa que al utilizar acelerogramas compatibles en los análisis, se logra obtener una mejor correlación entre la respuesta de salida (θ_{\max} que representa el daño en el edificio) con las características de las acciones sísmicas usadas (I_A y Sa_{T1}). Siendo la Sa_{T1} la que tiene la mejor correlación tanto para los edificios de 3 y 7 pisos, así como para los acelerogramas reales y compatibles.

Tabla 2

Correlación entre $\theta_{\max} - I_A - Sa_{T1}$, obtenida de los resultados de los análisis ADNL-IDA

Edificio	Acelerogramas reales			Acelerogramas compatibles		
	Variable	Correlación		Variable	Correlación	
		Sa_{T1}	I_A		Sa_{T1}	I_A
3 pisos	θ_{\max}	0.72	0.40	θ_{\max}	0.89	0.85
7 pisos	θ_{\max}	0.65	0.39	θ_{\max}	0.90	0.86

Fuente: Elaboración propia

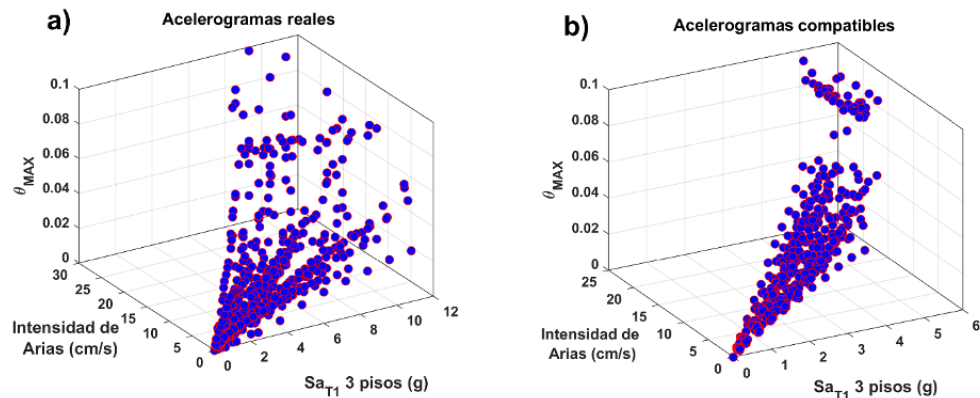


Figura 3. Relación $\theta_{\max} - I_A - Sa_{T1}$ obtenidos de los ADNL-IDA para el edificio de 3 pisos y para los a) acelerogramas reales y b) acelerogramas compatibles. Fuente: Elaboración propia

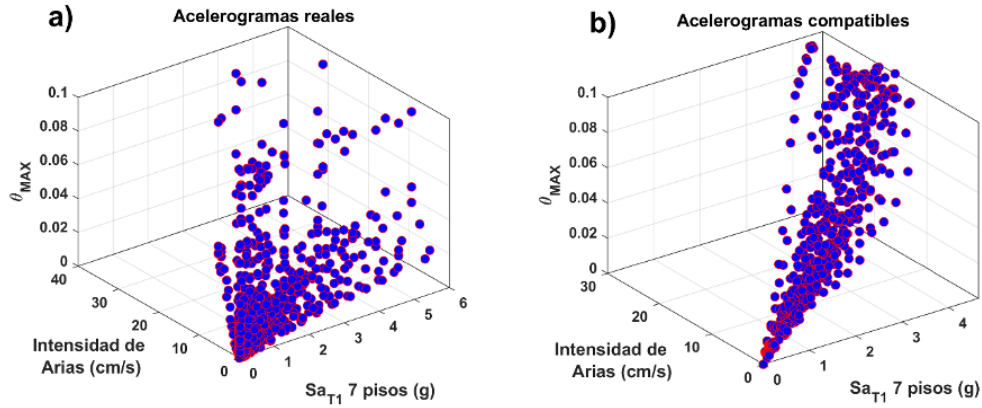


Figura 4. Relación $\theta_{\max} - I_A - Sa_{T1}$ obtenidos de los ADNL-IDA para el edificio de 7 pisos y para los a) acelerogramas reales y b) acelerogramas compatibles. Fuente: Elaboración propia

NUEVO ÍNDICE DE POTENCIAL DE DAÑO DE UNA ACCIÓN SÍSMICA

Las correlaciones obtenidas entre θ_{\max} con la I_A y Sa_{T1} se pueden considerar aceptables (en especial cuando se usan acelerogramas compatibles y si consideramos la Sa_{T1}) para predecir el potencial destructivo que podría tener una acción sísmica para causar un daño en la estructura. No obstante, se considera que éstas pueden mejorarse, si planteamos un nuevo índice del potencial de daño (IPD) de una acción sísmica en función de varias de sus características. Para esta investigación se presenta un IPD basado en tres características: 1) Sa_{T1} ; 2) I_A y 3) Δ_{IA} . La siguiente ecuación muestra el $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$, propuesto:

$$IPD_{SaT1-IA-\Delta IA} = Sa_{T1}^\alpha \left(\frac{I_A}{\Delta_{IA}} \right)^\beta \tag{2}$$

Donde α y β son factores de calibración. En este IPD se observa que tiene dos partes; la primera que es la influencia de la Sa_{T1}^α , que como se obtuvo en los ADNL-IDA de los edificios fue la variable con mejor correlación con el θ_{\max} . El segundo término $(I_A/\Delta_{IA})^\beta$, que considera la influencia de la acumulación de energía de la acción sísmica con respecto a la duración significativa.

El segundo término de la ecuación (2) permite que, en el índice propuesto se evalúe la condición de que una acción sísmica de corta duración representa un mayor potencial destructivo que una acción sísmica de larga duración, si ambas tienen la misma intensidad de Arias (energía acumulada). Para el desarrollo de este nuevo IPD se realizó un proceso de calibración con los resultados de los ADNL-IDA de los edificios, para determinar los valores óptimos de α y β . En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos para cada caso.

Tabla 3

Valores α y β usados en la calibración del índice $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$

Edificio	Acelerogramas reales		Acelerogramas compatibles	
	α	β	α	β
3 pisos	0.80	0.10	1.35	0.10
7 pisos	0.75	0.15	1.55	0.10

Fuente: Elaboración propia

En las Figuras 5 y 6 se muestran la relación θ_{max} con el $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$ para los edificios de 3 y 7 pisos y para el conjunto de acelerogramas reales y compatibles. En la Tabla 4 se presentan las correlaciones de la θ_{max} con el $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$ de cada caso. Observe que éstas aumentaron para ambos edificios y para ambos, conjunto de acelerogramas, si las comparamos con las correlaciones obtenidas en la Tabla 2 para $\theta_{max} - I_A - Sa_{T1}$.

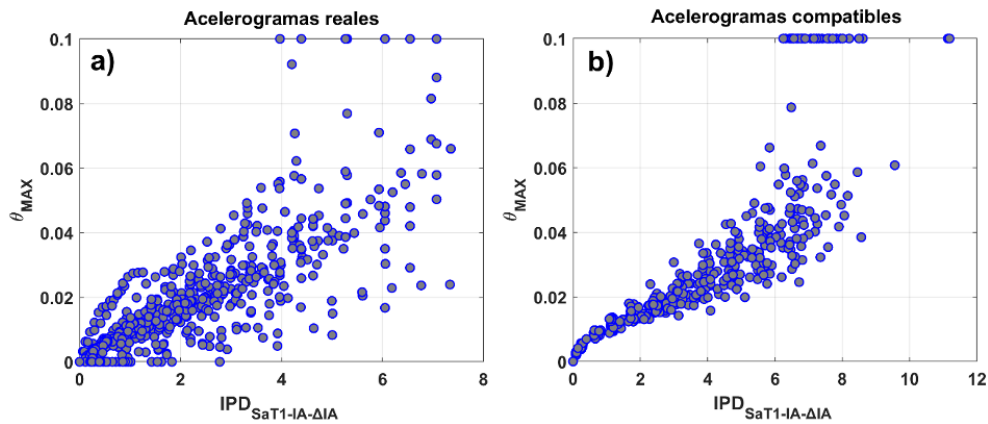


Figura 5. Relación $\theta_{max} - IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$ para el edificio de 3 pisos y para los a) acelerogramas reales y b) acelerogramas compatibles. Fuente: Elaboración propia

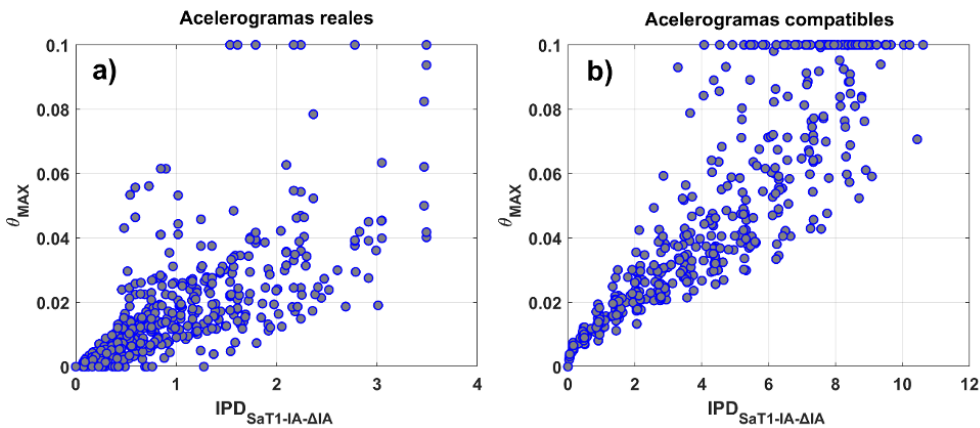


Figura 6. Relación $\theta_{max} - IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$ para el edificio de 7 pisos y para los a) acelerogramas reales y b) acelerogramas compatibles. Fuente: Elaboración propia

Tabla 4
Correlación entre θ_{max} – $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$

Edificio	Acelerogramas reales		Acelerogramas compatibles	
	Variable	IPD _{SaT1-IA-ΔIA}	Variable	IPD _{SaT1-IA-ΔIA}
3 pisos	θ_{max}	0.72	θ_{max}	0.89
7 pisos	θ_{max}	0.65	θ_{max}	0.90

Fuente: Elaboración propia

ECUACIONES PREDICTIVAS

Debido a que el $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$ propuesto, puede ser una alternativa para medir el potencial destructivo o de daño probable que puede causar una acción sísmica. En esta última sección se presenta una propuesta de ecuaciones predictivas para relacionar este nuevo índice con la variable de salida que determina el daño en un edificio, la θ_{max} . Los mejores ajustes se presentaron para los análisis de los edificios de 3 y 7 pisos con el conjunto de acelerogramas compatibles. Mientras que con el conjunto de acelerogramas reales los ajustes no mostraron ser adecuados para ser considerados predictivos. En la Figura 7 se muestran los ajustes y ecuaciones predictivas para los edificios de 3 pisos (Ec. 3) y 7 pisos (Ec. 4) con los acelerogramas compatibles. Se logró un ajuste adecuado para estos casos, siendo útil en futuras investigaciones de edificios de acero.

$$\theta_{max} = 0.0063(IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}) + 0.0023, \text{ para edificios de 3 pisos} \quad (3)$$

$$\theta_{max} = 0.0063(IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}) + 0.0023, \text{ para edificios de 3 pisos} \quad (4)$$

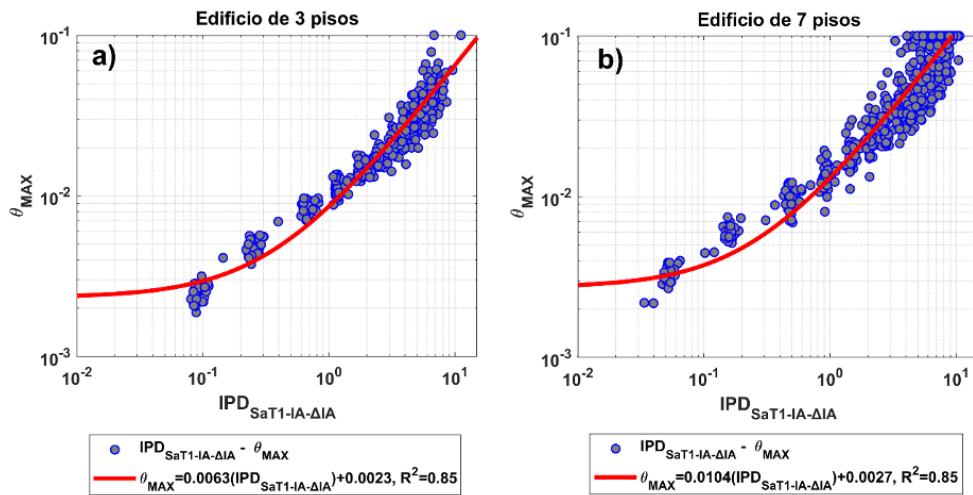


Figura 7. Ajuste de ecuación lineal para la relación $\theta_{\max} - IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$ en el edificio a) de 3 pisos y b) de 7 pisos, para los acelerogramas compatibles. Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

El objetivo de esta investigación fue presentar un nuevo índice del potencial de sismos, al que se llama en este artículo como el $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$. Nombre dado al estar en función de tres características de las acciones sísmicas: 1) la aceleración espectral para el periodo fundamental del edificio (Sa_{T1}); 2) la intensidad de Arias (I_A) y 3) su respectiva duración significativa (Δ_{IA}). También fueron presentadas ecuaciones predictivas para determinar la máxima distorsión de entrepiso (θ_{\max}) en función de este nuevo índice. Para esto se realizaron análisis dinámicos no lineales incrementales (ADNL-IDA) a dos edificios en 2D de acero de 3 y 7 pisos y para acciones sísmicas de reales y ajustadas al espectro de diseño de la ciudad de Oaxaca. Varias conclusiones relevantes obtenidas se presentan a continuación: i) Los valores obtenidos de θ_{\max} para ambos edificios muestran tener una menor dispersión para el conjunto de acelerogramas compatibles comparados con los obtenidos para los acelerogramas reales. Lo cual es de esperar, ya que los acelerogramas reales son muy variados en sus aceleraciones espectrales y con el ajuste espectral estás se vuelven similares y del orden de las ordenadas del espectro de diseño. ii) La correlación del θ_{\max} con la Sa_{T1} e I_A de las acciones sísmicas es buena en los análisis con el conjunto de acelerogramas compatibles. El $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$ propuesto logra una mejor correlación con la θ_{\max} en comparación de utilizar solo por separado la Sa_{T1} o la I_A ; tanto para el conjunto de acelerogramas reales y los compatibles, así como para los dos edificios estudiados. iii) Las ecuaciones predictivas presentadas relacionan correctamente el nuevo índice de potencial del daño con la θ_{\max} para acciones sísmicas compatibles con casos particulares de edificios de acero de baja y media altura.

De lo anterior, se concluye que el $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$ representa una buena alternativa para medir el potencial destructivo de las acciones sísmicas. De forma que, si se tiene un conjunto amplio de acelerogramas que se desean utilizar; se pueden seleccionar solo las acciones sísmicas que con base en su $IPD_{SaT1-IA-\Delta IA}$, representan un mayor potencial de daño para la estructura que se desea analizar. Por otra parte, las ecuaciones propuestas permiten obtener un estimado rápido del valor esperado en la θ_{max} para cada acción sísmica en edificios de las tipologías aquí estudiadas.

REFERENCIAS

- ANSI/AISC 358-16.** (2016). “Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications”, *American National Standard and American Institute of Steel Construction*, EUA. Disponible en: <https://www.aisc.org/products/publication/standards/prequalified-connections-ansiaisc-358-16-with-ansiaisc-358s1-18-and-ansiaisc-358s2-20/>
- ANSI/AISC 360-16.** (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois 60601-6204, EUA. <https://www.aisc.org/products/publication/standards/specification-for-structural-steel-buildings-ansiaisc-360-162/>
- Arias A.** (1970). *A measure of earthquake intensity*. Cambridge, MA: MIT Press; pp. 438–83.
- ASCE/SEI 7-16.** (2016). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, *ASCE/SEI 7-16*, *American Society of Civil Engineers/Structural Engineering Institute*, Reston, Virginia, EUA. <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784408094>
- Barbat, A. H., Carreño, M. L., Pujades, L. G. y Lantada, N., Cardona, O. D. & Marulanda, M. C.** (2010). “Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to a pilot area”. *Structure and Infrastructure Engineering*, 6(1-2), 17–38. <https://doi.org/10.1080/15732470802663763>
- Bhanu, V., Chandramohan, R., y Sullivan, T. J.** (2019). “Investigating the influence of ground motion duration on the dynamic deformation capacity of reinforced concrete framed structures”. *Pacific Conference on Earthquake Engineering and Annual NZSEE*, 1–8. <http://hdl.handle.net/10092/17414>
- Bojórquez E., Chávez R., Reyes-Salazar A., Ruiz S. E. y Bojórquez J.** (2017). A new ground motion intensity measure IB. *Soil Dynam Earthq Eng*, 99(1), 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.011>
- Bommer J.J. y Martínez-Pereira A.** (1999). The effective duration of earthquake strong motion. *J Earthq Eng*. 3(1), 127–72. <https://doi.org/10.1080/13632469909350343>
- CEN.** (2019). “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions, and rules for buildings”. EN 1998–1:2004. *Comité Européen de Normalisation, Brussels*. (p. 231) <https://www.wiley.com/en-gb/Design+of+Steel+Structures+for+Buildings+in+Seismic+Areas:+Eurocode+8:+Design+of+Structures+for+Earthquake+Resistance+Part+1:+General+Rules,+Seismic+Action+and+Rules+for+Buildings-p-9783433030103>
- Díaz S.A., Pujades L.G., Barbat A.H., Hidalgo-Leiva D.A y Vargas Y.F.** (2018). Capacity, damage and fragility models for Steel buildings. A probabilistic

- approach. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(1), 1209-1243. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0237-0>
- GC Ingeniería y Diseño S.C.** (2020). Software Estructuras de Concreto Reforzado, Gerardo Corona. *ECOgcW3*. <https://www.gcingeneria.com/programas/ecogcw3.html>
- INEEL-CFE.** (2015). Software PRODISISv4.1. *Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias. Comisión Federal de Electricidad*. México.
- Kazantzi, A. K., Vamvatsikos, D., y Lignos, D. G.** (2014). Seismic performance of a steel moment-resisting frame subject to strength and ductility uncertainty. *Engineering Structures*, 78(1), 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.06.044>
- Kostinakis, K. G., Athanatopoulou, A. M., y Morfidis, K. E.** (2014). Correlation between ground motion intensity measures and seismic damage of 3D R/C buildings. *Engineering Structures*, 82(1), 151–167. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.035>
- Martineau, M., Lopez, A. F., y Vielma, J. C.** (2020). Effect of Earthquake Ground Motion Duration on the Seismic Response of a Low-Rise RC Building. *Advances in Civil Engineering*, 8891282. <https://doi.org/10.1155/2020/8891282>
- McGuire R. K.** (2004). Seismic hazard and risk analysis. *Institute Earthquake Engineering Research*. Oakland, CA, pp. 240.
- MDOC-CFE.** (2015). Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismos. *Comisión Nacional de Electricidad (CFE)*. México, pp. 745. <https://www.gob.mx/ineel/articulos/manual-de-diseno-de-obras-civiles-diseno-por-sismo-logro-de-la-ingenieria-de-mexico>
- Newmark N. M. y Hall W. J.** (1982). Earthquake spectra and design. *Earthquake Engineering Research Institute*. Berkeley, California, USA, p.103.
- NTC-RSEE-CM.** (2017). Norma Técnica Complementaria para la Revisión de la Seguridad Estructural de las Edificaciones de la Ciudad de México. *Gaceta Oficial del Gobierno de México*, p. 712. https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf&ved=2ahUKEwikrNf_i6nxAhXtQjABHfaeD3MQFjAAegQIBBAC&usg=AOvVawocGCv1wQNw4fqY2islepqa
- PEER/ATC 72-1.** (2010). Modeling and acceptance criteria for seismic design and analysis of tall buildings. *Applied Technology Council and Pacific Earthquake Engineering Research Center*, pp. 242. Disponible en: https://store.atcouncil.org/index.php?dispatch=products.view&product_id=242
- Pérez, R. L. E., Mena, H. U., Tena, C. A., y Mena, S. E.** (2015). Espectros de diseño sísmico para la nueva versión del manual de diseño de obras civiles de CFE. *XX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Acapulco, Guerrero*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/316919665_

Espectros_de_diseno_sismico_para_la_nueva_version_del_Manual_de_Disenio_de_Obras_Civiles_de_CFE

- Perrault**, M. y Guéguen, P. (2015). Correlation between ground motion and building response using Californian earthquake records. *Earthquake Spectra. Earthquake Engineering Research Institute*, 31(4), 2027. <https://doi.org/10.1193/062413EQS168M>
- Pinzón**, L. A., Vargas-Alzate, Y. F., Pujades, L. G. y Diaz, S. A. (2020). A drift-correlated ground motion intensity measure: Application to steel frame buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 132(1), 106096. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106096>
- Pinzón**, L. A., Díaz, S. A., Pujades, L. G. y Vargas, Y. F. (2019). An Efficient Method for Considering the Directionality Effect of Earthquakes on Structures. *Journal of Earthquake Engineering. Article 25(9)*, 1679-1708. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1597783>
- RAII-UNAM**. (2020). *Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM*. <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/Inicio.aspx>
- Seismosoft**. (2018a). SeismoMatch. Earthquake Software for Response Spectrum Matching. Italia. Disponible en: <https://seismosoft.com/products/seismomatch/>
- Seismosoft**. (2018b). SeismoStruct. *Civil Engineering Software for Structural Assessment y Structural Retrofitting*. Italia. <https://seismosoft.com/products/seismostruct/>
- Trifunac**, M. D. y Brady, A. G. (1975). A study on the duration of strong earthquake ground motion. *Bull Seismol Soc Am*, 65(1), 581–626. <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/65/3/581/101795/A-study-on-the-duration-of-strong-earthquake?redirectedFrom=fulltext>
- Vamvatsikos** D. (2014). Seismic performance uncertainty estimation via IDA with progressive accelerogram-wise Latin Hypercube Sampling. *Journal of Structural Engineering*. 140(8), 1-10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001030](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001030)
- Vamvatsikos** D. y Cornell C.A. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 31(3), 491-514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- Vargas** Y.F., Pujades L.G., Barbat A.H., Hurtado E., Diaz S.A. y Hidalgo-Leiva D. A. (2018). Probabilistic seismic damage assessment of reinforced concrete buildings considering directionality effects. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(6), 817-829. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1385089>
- Vladimir** K. & Pacheco J.F. (1999). *Cien años de sismicidad en México. Poster del Instituto de Geofísica*, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM. <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>