












Artículo de investigación

Fragilidad sísmica de un edificio de concreto reforzado usando medidas de intensidad sísmica vectorial basadas en la forma espectral

Seismic fragility of a reinforced concrete building using vector-valued seismic intensity measures based on spectral shape

Noel Zavala Gutiérrez¹ , Edén Bojórquez Mora² , Manuel Antonio Barraza Guerrero¹ , Juan Bojórquez Mora² ,
, Almendra Villela y Mendoza¹ , José Ignacio Torres Peñuelas² , José Rubén Campos Gaytán¹ , Ricardo Sánchez Vergara¹ 

¹Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México

²Facultad de Ingeniería Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa, México

Autor de correspondencia: Manuel Antonio Barraza Guerrero, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, Baja California, México. E-mail: barraza.manuel@uabc.edu.mx. ORCID: 0000-0002-7951-9934.

Recibido: 24 de enero del 2021

Aceptado: 18 de abril del 2022

Publicado: 29 de abril del 2022

Resumen. - Las medidas de intensidad sísmica vectorial han demostrado ser más eficientes en comparación con las medidas de intensidad sísmica tradicionales para predecir la respuesta de estructuras con comportamiento no lineal o aquellas dominadas por los modos superiores; sin embargo, pocos estudios han demostrado la habilidad de estas nuevas medidas para una estimación apropiada de la fragilidad sísmica de edificios. En el presente trabajo se analizaron ocho medidas de intensidad sísmica vectorial compuestas por dos parámetros. Para todos los casos se utilizó la pseudoaceleración en el modo fundamental de vibración de la estructura, $Sa(T_1)$, como primera componente del vector y la Aceleración Máxima del Suelo (AMS), Velocidad Máxima del Suelo (VMS), duración efectiva (T_D), potencial del movimiento sísmico (I_D) y los parámetros de forma espectral R_{T_1, T_2} , Np_{Sa} , Np_V y Np_{Sv} , como segunda componente del vector. Para evaluar la eficiencia de las medidas de intensidad sísmica vectorial en el análisis de fragilidad sísmica, un edificio de concreto reforzado de 10 niveles fue sometido a 30 registros sísmicos de banda angosta obtenidos en suelo blando de la Ciudad de México. Los resultados demostraron que la medida de intensidad sísmica vectorial que presenta una mejor relación con la probabilidad de falla es $\langle Sa(T_1), Np_{Sa} \rangle$, en comparación con las otras medidas, especialmente respecto a $Sa(T_1)$ que es ampliamente usada en los códigos de construcción vigentes. Por lo tanto, es deseable que en los futuros reglamentos de construcción se consideren medidas de intensidad sísmica más apropiadas.

Palabras clave: Medidas de intensidad sísmica; Forma espectral; Respuesta estructural; Superficies de fragilidad; Desempeño sísmico; Fragilidad sísmica.

Abstract. – Vector-valued ground motion intensity measures have shown to be more efficient compared to traditional intensity measures for predicting the response of structures with non-linear behavior or those dominated by higher modes; however, few studies have demonstrated the capability of these new parameters to estimate the seismic fragility of buildings with good accuracy. In the present work, eight vector-valued seismic intensity measures composed of two parameters were analyzed. For all the cases, the pseudo-acceleration at the fundamental mode of vibration of the structure, $Sa(T_1)$, was used as the first component of the vector, and the peak ground acceleration, peak ground velocity, effective duration, seismic potential, and the spectral shape parameters R_{T_1, T_2} , Np_{Sa} , Np_V , and Np_{Sv} , as the second component of the vector. In order to evaluate the efficiency of the selected intensity measures in the seismic fragility analysis, a 10-level reinforced concrete building was subjected to 30 narrow-band seismic records obtained in the soft soil of México City. The results have shown that the vector-valued seismic intensity measures that present a better relationship with the probability of failure are $\langle Sa(T_1), Np_{Sa} \rangle$ compared to the other parameters; especially regarding $Sa(T_1)$ which is widely used in current building codes. Therefore, it is desirable that future building regulations should consider more appropriate ground motion intensity measures.

Keywords: Intensity measures; Spectral shape; Structural response; Fragility surfaces; Seismic performance; Seismic fragility.



1. Introducción

El fenómeno sísmico ha sido estudiado a lo largo de la historia. En particular, se ha buscado un parámetro que describa el potencial destructivo de un movimiento sísmico, dicho parámetro se conoce como medida de intensidad sísmica (MIS), el cual es importante para la estimación del peligro sísmico, respuesta estructural, fragilidad sísmica entre otro tipo de estudios.

Debido a la importancia de las MIS, en la década de los 70's surgió la necesidad de crear medidas de intensidad sísmica con la habilidad de predecir con mayor aproximación la respuesta estructural de edificaciones basadas en modelos numéricos o cuantitativos [1, 2].

En fechas recientes, se ha optado por profundizar más en el comportamiento dinámico de estructuras no lineales dada su alta complejidad de análisis y carga computacional. Algunos códigos de construcción permiten la opción de ignorar esta interacción o de reducir las fuerzas consideradas que llegan a la base, pero ha quedado documentado que esto lleva a subestimación de las demandas estructurales llegando a resultados poco razonables. Sin embargo, las MIS tradicionales son ineficientes cuando se analizan estructuras con comportamiento no lineal, por lo que existe una carencia para evaluar estas estructuras con medidas más sofisticadas [3].

Por esta razón, diversos autores [4-8] han planteado la alternativa de seleccionar MIS que disminuyan los inconvenientes de tratar con estructuras complejas al momento de evaluar su respuesta estructural ante los efectos sísmicos. Por esto, la última década se ha enfocado a evaluar el desempeño sísmico de medidas de intensidad sísmica vectoriales (MISV) con fines de encontrar la medida que mejor describa la respuesta estructural [9-17], concluyendo que las MISV basadas en la forma espectral tienen un mejor comportamiento.

Ahora el inconveniente se encuentra en evaluar la fragilidad sísmica utilizando estas MIS más sofisticadas debido a que pocos estudios han evaluado las MISV basadas en la forma espectral, y ninguno lo ha aplicado en edificios de concreto reforzado para obtener superficies de fragilidad, es por ello la importancia y justificación de este trabajo.

Por lo tanto, en el presente artículo se analiza el desempeño sísmico de ocho MISV, utilizando $Sa(T_1)$ como primer parámetro del vector y AMS, VMS, T_D , I_D , R_{T_1, T_2} , N_{psa} , N_{pv} y N_{psv} como segundo parámetro, para evaluar la fragilidad sísmica en función de la probabilidad de falla.

Para lograr los objetivos del presente estudio, se realizó un análisis dinámico incremental utilizando $Sa(T_1)$ y considerando la Distorsión Máxima de Entrepiso (DME) como parámetro de demanda sísmica. Después, se aplicó una regresión logística multinomial para estimar cuál medida de intensidad presenta una mejor relación asociada a la fragilidad sísmica de un edificio de concreto reforzado de 10 niveles de altura sometido a 30 registros sísmicos de banda agosta.

2. Antecedentes

Las MIS se pueden catalogar como escalares (e.g. AMS, VMS, DMS), o vectoriales si relacionan dos o más variables y su influencia se puede apreciar en un plano tridimensional [18].

Algunos investigadores han orientado el campo de conocimiento hacia encontrar una MIS que represente de manera confiable la respuesta estructural de edificios ante demandas sísmicas [4, 5, 19], por lo que se estableció un índice de MIS basadas tanto en respuestas máximas (e.g. AMS, VMS, DMS) como en respuestas estructurales (energía de entrada, energía histerética, deformación, entre otras), haciendo



una correlación entre ellas [6]. Sin embargo, también se expresó la incertidumbre de utilizar ϵ como estimador en la MIS [8] para obtener la respuesta estructural para el caso donde se tenían registros sísmicos de una fuente cercana y donde además la estructura analizada no fuera dominada por su primer modo de vibración (comportamiento inelástico). Con esto, se ha logrado incorporar un parámetro de forma espectral que permite una mayor aproximación en la respuesta estructural y reduce las limitaciones de las MIS en estructuras con comportamiento no lineal edificadas en lugares donde se presentan sismos de fuente cercana [5].

Además, dado que todos los estudios estaban limitados a estructuras regulares en dos dimensiones, se han realizado pruebas usando cinco MIS aplicadas a un edificio irregular de tres dimensiones con problemas de torsión debido al efecto de registros sísmicos bidireccionales superficiales. Se concluyó que $S_a(T_1)$ muestra una débil correlación con la distorsión de entrepiso y de azotea debido a su inhabilidad de capturar los modos fundamentales a través de las ordenadas espectrales [9]. Posteriormente, se implementaron el uso de una MIS que considera el parámetro de aceleración espectral en el primer modo de la estructura y el parámetro N_p considerando sismos de fuente cercana y de banda angosta. Los resultados mostraron que esta nueva MISV se comportaba de manera apropiada en cuanto a eficiencia, suficiencia y robustez al escalamiento, con respecto a otras MISV que se han usado históricamente [7].

Debido a los resultados de las investigaciones en la primera década del siglo XXI respecto a MISV, y sobre todo de aquellas basadas en la forma espectral, surgieron un gran número de estudios [10-12, 15, 16, 20-26] en los cuales revisaban el desempeño sísmico de diferentes MIS. De manera general se destaca que algunas medidas son más apropiadas que otras para

ciertos casos puntuales, pero que, en general, las MISV basadas en la forma espectral representan la mejor opción en cuanto a predicción de la respuesta con la menor incertidumbre, sobre todo para aquellas estructuras que se desvinculan del rango elástico.

Posteriormente, dada la complejidad en los diferentes tipos de estructuras y que las propiedades de los movimientos del suelo con respecto a la amplitud, frecuencia y duración no pueden ser caracterizadas por una sola MIS [27], se creó una MISV compuesta de seis diferentes MIS escalares denominada IMPLS. El objetivo principal de su estudio no fue buscar la mejor MIS sino proponer un nuevo enfoque para desarrollar una MIS para predecir respuestas estructurales bajo los supuestos de los análisis de demanda sísmica probabilística para sistemas de un solo grado de libertad, con la premisa que no tiene por qué utilizarse una sola medida cuando se pueden abarcar un conjunto de estas para minimizar los problemas de dependencia estructural. Los resultados implican que IMPLS es lo suficientemente robusta para predecir la respuesta en edificios con comportamiento histerético y se considera con suficiente utilidad para los parámetros de demanda sísmica.

Por otro lado, las curvas de fragilidad, representadas en función de la probabilidad de falla ligada a una MIS, pueden ser obtenidas a partir de dos o más componentes en el vector de la MISV [28]. Existe un gran número de enfoques para elaborar curvas de fragilidad con distintas suposiciones y restricciones a considerar [29]. Se han abordado distintos enfoques como simulaciones con el método de Montecarlo para reducir las incertidumbres asociadas a las demandas sísmicas y probabilidades de colapso [30], análisis en la nube basados en modelos de regresión lineal [31] y estimaciones de densidad de Kernel para calcular la probabilidad condicional de la



respuesta estructural para un registro sísmico dado para obtener superficies de fragilidad que estén libres de suposiciones lognormales [32].

Las ventajas del primero es la reducción del sesgo inducido por el escalamiento de registros a niveles muy elevados con tal de llegar al nivel de intensidad predefinido. De hecho, investigaciones pasadas han demostrado que usar factores de escala superiores a 10 genera resultados sesgados. Por esto se debe tener cuidado cuando se evalúa la vulnerabilidad sísmica ante eventos principales o réplicas [33].

La fragilidad sísmica es estimada regularmente con base en MIS escalares representada mediante las curvas de fragilidad que describen la relación entre la respuesta estructural y el peligro sísmico [34-39]. Sin embargo, si actualmente se cuenta con MISV, se pueden formar, en lugar de curvas, superficies de fragilidad que estén ligadas a una respuesta estructural más apropiada. Por esto se evaluó la eficiencia de medidas de intensidad vectoriales aplicadas al análisis de colapso en edificios, proponiendo una nueva MIS que se adecúa mejor para este tipo de estudios, $S_a(T_1)/DSI$ (intensidad del espectro de desplazamiento), la cual captura el daño de registros sísmicos con periodos largos [15].

Los resultados de este estudio probaron que las MIS basadas en $S_a(T_1)$ como primera componente nos llevan a una mejor eficiencia, pero la suficiencia aún es un tema a considerar en trabajos futuros. Considerando esto, se decidió aplicar el mismo enfoque pero ahora para estructuras irregulares bidimensionales. Los resultados confirmaron que la mejor MIS fue aquella basada en el vector $S_a(T_1)/DSI$ para

predecir la capacidad de colapso y por lo tanto fue la que mayor eficiencia produjo al momento de calcular las funciones de fragilidad [40].

Finalmente, se ha creado una nueva MISV, Intensidad de Bojórquez, la cual contiene los parámetros de forma espectral N_p y R_{T_1, T_2} que predice con mayor aproximación la respuesta no lineal de estructuras dado que provee mayor información que la aceleración espectral al generar un segundo punto en el espectro de respuesta en pseudo-aceleración [4], y además considera el efecto de los modos superiores de vibrar de la estructura [14].

3. Metodología

3.1 Modelación del edificio de concreto reforzado (ECR)

El modelo a analizar consta de un ECR de 10 niveles con 3.5 metros de altura cada uno, 3 crujeas en dirección X y Y de 8 metros de longitud cada una. Sus parámetros principales son: periodo estructural de 1.37s, amortiguamiento correspondiente al 5% del amortiguamiento crítico, resistencia del concreto igual a 300 kg/cm^2 , módulo de elasticidad de $2.45 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ y una relación de Poisson de 0.20. Además, el edificio fue diseñado y dimensionado de manera que cumpla con el reglamento de construcción de la ciudad [41] para los estados límites de cargas gravitacionales, sismo y de servicio, considerando un uso para oficinas asentado sobre suelo de la zona III de la CDMX. En la **Figura 1** podemos apreciar su topología desde distintas vistas con las cotas correspondientes de eje a eje.

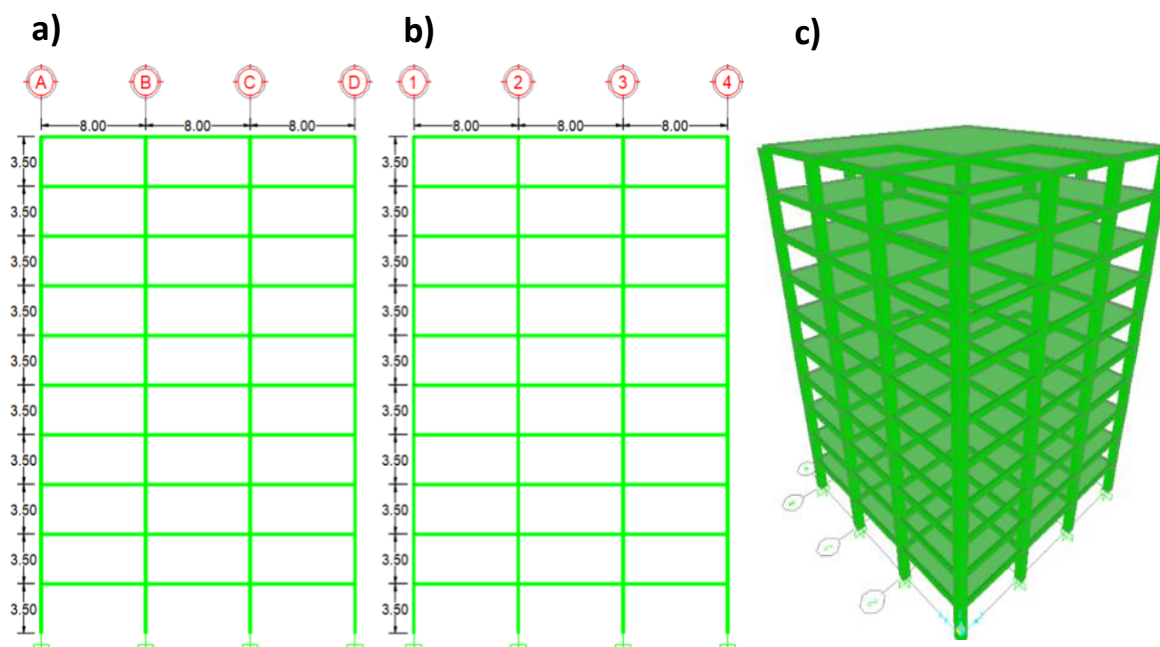


Figura 1. ECR modelado, vistas a) norte-sur, b) este-oeste y c) tridimensional. Acotaciones en metros.

3.2 Selección de registros sísmicos

Los registros fueron seleccionados de manera que fuesen representativos a los que afectan constantemente la CDMX y sus edificios; es decir, que la muestra de sismos caracterice apropiadamente el efecto de sitio que presenta el lugar de estudio para la obtención de las superficies de fragilidad.

Para ello se escogieron 6 sismos de banda angosta registrados en diferentes estaciones sísmicas (30 registros en total) ocurridos en la Costa Mexicana del Pacífico con una magnitud mínima de 6.8 y máxima de 8.1 en la escala de magnitud de momento (M_w), dado que este tipo de sismos someten a la estructura a mayores demandas en comparación con los sismos superficiales o de banda ancha. En la

3.3 Medidas de intensidad sísmica seleccionadas

Como se mencionó, en el presente trabajo se analiza la eficiencia de 8 MISV, las cuales se muestran en la

Tabla 2 junto con su formulación matemática. Cabe recalcar que en este estudio se utilizaron MISV y que los análisis son considerando el espectro de pseudo aceleración en el periodo fundamental de la estructura, $S_a(T_1)$, de ahora en adelante denominada solamente S_a , como primera componente del vector. Lo anterior significa que las MISV estarán conformadas como se muestra en

Tabla 3:



Tabla 1 se muestran los eventos seleccionados y algunas de sus características principales.

Evento	Fecha	Estación	Longitud (°) **	Latitud (°) **	Magnitud (Mw)	AMS (cm/s ²)	VMS (cm/s)	T _b (s)	I _b (*)
1	19/09/1985	SCT	-102.468	18.419	8.1	178	59.5	63.34	13.12
2	21/09/1985	Tláhuac Deportivo	-101.681	17.828	7.6	48.7	14.6	133.79	0.76
3	25/04/1989	Alameda	-99.275	16.795	6.8	45.0	15.6	115.78	17.09
4	25/04/1989	Garibaldi	-99.275	16.795	6.8	68.0	21.5	117.74	8.69
5	25/04/1989	SCT	-99.275	16.795	6.8	44.9	12.8	128.44	14.16
6	25/04/1989	Sector Popular	-99.275	16.795	6.8	45.1	15.3	117.44	28.26
7	25/04/1989	Tlatelolco TL08	-99.275	16.795	6.8	52.9	17.3	118.92	9.43
8	25/04/1989	Tlatelolco TL55	-99.275	16.795	6.8	49.5	17.3	132.31	7.33
9	14/09/1995	Alameda	-98.667	16.752	7.3	39.3	12.2	105.34	13.79
10	14/09/1995	Garibaldi	-98.667	16.752	7.3	39.1	10.6	89.62	24.12
11	14/09/1995	Liconsa	-98.667	16.752	7.3	30.1	9.62	92.27	14.12
12	14/09/1995	Plutarco E.C	-98.667	16.752	7.3	33.5	9.37	95.86	16.69
13	14/09/1995	Sector Popular	-98.667	16.752	7.3	34.3	12.5	122.10	36.36
14	14/09/1995	Tlatelolco TL08	-98.667	16.752	7.3	27.5	7.8	142.42	28.23
15	14/09/1995	Tlatelolco TL55	-98.667	16.752	7.3	27.2	7.4	124.70	56.91
16	09/10/1995	Cibeles	-104.245	18.993	8.0	14.4	4.6	125.32	35.87
17	09/10/1995	CU Juárez	-104.245	18.993	8.0	15.8	5.1	122.51	34.62
18	09/10/1995	C.U.P.J	-104.245	18.993	8.0	15.7	4.8	130.07	33.17
19	09/10/1995	Córdoba	-104.245	18.993	8.0	24.9	8.6	113.46	23.44
20	09/10/1995	Liverpool	-104.245	18.993	8.0	17.6	6.3	147.10	17.22
21	09/10/1995	Plutarco E.C	-104.245	18.993	8.0	19.2	7.9	98.99	33.66
22	09/10/1995	Sector Popular	-104.245	18.993	8.0	13.7	5.3	123.85	37.87
23	09/10/1995	Valle Gómez	-104.245	18.993	8.0	17.9	7.18	131.26	24.51
24	11/01/1997	CU Juárez	-102.580	18.340	7.1	16.2	5.9	117.74	21.44
25	11/01/1997	C.U.P.J	-102.580	18.340	7.1	16.3	5.5	109.49	23.31
26	11/01/1997	García Campillo	-102.580	18.340	7.1	18.7	6.9	104.55	9.32
27	11/01/1997	Plutarco E.C.	-102.580	18.340	7.1	22.2	8.6	112.26	14.26
28	11/01/1997	Estación 10 Roma A	-102.580	18.340	7.1	21.0	7.76	88.72	25.61
29	11/01/1997	Estación 11 Roma B	-102.580	18.340	7.1	20.4	7.1	96.54	27.05
30	11/01/1997	Tlatelolco TL08	-102.580	18.340	7.1	16.0	7.2	120.88	14.93

3.3 Medidas de intensidad sísmica seleccionadas

Como se mencionó, en el presente trabajo se analiza la eficiencia de 8 MISV, las cuales se muestran en la

Tabla 2 junto con su formulación matemática. Cabe recalcar que en este estudio se utilizaron MISV y que los análisis son considerando el espectro de pseudo aceleración en el periodo fundamental de la estructura, Sa(T1), de ahora en



adelante denominada solamente Sa, como primera componente del vector. Lo anterior significa que las MISV estarán conformadas como se muestra en

Tabla 3:

Tabla 1. Sismos utilizados en el análisis dinámico incremental.

* = Adimensional, **= Coordenadas del epicentro.

Evento	Fecha	Estación	Longitud (°) **	Latitud (°) **	Magnitud (Mw)	AMS (cm/s ²)	VMS (cm/s)	T _D (s)	I _D (*)
1	19/09/1985	SCT	-102.468	18.419	8.1	178	59.5	63.34	13.12
2	21/09/1985	Tláhuac Deportivo	-101.681	17.828	7.6	48.7	14.6	133.79	0.76
3	25/04/1989	Alameda	-99.275	16.795	6.8	45.0	15.6	115.78	17.09
4	25/04/1989	Garibaldi	-99.275	16.795	6.8	68.0	21.5	117.74	8.69
5	25/04/1989	SCT	-99.275	16.795	6.8	44.9	12.8	128.44	14.16
6	25/04/1989	Sector Popular	-99.275	16.795	6.8	45.1	15.3	117.44	28.26
7	25/04/1989	Tlatelolco TL08	-99.275	16.795	6.8	52.9	17.3	118.92	9.43
8	25/04/1989	Tlatelolco TL55	-99.275	16.795	6.8	49.5	17.3	132.31	7.33
9	14/09/1995	Alameda	-98.667	16.752	7.3	39.3	12.2	105.34	13.79
10	14/09/1995	Garibaldi	-98.667	16.752	7.3	39.1	10.6	89.62	24.12
11	14/09/1995	Liconsa	-98.667	16.752	7.3	30.1	9.62	92.27	14.12
12	14/09/1995	Plutarco E.C	-98.667	16.752	7.3	33.5	9.37	95.86	16.69
13	14/09/1995	Sector Popular	-98.667	16.752	7.3	34.3	12.5	122.10	36.36
14	14/09/1995	Tlatelolco TL08	-98.667	16.752	7.3	27.5	7.8	142.42	28.23
15	14/09/1995	Tlatelolco TL55	-98.667	16.752	7.3	27.2	7.4	124.70	56.91
16	09/10/1995	Cibeles	-104.245	18.993	8.0	14.4	4.6	125.32	35.87
17	09/10/1995	CU Juárez	-104.245	18.993	8.0	15.8	5.1	122.51	34.62
18	09/10/1995	C.U.P.J	-104.245	18.993	8.0	15.7	4.8	130.07	33.17
19	09/10/1995	Córdoba	-104.245	18.993	8.0	24.9	8.6	113.46	23.44
20	09/10/1995	Liverpool	-104.245	18.993	8.0	17.6	6.3	147.10	17.22
21	09/10/1995	Plutarco E.C	-104.245	18.993	8.0	19.2	7.9	98.99	33.66
22	09/10/1995	Sector Popular	-104.245	18.993	8.0	13.7	5.3	123.85	37.87
23	09/10/1995	Valle Gómez	-104.245	18.993	8.0	17.9	7.18	131.26	24.51
24	11/01/1997	CU Juárez	-102.580	18.340	7.1	16.2	5.9	117.74	21.44
25	11/01/1997	C.U.P.J	-102.580	18.340	7.1	16.3	5.5	109.49	23.31
26	11/01/1997	García Campillo	-102.580	18.340	7.1	18.7	6.9	104.55	9.32
27	11/01/1997	Plutarco E.C.	-102.580	18.340	7.1	22.2	8.6	112.26	14.26
28	11/01/1997	Estación 10 Roma A	-102.580	18.340	7.1	21.0	7.76	88.72	25.61
29	11/01/1997	Estación 11 Roma B	-102.580	18.340	7.1	20.4	7.1	96.54	27.05
30	11/01/1997	Tlatelolco TL08	-102.580	18.340	7.1	16.0	7.2	120.88	14.93



Tabla 2. Medidas de intensidad sísmica utilizadas.

<i>Medida de intensidad</i>	<i>Formulación matemática</i>
<i>Aceleración Máxima del Suelo (AMS)</i>	
<i>Velocidad Máxima del Suelo (VMS)</i>	
<i>Duración del movimiento (T_D)</i>	Tiempo que transcurre en pasar del 5% al 95% de la intensidad de Arias (I _A) $I_A = \int_0^T a^2(t) dt$
<i>Potencial de movimiento sísmico (I_D)</i>	$I_D = \frac{\int_0^{t_f} a(t)^2 dt}{A_{ms} \cdot V_{ms}}$
<i>Parámetro Espectral R_{T1,T2}</i>	$R_{(T1, T_{modoi})} = \frac{S(T_{modoi})}{S(T_1)}$
<i>Parámetro espectral Np_{Sa}</i>	$N_p = \frac{Sa_{avg}(T_i \dots T_f)}{Sa(T_j)}$
<i>Parámetro espectral Np_v</i>	$N_{p_v} = \frac{V_{avg}(T_i \dots T_f)}{V(j)}$
<i>Parámetro espectral Np_{SV}</i>	$N_{p_{SV}} = \frac{SV_{avg}(T_i \dots T_f)}{SV(j)}$

Tabla 3. Conjunto de MISV y las categorías a la que corresponden basadas en las respuestas que las caracterizan.

MISV	Respuesta Máxima	Duración	Forma espectral
<Sa, AMS>	*		
<Sa, VMS>	*		
<Sa, T _D >	*	*	
<Sa, I _D >	*	*	
<Sa, R _{T1,T2} >	*		*



$\langle Sa, Nps_a \rangle$	*	*
$\langle Sa, Npv \rangle$	*	*
$\langle Sa, Nps_v \rangle$	*	*

3.4 *Análisis dinámico incremental*

El análisis dinámico incremental (IDA, por sus siglas en inglés) es un método que evalúa el desempeño estructural de edificios sometidos a fuerzas sísmicas tomando como referencia un parámetro de demanda sísmica determinado [42]. En este trabajo se considera este enfoque por su amplia aceptación en la literatura aplicada al campo de investigación de la ingeniería estructural.

El primer paso consistió en escalar los 30 registros sísmicos hasta una intensidad deseada en términos de alguna MIS (e.g. pseudo aceleración) posteriormente se obtuvo el factor de escalamiento necesario para llegar a la intensidad deseada en el periodo fundamental de la estructura. Para este caso se consideró la Sa normalizada respecto a la gravedad (valores de 0 a 2g en incrementos de 0.1g) y Sa sin normalizar (de 0 a 2,000 cm/s² con incrementos de 100 cm/s²). Al final se optó por la primera opción de Sa dado que se tiene una mayor base comparativa con investigaciones de otros autores para este tipo de valores.

Adicionalmente, se aplicaron los factores de escalado a los registros sísmicos correspondientes, creando así un total de 20 registros sísmicos escalados (uno para cada nivel de escalamiento, es decir, 0.1g, 0.2g, 0.3g...2g) para cada componente del registro sísmico seleccionado.

Posteriormente se crea un archivo de texto con la estructura requerida por el software

RUAMOKO 3D donde se debe incluir una serie de datos que leerá el programa. Los parámetros más importantes que se introducen son el tipo de análisis (estático, dinámico, u otros), las características del marco (número de nodos, elementos, secciones transversales, formas de vibrar, amortiguamiento, entre otros), la creación de cada nodo y elemento barra de la estructura con sus respectivas coordenadas arbitrarias, los nodos donde se estiman las distorsiones de entrepiso, las propiedades de las secciones transversales (módulo de elasticidad y cortante, área efectiva, momento de inercia, entre otros), los pesos y cargas que se transmiten a los nodos y por último el intervalo del paso del tiempo así como la duración de la historia de tiempo del sismo que estará excitando a la estructura.

En resumen, para este trabajo se utilizó un archivo de texto compatible con el programa de cómputo que se componía de los siguientes datos principales: Análisis tipo dinámico, marco de tres dimensiones con 186 nodos y 400 elementos barra, 5 secciones transversales, amortiguamiento del 5% del crítico, intervalos de historia de tiempo de 0.01s. Las cargas en los nodos fueron estimadas según el análisis estructural llevado a cabo acorde a lo estipulado en el reglamento de construcción [41]. Se motiva al lector a revisar los manuales con los que cuenta el software RUAUMOKO 3D para profundizar aún más en todas las funciones que se pueden llevar a cabo con éste.



Con lo anterior, se creó un archivo .bat que contiene las instrucciones para que la ejecute el software RUAUMOKO 3D. Las instrucciones que deben componer al archivo son las siguientes: Archivo ejecutable del software, nombre del archivo resultado, modelo del edificio en formato de texto, registro sísmico escalado (componente norte-sur), registro sísmico escalado (componente este-oeste), registro sísmico escalado (componente vertical). El producto será un archivo resultado por cada

sismo escalado del cual se deberá extraer el parámetro de demanda sísmica, en este caso la DME, ya que es la más utilizada en los códigos de construcción. En este estudio se obtuvieron un total de 600 archivos, lo que se traduce a 600 DME de las cuales se utilizarán aquellas para el nivel de intensidad deseado (1g). En la **Figura 2** se ilustra cuál es la eficiencia de la MIS al graficarla contra el parámetro de demanda sísmica. Se observa que el intervalo de valores para la DME se incrementa conforme aumenta el valor de la MIS.

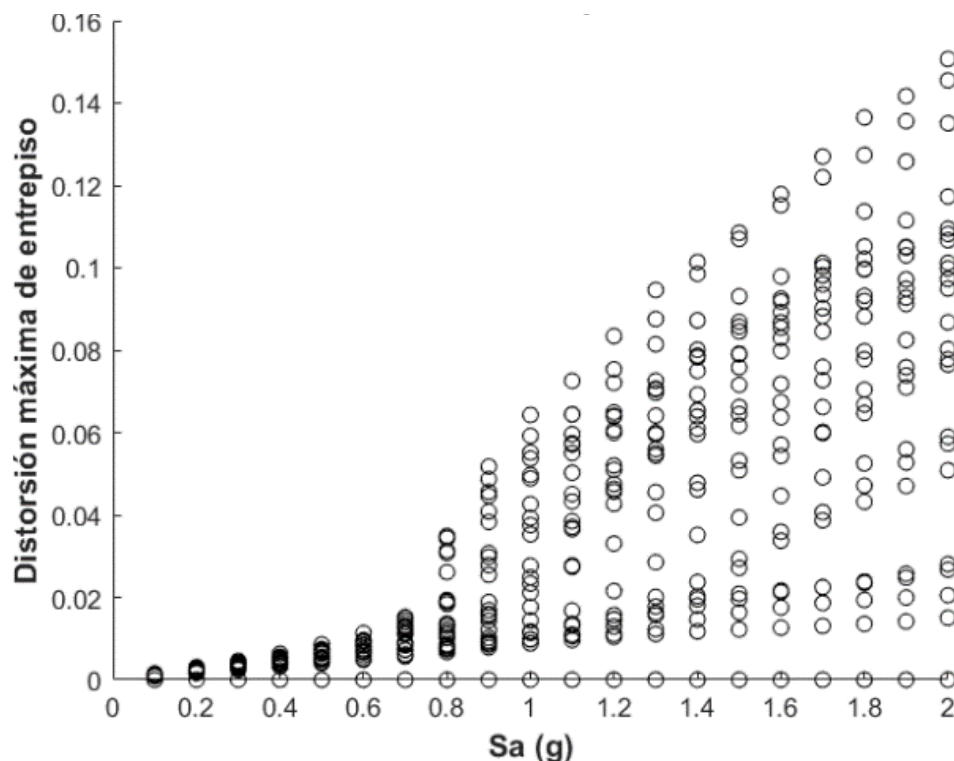


Figura 2. Análisis dinámico incremental para el ECR de 10 niveles sometido a los registros sísmicos escalados para $0.1 < S_a < 2g$.

3.5 Superficies de fragilidad sísmica

Las curvas y superficies de fragilidad nos permiten estimar el comportamiento de la MISV en función de la probabilidad de falla. La probabilidad de falla está dada por las tasas de excedencia de un valor

determinado comúnmente conocido como parámetro de demanda sísmica.

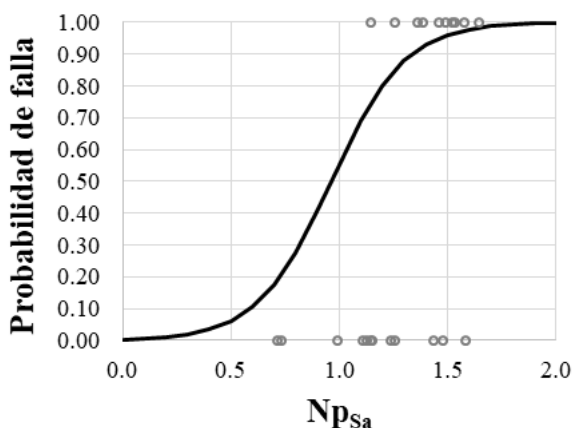
Una vez obtenidos los parámetros de demanda sísmica (DME) se determinó si la estructura falla o no al sobrepasar el valor



límite de 0.03 establecido en el reglamento de construcción [41].

Por lo tanto se consideró que la estructura falla si excedía este parámetro, asignándole un valor de 1 y si no fallaba (no excedía el valor límite) se le asignó un valor de 0. Después se asociaron estos valores a las MIS calculadas AMS, VMS, T_D I_D, R_{T1}, T₂, N_{psa}, N_{pv} Y N_{psv}. para cada sismo utilizado. Finalmente, se tabulan estos valores de falla-MIS para trazar las curvas de fragilidad y falla-MISV para generar las superficies de fragilidad correspondientes. Esto último se logra aplicando una regresión logística multinomial mediante la ecuación (1) considerando los valores de cada componente de la MISV. Esta regresión permitirá obtener la probabilidad de falla para desarrollar superficies de fragilidad con cada una de las MISV.

En la **Figura 3** podemos apreciar la diferencia entre trazar curvas de fragilidad



(izquierda) y superficies de fragilidad (derecha); La primera solo considera el comportamiento de una MIS mientras se considera Sa fija. En el segundo caso se varía ambos valores de la MISV y se puede conocer la influencia de uno y otro sobre la probabilidad de falla.

$$P_F = \frac{1}{1+e^{-\beta_0-\beta_1 \cdot x_1-\beta_2 \cdot x_2}} \quad (1)$$

Donde:

P_F=Probabilidad de falla

x₁=Valor resumido de probabilidad de falla en el valor de pseudo-aceleración espectral medida en el periodo fundamental de la estructura.

x₂= Valor de la medida de intensidad como parámetro secundario del vector.

β₀, β₁ y β₂=Coeficientes producto de la regresión de los resultados de registros escalados en Sa(T₁)=x₁.

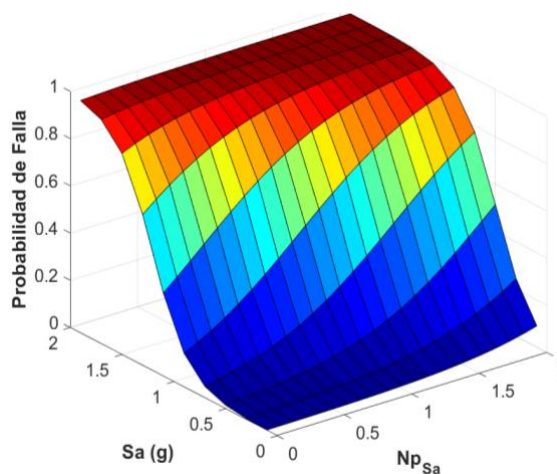


Figura 3. Regresión logística simple (izquierda) para N_{psa} con Sa fija y multinomial (derecha) para el vector <Sa, N_{psa}>.

Las superficies de fragilidad calculadas se realizaron creando una matriz de la primera componente de la MISV, otra matriz para la

segunda componente y una tercera matriz producto de las dos primeras aplicando la regresión logística multinomial. Los



cálculos y creación de superficies de fragilidad fueron llevados a cabo en el software MATLAB y se utilizaron los valores beta que produjeran el menor error haciendo un proceso de optimización de datos.

4. Resultados y Discusiones

En los siguientes párrafos se describen las superficies de fragilidad resultantes mostradas en la

Para el primer caso se consideró AMS como medida de intensidad y podemos apreciar en la

Figura 4, obtenidas a partir de la probabilidad de falla aplicando regresión logística multinomial a los resultados del análisis dinámico incremental del ECR de 10 niveles sometidos a los 30 registros sísmicos, considerando la DME como parámetro de demanda sísmica para $S_a=1g$ y utilizando MISV con S_a como primera componente del vector y las MIS escalares AMS, VMS; las de duración T_D , e I_D ; y las de forma espectral $R_{T1,T2}$, N_{psa} , N_{pv} y N_{psv} , como segunda componente del vector.

Figura 4a una respuesta completamente plana conforme van incrementando los valores de la MISV. De igual manera para el caso de VMS (



estructural. Esto resulta congruente con lo establecido en trabajos previos sobre la nula relación que presentan cuando se analiza el desempeño sísmico de estas medidas.

Luego en la

Figura 4b) no se observa una mejora significativa en la estimación de la probabilidad de falla (fragilidad sísmica) y se aprecia una similitud considerable con la gráfica previa, lo cual parece indicar que en estos casos las MIS tradicionales (basadas en respuestas máximas) no aportan información adicional sobre la respuesta

Figura 4c) viene T_D , la cual considera la duración del movimiento. Esta medida tiene



un mejor comportamiento al irse incrementando la probabilidad de falla conforme la duración asciende. Algo similar ocurre con I_D , compuesta también por valores de duración del movimiento así como de demandas máximas, la cual tiene un comportamiento ligeramente superior a los primeros dos casos al verse influenciada cuando se incrementan los valores de duración, incrementando así la probabilidad de falla (

Figura 4d). Sin embargo, no se puede argumentar una diferencia significativa que justifique su uso de manera constante para este par de MISV.

Por último, tenemos a las MISV basadas en la forma espectral. Primeramente observamos a $R_{T1,T2}$ en la



Figura 4e, la cual muestra una mejora significativa en el comportamiento de la gráfica dado que el incremento de esta medida representa un aumento en la probabilidad de falla lo que significa que la respuesta se ve influenciada a causa de la incorporación de esta medida. Lo mismo sucede con las otras MISV basadas en la forma espectral N_{psa} , N_{pv} y N_{psv} quienes tienen un mejor comportamiento al tener una línea de regresión ajustada de gran manera a los puntos de dispersión (

Figura 4f, 4g y 4h respectivamente). Además, cabe mencionar que las gráficas son muy parecidas entre sí, quizás por el hecho que el factor N_p depende de la normalización del espectro lo que lleva a generar esa similitud. No obstante, queda claro que las MISV basadas en la forma espectral presentan un mejor comportamiento al estimar la probabilidad de falla y por ende las superficies de fragilidad.

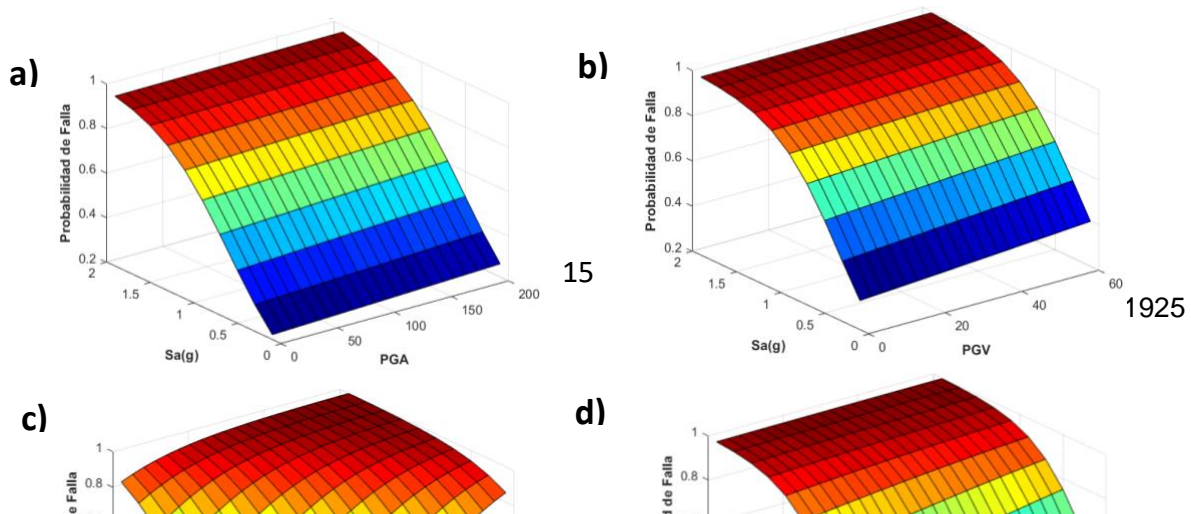




Figura 4. Superficies de fragilidad del ECR con $S_a(T_1)$ como primera componente de la MISV y a) AMS, b) VMS, c) T_D , d) I_D , e) R_{T_1, T_2} , f) $N_{p_{sa}}$, g) N_{p_v} y h) $N_{p_{sv}}$ como segunda.

5. Conclusiones

En este trabajo se analizó la eficiencia de 8 MISV, mediante análisis dinámicos incrementales considerando la distorsión

máxima de entepiso como parámetro de demanda sísmica, para predecir la respuesta estructural y se realizó un análisis de fragilidad sísmica estimando 8 superficies de fragilidad sísmica de un ECR de 10 niveles sometido a 30



registros sísmicos de banda angosta. Con base en los resultados se concluye lo siguiente:

- AMS, VMS, T_D e I_D e tienen poca o nula influencia en la probabilidad de falla como segunda componente del vector; por lo tanto, su uso no es recomendable como MISV.
- $R_{T1,T2}$ mejora significativamente la influencia en la probabilidad de falla y en general tiene un buen comportamiento como estimador de la fragilidad sísmica al ser usada como segunda componente del vector de la MISV.
- N_{psa} , N_{pv} y N_{psv} resultan ser las más adecuadas para predecir de manera apropiada la probabilidad de falla del ECR sometido a los registros sísmicos, siendo N_{psa} la que mejor comportamiento tiene como segunda componente del vector de las MISV, lo que resulta congruente con estudios previos donde se menciona la eficiencia de esta al realizar análisis de desempeño sísmico como medida de intensidad.

El estudio de las MISV basadas en la forma espectral para estimar superficies de fragilidad en ECR no ha sido abordado en la literatura previa por lo que los resultados aquí obtenidos podrían ser analizados en futuros trabajos como alternativa a los métodos tradicionales plasmados en los códigos de construcción vigentes. Lo anterior es crucial con la finalidad de utilizar medidas de intensidad sísmica más eficientes. Además, este enfoque es muy útil para no depender de $S_a(T_1)$ como único parámetro de daño y ayuda en la estimación del comportamiento no lineal de las estructuras. Es recomendable seguir aplicando este tipo de análisis con el objetivo de encontrar diferencias significativas en las formas de diseño tradicionales, incrementando así la seguridad estructural a un menor coste de edificación.

6. Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló gracias al apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de

Ciencia y Tecnología (CONACyT) bajo el proyecto Ciencia Básica 287103, al apoyo de la beca de doctorado de CONACyT otorgada al primer autor y al proyecto financiado por la SEP mediante el programa de PRODEP a uno de los autores UABC-PTC-806. Finalmente, se agradece el apoyo recibido por parte de la Universidad Autónoma de Sinaloa dentro del proyecto PROFAPI 2022.

7. Agradecimiento de autoría

Zavala Gutiérrez Noel: Escritura – Borrador original, Investigación, Metodología; *Bojórquez Mora Edén*: Conceptualización, Supervisión, Escritura: revisión y edición; *Barraza Guerrero Manuel Antonio*: Supervisión, Escritura: revisión y edición, Administración del proyecto; *Bojórquez Mora Juan*: Análisis formal, Validación, Curación de datos; *Villela y Mendoza Almendra*: Escritura revisión y edición, Validación; *Torres Peñuelas José Ignacio*: Metodología, Investigación; *Campos Gaytán José Rubén*: Escritura revisión y edición; *Sánchez Vergara Ricardo*: Escritura revisión y edición.

Referencias

- [1] A. Arias, "A measure of earthquake intensity. In Seismic Design for Nuclear Power Plants," Institute of Technology Press.1970.
- [2] G. W. Housner, "Measures of severity of ground shaking," U.S. Conference on Earthquake Engineering, vol. Earthquake Engineering Research Institute.1975.



- [3] V. Anand and S. R. Satish Kumar, "Seismic Soil-structure Interaction: A State-of-the-Art Review," *Structures*, vol. 16, pp. 317-326.2018. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.10.009>
- [4] P. Cordova, G. G. Deierlein, S. Mehanny, and A. C. Cornell, "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 building structures*, Sapporo, Hokkaido, 2001, pp. 187-206.
- [5] J. W. Baker and A. C. Cornell, "Vector-valued intensity measures for pulse-like near-fault ground motions," *Engineering Structures*, vol. 30, no. 4, pp. 1048-1057.2008. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.009>
- [6] R. Riddell, "On ground motion intensity indices," *Earthquake spectra*, vol. 23, no. 1, pp. 147-173.2007. <https://doi.org/10.1193/1.2424748>
- [7] E. Bojórquez and I. Iervolino, "Spectral shape proxies and nonlinear structural response," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 31, no. 7, pp. 996-1008.2011. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.03.006>
- [8] P. Tothong and N. Luco, "Probabilistic seismic demand analysis using advanced ground motion intensity measures," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 36, no. 13, pp. 1837-1860.2007. <https://doi.org/10.1002/eqe.696>
- [9] A. Lucchini, F. Mollaioli, and G. Monti, "Intensity measures for response prediction of a torsional building subjected to bi-directional earthquake ground motion," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 9, no. 5, pp. 1499-1518.2011. <https://doi.org/10.1007/s10518-011-9258-2>
- [10] J. Donaire-Ávila, F. Mollaioli, A. Lucchini, and A. Benavent-Climent, "Intensity measures for the seismic response prediction of mid-rise buildings with hysteretic dampers," *Engineering Structures*, vol. 102, pp. 278-295.2015. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.08.023>
- [11] P. Ge and Y. Zhou, "Investigation of efficiency of vector-valued intensity measures for displacement-sensitive tall buildings," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 107, pp. 417-424.2018. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.12.018>
- [12] J. Kiani, C. Camp, and S. Pezeshk, "Role of conditioning intensity measure in the influence of ground motion duration on the structural response," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 104, pp. 408-417.2018. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.11.021>
- [13] E. Bojórquez, I. Iervolino, A. Reyes-Salazar, and S. E. Ruiz, "Comparing vector-valued intensity measures for fragility analysis of steel frames in the case of narrow-band ground motions," *Engineering Structures*, vol. 45, pp. 472-480.2012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.07.002>
- [14] E. Bojórquez, R. Chávez, A. Reyes-Salazar, S. E. Ruiz, and J. Bojórquez, "A new ground motion intensity measure IB," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 99, pp. 97-107.2017. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.05.011>
- [15] M. Yakhchalian, A. Nicknam, and G. G. Amiri, "Optimal vector-valued intensity measure for seismic collapse assessment of structures," *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*,



vol. 14, no. 1, pp. 37-54.2015.
<https://doi.org/10.1007/s11803-015-0005-6>

[16] C. Yang, L. Xie, A. Li, J. Jia, and D. Zeng, "Ground motion intensity measures for seismically isolated RC tall buildings," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 125.2019.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105727>

[17] H. Rajabnejad, H. Hamidi, S. A. Naseri, and M. A. Abbaszadeh, "Effect of intensity measure on the response of a 3D-structure under different ground motion duration," *International Journal of Engineering*, vol. 34, no. 10.2021.
<https://doi.org/10.5829/ije.2021.34.10a.04>

[18] Y. Zhou, P. Ge, J. Han, and Z. Lu, "Vector-valued intensity measures for incremental dynamic analysis," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 100, pp. 380-388.2017.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.06.014>

[19] J. W. Baker and C. Allin Cornell, "Spectral shape, epsilon and record selection," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 35, no. 9, pp. 1077-1095.2006.
<https://doi.org/10.1002/eqe.571>

[20] N. Buratti, "A comparison of the performances of various ground-motion intensity measures," *The 15th World Conference on Earthquake Engineering*, vol. Lisbon, Portugal. 2012.

[21] M. Grigoriu, "Do seismic intensity measures (IMs) measure up?," *Probabilistic Engineering Mechanics*, vol. 46, pp. 80-93.2016.
<https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2016.09.002>

[22] J. Kiani and S. Pezeshk, "Sensitivity analysis of the seismic demands of RC moment resisting frames

to different aspects of ground motions," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 46, no. 15, pp. 2739-2755.2017.
<https://doi.org/10.1002/eqe.2928>

[23] F. Mollaioli, A. Lucchini, Y. Cheng, and G. Monti, "Intensity measures for the seismic response prediction of base-isolated buildings," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 11, no. 5, pp. 1841-1866.2013.
<https://doi.org/10.1007/s10518-013-9431-x>

[24] M. Palanci and S. M. Senel, "Correlation of earthquake intensity measures and spectral displacement demands in building type structures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 121, pp. 306-326.2019.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.023>

[25] J. I. Torres, "Eficiencia de medidas de intensidad sísmica vectorial en la predicción de la respuesta de edificios de C/R," *Culiacán, Sinaloa, México: Universidad Autónoma de Sinaloa*, 2018, p. 102.

[26] S. Tsantaki, C. Adam, and L. F. Ibarra, "Intensity measures that reduce collapse capacity dispersion of P-delta vulnerable simple systems," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 1085-1109.2016.
<https://doi.org/10.1007/s10518-016-9994-4>

[27] T.-T. Liu, D.-G. Lu, and X.-H. Yu, "Development of a compound intensity measure using partial least-squares regression and its statistical evaluation based on probabilistic seismic demand analysis," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 125.2019.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105725>



- [28] J. W. Baker, "Probabilistic structural response assessment using vector-valued intensity measures," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 36, no. 13, pp. 1861-1883.2007. <https://doi.org/10.1002/eqe.700>
- [29] I. Zentner, M. Gündel, and N. Bonfils, "Fragility analysis methods: Review of existing approaches and application," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 323, pp. 245-258.2017. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.12.021>
- [30] B. U. Gokkaya, J. W. Baker, and G. G. Deierlein, "Quantifying the impacts of modeling uncertainties on the seismic drift demands and collapse risk of buildings with implications on seismic design checks," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 45, no. 10, pp. 1661-1683.2016. <https://doi.org/10.1002/eqe.2740>
- [31] F. Jalayer, H. Ebrahimian, A. Miano, G. Manfredi, and H. Sezen, "Analytical fragility assessment using unscaled ground motion records," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 46, no. 15, pp. 2639-2663.2017. <https://doi.org/10.1002/eqe.2922>
- [32] C. Mai, K. Konakli, and B. Sudret, "Seismic fragility curves for structures using non-parametric representations," *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 169-186.2017. <https://doi.org/10.1007/s11709-017-0385-y>
- [33] W. Wen, C. Zhai, D. Ji, S. Li, and L. Xie, "Framework for the vulnerability assessment of structure under mainshock-aftershock sequences," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 101, pp. 41-52.2017. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.002>
- [34] F. Hosseinpour and A. E. Abdelnaby, "Fragility curves for RC frames under multiple earthquakes," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 98, pp. 222-234.2017. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.04.013>
- [35] S. T. Karapetrou, S. D. Fotopoulou, and K. D. Pitilakis, "Seismic Vulnerability of RC Buildings under the Effect of Aging," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 38, pp. 461-468.2017. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.137>
- [36] M. M. Kassem, F. Mohamed Nazri, and E. Noroozinejad Farsangi, "Development of seismic vulnerability index methodology for reinforced concrete buildings based on nonlinear parametric analyses," *MethodsX*, vol. 6, pp. 199-211.2019. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.01.006>
- [37] P. Olteanu, V. Coliba, R. Vacareanu, F. Pavel, and D. Ciuiu, "Analytical Seismic Fragility Functions for Dual RC Structures in Bucharest," (Springer Natural Hazards, The 1940 Vrancea Earthquake. Issues, Insights and Lessons Learnt, 2016, pp. 463-479. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29844-3_33
- [38] J. Pejovic and S. Jankovic, "Seismic fragility assessment for reinforced concrete high-rise buildings in Southern Euro-Mediterranean zone," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 14, no. 1, pp. 185-212.2015. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9812-4>
- [39] M. Zain, N. Anwar, F. A. Najam, and T. Mehmood, "Seismic Fragility Assessment of Reinforced Concrete High-Rise Buildings Using the Uncoupled Modal Response History Analysis (UMRHA)," (Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering, Proceedings of the



International Conference on Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2019, pp. 201-218.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-78187-7_16

[40] M. Amiri and M. Yakhchalian, "Performance of intensity measures for seismic collapse assessment of structures with vertical mass irregularity," *Structures*, vol. 24, pp. 728-741.2020.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.01.038>

[41] RCDMX, "Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo," *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, Décima cuarta época, Tomo II, No. 103-BIS, 2017.

[42] D. Vamvatsikos and C. A. Cornell, "Incremental dynamic analysis," *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 31, no. 3, pp. 491-514.2002.

<https://doi.org/10.1002/eqe.141>

Derechos de Autor (c) 2022 Noel Zavala Gutiérrez, Edén Bojórquez Mora, Manuel Antonio Barraza Guerrero, Juan Bojórquez Mora, Almendra Villela y Mendoza, José Ignacio Torres Peñuelas, José Rubén Campos Gaytán, Ricardo Sánchez Vergara



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumen de licencia](#) - [Texto completo de la licencia](#)