

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>
www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
JULIO/DICIEMBRE 2022 - VOLUMEN 32 (2)

The logo for Editorial UCR, featuring three horizontal white bars above the text "EDITORIAL UCR" in a white, sans-serif font.

EDITORIAL
UCR

Intensidad de Arias y duración significativa en análisis dinámico de estructuras

Arias intensity and significant duration on structural dynamic analysis

Rodrigo E. Alva

Profesor, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España

e-mail: rodrigo.esteban.alva@upc.edu

Orcid: 0000-0002-4522-3967

Luis A. Pinzón

Investigador, Universidad Católica Santa María La Antigua, Ciudad de Panamá, Panamá

e-mail: lpinzon@usma.ac.pa

Orcid: 0000-0003-3128-7158

Luis G. Pujades

Profesor Emérito, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España

e-mail: lluis.pujades@upc.edu

Orcid: 0000-0002-2619-0805

Recibido: 28 de diciembre 2021

Aceptado: 18 de marzo 2022

Resumen

El uso de procedimientos y metodologías estandarizadas para realizar análisis dinámico no lineales (ADNL) está en aumento. En este tipo de análisis, varios de los criterios pueden ser definidos de forma arbitraria o seleccionados a criterio del experto, tal es el caso de la selección de los acelerogramas a ser utilizados como dato de partida para el ADNL. Es evidente que una selección inadecuada de los parámetros de entrada, incluyendo las acciones sísmicas, generaría resultados poco realistas y sin sentido físico. En este sentido, el presente estudio tiene como objetivo analizar la influencia de la intensidad de Arias (I_A) y la duración significativa (D_{a5-95}) en la selección de registros de aceleración compatibles con un espectro de diseño objetivo para la realización de ADNL. De forma particular, se estudia la variación del daño estructural de un edificio a partir de cuatro acelerogramas, con diferentes I_A y D_{a5-95} , ajustados al mismo espectro de diseño. Los resultados demuestran diferencias significativas en el daño esperado. Los registros con mayor intensidad de Arias y duración significativa produjeron un daño estructural mayor a pesar de disponer de espectros de respuesta equivalentes. Se concluye que es relevante considerar estos parámetros sísmicos en la selección de acelerogramas para su uso en ADNL.

Palabras clave:

Acelerogramas, análisis dinámico, daño estructural, duración significativa, espectros de respuesta, intensidad de Arias.



Abstract

The use of standard procedures and methodologies for nonlinear dynamic analysis (NLDA) is increasing. In NLDA guidelines, many aspects are open to expert judgement and alternative interpretations can be adopted, such is the case of the selection of the input ground motions. Inappropriate selection of seismic actions can lead to unrealistic results. This study aims to analyse the influence of the Arias intensity and the significant duration of spectral matched records on NLDA. Particularly, variations in the damage of a building were studied using four different accelerograms adjusted to a specific design spectrum. Results have shown significant differences in the expected structural damage. Records with larger Arias intensity and significant durations resulted in a greater structural damage, even though they all share an equivalent response spectrum. It is concluded that these parameters should be also taken into account in the selection of design ground motions for NLDA.

Keywords:

Accelerograms, dynamic analysis, structural damage, significant duration, response spectrum, Arias intensity.

1. INTRODUCCIÓN

Los reglamentos estructurales actuales permiten diseñar y evaluar estructuras mediante la implementación de análisis dinámicos no lineales (ADNL), ya que es considerado un procedimiento más realista para estimar una respuesta de edificios sometidos ante acciones sísmicas. Sin embargo, existen varios temas relacionados con los métodos de diseño basado en ADNL que no se han estudiado de forma exhaustiva, como es el caso de la selección de acelerogramas a considerar. Una selección no adecuada de las acciones sísmicas puede llevar a subestimar la demanda sísmica y/o a sobrevalorar la capacidad de la estructura [1].

Los lineamientos actuales para la realización de ADNL permiten el uso de acelerogramas registrados en sitio, sintéticos, escalados y/o ajustados donde sus espectros de respuesta se asemejen al espectro de peligrosidad uniforme o de diseño objetivo. Según el Eurocódigo 8 (EC-8) [2], los registros de aceleraciones deben reflejar características de la fuente sísmica dominante, pero no proporciona criterios específicos para su selección. Por lo tanto, la falta de pautas para una adecuada selección de acelerogramas podría conducir a sobre o subestimar el daño estructural esperado.

En este artículo se analiza la influencia de la intensidad de Arias (I_A) [3] y la duración significativa en el daño esperado de un edificio particular mediante ADNL. Trifunac y Brady [4] definieron la duración significativa de un terremoto como el intervalo en el que se acumula entre el 5 % y el 95 % de la I_A (D_{a5-95}), la cual coincide, normalmente, con la fase fuerte del evento. La I_A es definida mediante la siguiente ecuación,

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a(t)^2 dt \quad (1)$$

donde $a(t)^2$ es la aceleración del movimiento del terreno elevada al cuadrado, g es la aceleración de la gravedad y t es la duración total del registro. Estos parámetros están relacionados con la energía del movimiento del terreno registrado que, a su vez, está relacionado con la magnitud y la distancia a la fuente, y las condiciones del sitio [5], [6].

En este estudio, se analiza un edificio de cinco plantas como caso de estudio. Para la realización de los análisis dinámicos, se utilizan cuatro acelerogramas con diferentes características, condiciones de sitio, magnitud y duración. Estos registros fueron ajustados a diferentes espectros de diseño objetivo, obteniendo acelerogramas, cuyos espectros de respuesta son equivalentes. Para esto, se toma de referencia el EC-8, debido a que, el edificio analizado está localizado en Lorca, España. Posteriormente, fueron realizados los ADNL con los acelerogramas ajustados y se obtuvo el índice de daño (ID) de Park y Ang [7] para realizar un análisis comparativo. Los resultados de estos análisis buscan resaltar la importancia de considerar estas características de las acciones sísmicas en el diseño o evaluación estructural mediante ADNL.

2. MODELO ESTRUCTURAL

Para evaluar la influencia de la I_A y de la D_{a5-95} sobre el daño esperado se tomó como caso de estudio un edificio que resultó gravemente dañado durante el terremoto de Lorca, España del 2011. La estructura en estudio es un edificio de cinco plantas, ubicado en el barrio de San Fernando, Lorca, que fue demolido luego de sufrir daño severo, consecuencia del terremoto. La estructura fue construida con marcos de concreto reforzado y muros de mampostería de ladrillo no reforzado desde el nivel 2 hasta el 5. El edificio contaba con un primer piso débil donde se concentró la mayor parte del daño producido por el terremoto. La geometría y características de las secciones de concreto reforzado están resumidas en el CUADRO I. La Fig. 1 muestra el marco del edificio utilizado para realizar los análisis. Esta estructura ha sido estudiada en trabajos previos donde es posible encontrar información detallada sobre el caso de estudio [8].

CUADRO I

SECCIONES DE CONCRETO Y REFUERZO LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL CON BARRAS DE ACERO DEL EDIFICIO EN ESTUDIO (N SE REFIERE A NIVEL)

Elemento	Dimensiones (m)	Refuerzo long.	Refuerzo transv.
Columnas N2-N5	0.25 x 0.25	4 ϕ 12 mm	1 ϕ 6 mm @ 15 cm
Columnas N1	0.30 x 0.30	4 ϕ 12 mm	1 ϕ 6 mm @ 15 cm
Vigas	0.25 x 0.25	4 ϕ 12 mm	1 ϕ 6 mm @ 18 cm

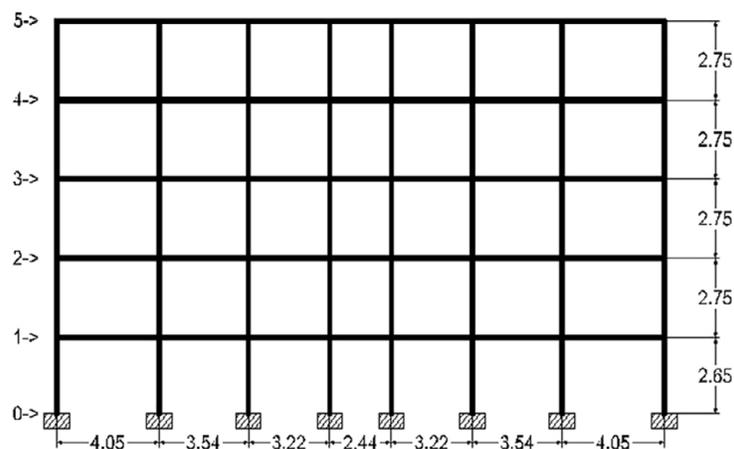


Fig. 1. Vista en elevación del edificio en estudio (dimensiones en metros). Las dimensiones y refuerzo de los elementos estructurales (vigas y columnas) están detallados en el CUADRO I.

Para estudiar el comportamiento no lineal del edificio y realizar los ADNL modelamos la estructura con el programa Ruaumoko 3D [9]. En los análisis, el comportamiento no lineal fue considerado mediante elementos tipo barra con un modelo de plasticidad concentrada para flexión y

cortante. Además, las degradaciones de rigidez y resistencia fueron consideradas también. Para la definición de la histéresis de rótulas a flexión, se utiliza el modelo de Takeda modificado [10] y, de manera similar, se hace uso de la ley de histéresis de Sina [9] para modelar las rótulas de cortante. Para la degradación de la resistencia a flexión de las secciones estructurales se considera, mediante una reducción lineal del valor nominal de la ductilidad inicial de la rótula plástica, el 10 % de su valor nominal cuando alcanza la ductilidad última, debido a las rotaciones inelásticas [9]. A causa del bajo porcentaje de acero de refuerzo transversal, se considera el comportamiento no lineal del concreto reforzado mediante el modelo no confinado de Mander *et al.* [11]. Las losas fueron modeladas con elementos tipo Shell, formando un diafragma semirrígido, y las cargas verticales fueron tomadas de las recomendaciones del Eurocódigo 2 [12]. Además, se consideró el comportamiento no lineal de los muros de mampostería, utilizando el modelo propuesto por Crisafulli y Carr [13].

3. ACELEROGRAMAS Y AJUSTE ESPECTRAL

Para el desarrollo de los ADNL, fueron seleccionados cuatro acelerogramas procedentes de eventos con diferentes magnitudes, duraciones y registrados en sitios con distintas condiciones. Estos fueron registrados durante los terremotos de Lorca, España (2011); Chi-Chi, Taiwán (1999); Hawái, Estados Unidos (2006) y Tohoku, Japón (2011). Las características y especificaciones de los acelerogramas seleccionados se detallan en el CUADRO II. En el CUADRO III, se presentan los valores de I_A y D_{a5-95} , de los acelerogramas. Se puede apreciar que existe una variación importante de estos parámetros entre los distintos registros, siendo el de Lorca el que presenta menor I_A y D_{a5-95} , mientras que el correspondiente al sismo de Tohoku, cuenta con los valores más altos de I_A y de D_{a5-95} .

Estos acelerogramas fueron sometidos a una técnica de ajuste espectral con el objetivo de que sus espectros de respuesta, con un 5 % de amortiguamiento, coincidan con espectros de diseño estimados según las especificaciones del EC-8. Los espectros de diseño fueron definidos para condiciones de sitio tipo A (roca) y D (suelo blando), y para zonas de alta sismicidad (tipo 1, $M_w > 5.5$) y zonas con sismicidad moderada (tipo 2, $M_w \leq 5.5$). De esta forma, se calcula un total de dieciséis acelerogramas compatibles con los espectros de diseño objetivo. Por último, estos acelerogramas fueron escalados a un PGA de 0.37 g, el cual corresponde con el PGA del registro del terremoto de Lorca.

La técnica de ajuste espectral, utilizada en este estudio, fue desarrollada por el Dr. Luis G. Pujades (comunicación personal, 2016). Para un acelerograma real, la clave del método de ajuste consiste en modificar su espectro de amplitudes de Fourier para que el espectro de respuesta coincida con el objetivo. Una descripción detallada del método utilizado se puede encontrar en [14]-[15].

En la Fig. 2, se muestra una comparación de los acelerogramas iniciales normalizados (semilla) de los cuatro terremotos con los acelerogramas resultantes del ajuste espectral, con el espectro de diseño tipo 1 del EC-8 (sismicidad alta) y el sitio tipo A (roca). Además, se observa una comparación entre el espectro objetivo del EC-8, y los espectros de respuesta de los acelerogramas semilla

y los acelerogramas ajustados. A simple vista se observan los excelentes resultados obtenidos con la técnica de ajuste espectral empleada.

CUADRO II
CARACTERÍSTICAS DE LOS TERREMOTOS Y ACELEROGRAMAS SELECCIONADOS

Terremoto	Taiwan	Hawaii	Tohoku	Lorca
Fecha (dd/mm/aaaa)	20/09/1999	15/10/2006	11/03/2011	11/05/2011
Hora (hh:mm:ss)	17:47:16	17:07:45	5:46:23	16:47:25
Latitud N (°)	23.850	19.880	38.296	37.649
Longitud E (°)	120.870	-156.119	142.498	-1.694
Profundidad (km)	13.2	5.0	19.7	6.7
Magnitud momento, M_w	7.5	6.7	9.1	5.1
Estación	TCU074	2825	MYG004	Lorca
Latitud N (°)	23.9607	20.0230	38.7292	37.6767
Longitud E (°)	120.9617	-155.6614	141.0217	-1.7002
Distancia (km)	20.3	50.6	138.5	7.4
Azimuth (°)	37.1	71.5	291.0	350.0
Componente (°)	90 (E)	90 (E)	90 (E)	330 (N30W)
Aceleración pico en el suelo, PGA (cm/s ²)	584.2	1041.4	1268.5	360.4
Frecuencia de muestreo (Hz)	200	200	100	200
Muestras	18000	23600	30000	9932
Clasificación de sitio (ver EC-8)	D	D	A	B

CUADRO III
INTENSIDAD DE ARIAS Y DURACIÓN SIGNIFICATIVA DE LOS
ACELEROGRAMAS SEMILLA

Terremoto	Taiwan	Hawaii	Tohoku	Lorca
Intensidad de Arias (m/s)	0.49	0.90	2.74	0.05
Duración Significativa (s)	11.78	10.54	79.22	0.99

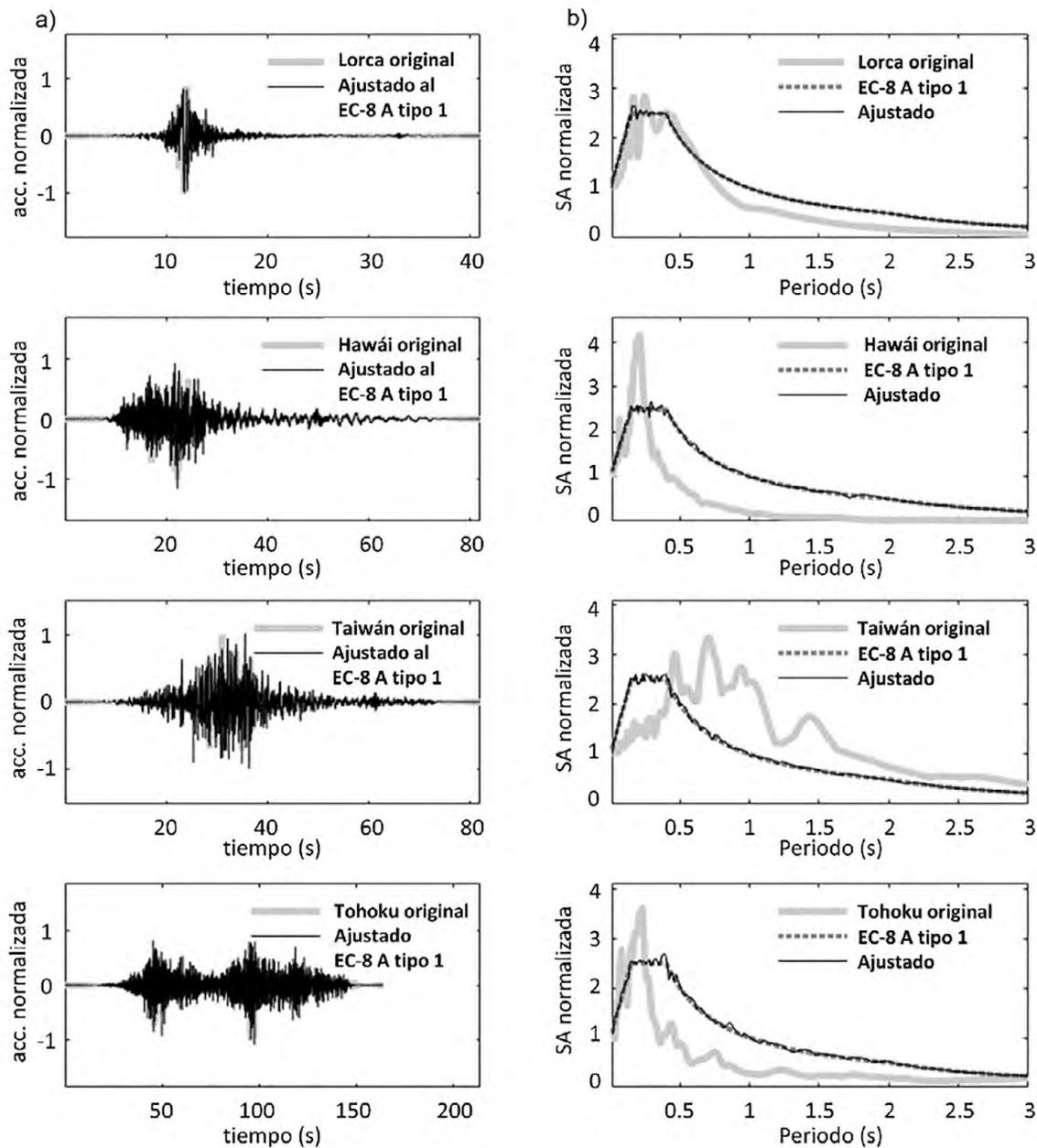


Fig. 2. (a) Comparación entre acelerogramas semilla y ajustados para los cuatro registros y (b) comparación de sus espectros de respuesta estimados con un 5 % de amortiguamiento, con el espectro de diseño del EC-8 tipo 1 y sitio A. En todos los casos, se muestran los resultados normalizados a un $PGA = 1$. Para el análisis, los registros fueron escalados a un $PGA = 0.37$ g.

4. ÍNDICE DE DAÑO

Después de realizar los ADNL, se obtuvo el índice de daño (DI) de Park y Ang [7] con el objetivo de comparar el daño esperado. El índice de daño de Park y Ang se puede expresar como una combinación lineal de las contribuciones al daño de la deformación de la disipación de energía histerética. La siguiente ecuación define el DI ,

$$DI = \frac{\delta_M}{\delta_U} + \frac{\beta}{Q_y \delta_U} \int dE \quad (2)$$

donde DI es el índice de daño, que es una medida empírica del daño en una estructura ($DI \geq 1$ indica daño total o colapso), δ_M es la deformación y δ_U es la deformación en el punto último (colapso), Q_y es el límite elástico, dE es el incremental de la energía histerética disipada y β es un coeficiente para el efecto de la carga cíclica.

Este índice de daño fue normalizado a la capacidad máxima de cada elemento estructural, y ponderado por un factor de contribución de energía para obtener un índice de daño general, que toma en cuenta la contribución de cada elemento al daño total (Ecuación 3).

$$DI_T = \sum_i \lambda_i DI_i \quad (3)$$

Cabe mencionar que, para el propósito de este estudio, la contribución de la energía (Ecuación 4) y la deformación (Ecuación 5), al índice de daño total, será analizada de manera independiente. Este índice de daño fue estimado mediante el programa Ruaumoko 3D [9].

$$DI_D = \sum_i \lambda_i \frac{\delta_{Mi}}{\delta_{Ui}} \quad (4)$$

$$DI_E = \sum_i \lambda_i \frac{\beta_i}{Q_{yi} \delta_{Ui}} \int dE \quad (5)$$

5. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la comparación entre los parámetros de los registros, I_A y duración significativa, y el DI obtenido después de realizar los ADNL de los dieciséis registros ajustados espectralmente y escalados a un $PGA = 0.37$ g. En la Fig. 3, se muestra el caso correspondiente al espectro del EC-8 Tipo 1 y sitio A (roca), donde la I_A es normalizada a su valor máximo para representar el intervalo 5-95 % de la I_A en el que se define la duración significativa. Se puede observar que la I_A varía ligeramente cuando se usa la técnica de ajuste espectral, pero el cambio en la duración significativa es menos notable.

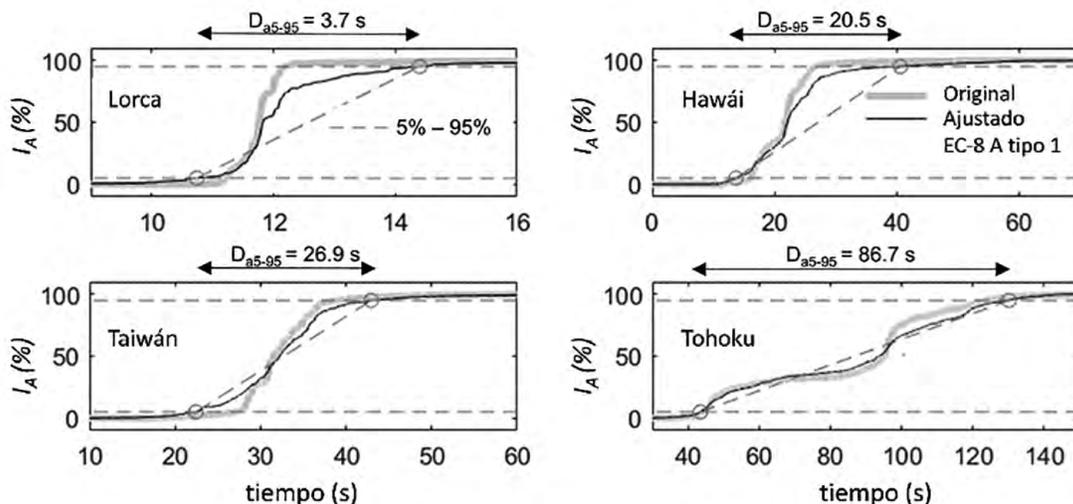


Fig. 3. I_A normalizada y duración significativa definida entre el 5% y 95 % de I_A (D_{a5-95}) para los acelerogramas semilla y los ajustados al espectro del EC-8 (sitio A y zona sísmica tipo 1).

CUADRO IV

DURACIÓN SIGNIFICATIVA (D_{a5-95}), INTENSIDAD DE ARIAS (I_A), LA CONTRIBUCIÓN DE ENERGÍA (DI_E) Y DEFORMACIÓN (DI_D) AL DAÑO Y EL ÍNDICE DE DAÑO TOTAL (DI_T) OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR LOS ADNL CON LOS REGISTROS AJUSTADOS

Espectro objetivo	Terremoto	D_{a5-95} (s)	I_A (m/s)	DI_D	DI_E	DI_T
Sitio A Tipo 1	Lorca	3.7	0.065	0.19	0.03	0.22
	Hawái	20.5	0.210	0.20	0.07	0.27
	Taiwan	26.9	0.260	0.23	0.09	0.32
	Tohoku	86.7	0.584	0.39	0.15	0.54
Sitio D Tipo 1	Lorca	1.8	0.159	0.63	0.10	0.73
	Hawái	24.3	0.477	0.66	0.31	0.97
	Taiwan	38.6	0.631	0.73	0.40	1.13
	Tohoku	88.5	1.493	1.16	0.61	1.77
Sitio A Tipo 2	Lorca	4.4	0.074	0.09	0.01	0.10
	Hawái	19.8	0.231	0.10	0.05	0.15
	Taiwan	20.1	0.238	0.12	0.04	0.16
	Tohoku	84.9	0.469	0.37	0.11	0.48
Sitio D Tipo 2	Lorca	4.0	0.217	0.23	0.03	0.26
	Hawái	20.0	0.686	0.35	0.13	0.48
	Taiwan	21.7	0.771	0.35	0.13	0.48
	Tohoku	86.4	1.655	0.60	0.28	0.88

El CUADRO IV resume los resultados para cada uno de los dieciséis registros utilizados en el ADNL (intensidad de Arias, la duración significativa y el índice de daño). Las contribuciones de energía y deformación, al índice de daño total, se muestran por separado. Al comparar el aporte de energía (DI_E) y deformación (DI_D) con la duración significativa y la I_A para cada espectro objetivo, se observa una clara tendencia a incrementar el daño a medida que aumenta la duración significativa y la intensidad de Arias.

En las Figs. 4a y 4b, se muestra una comparación del DI_T , resultante de los ADNL, con la duración significativa para los registros ajustados con los espectros del EC-8 con sitio A (roca) y, zonas tipo 1 y tipo 2. Se refleja un incremento importante en el daño al aumentar la duración significativa de los registros. La misma tendencia se observa en las Figs. 4c y 4d donde se muestran los resultados para los espectros de diseño del EC-8 para un sitio D (suelo blando), y zonas tipo 1 y 2, respectivamente. El daño es mayor en los registros generados a partir del acelerograma de Tohoku, el cual presenta la mayor $D_{a5.95}$. Por otro lado, los registros generados a partir del acelerograma de Lorca, que corresponden a los valores más bajos de $D_{a5.95}$, producen los menores índices de daño del conjunto.

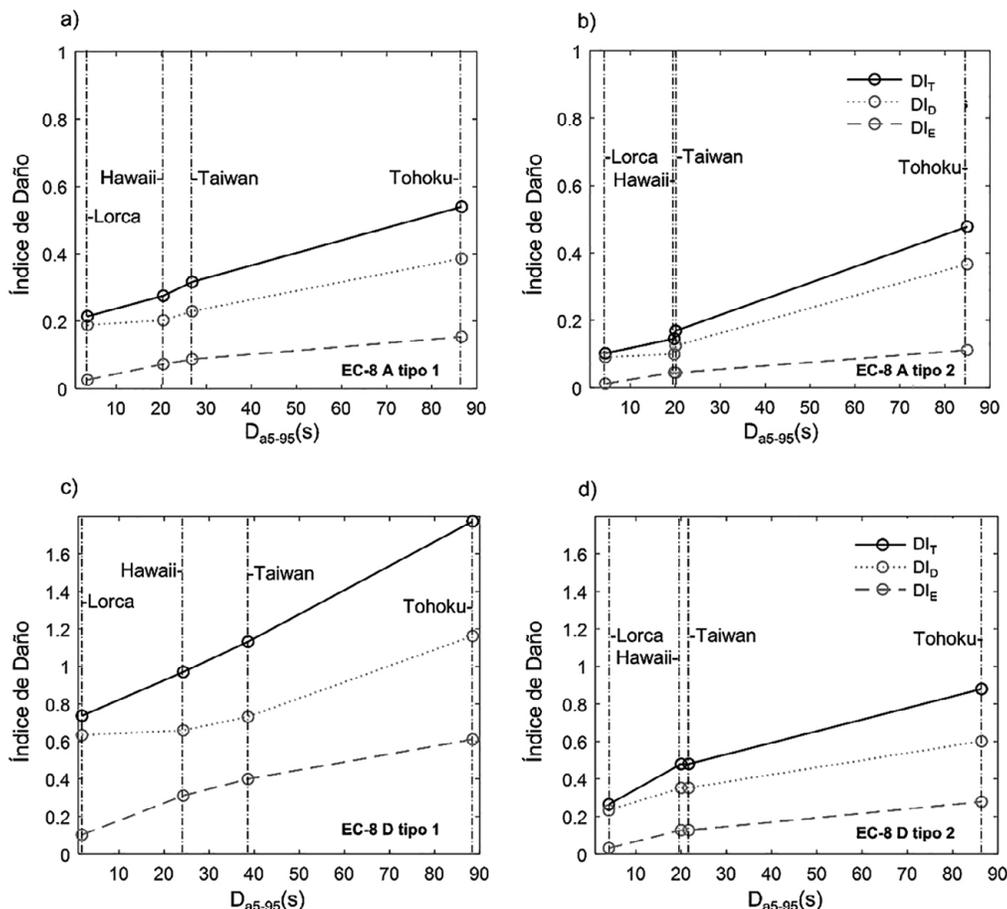


Fig. 4. Índice de daño (DI), en función de la duración significativa ($D_{a5.95}$), obtenidos a partir de los ADNL con los registros ajustados a los espectros del EC-8: (a) sitio A tipo 1, (b) sitio A tipo 2, (c) sitio D tipo 1 y (d) sitio D tipo 2.

Análogamente, en la Fig. 5, se comparan los resultados de la I_A de los registros de aceleración ajustados a los distintos espectros del EC-8 contra los índices de daño de los ADNL. Las Figs. 5a y 5b corresponden a los resultados de índices de daño obtenidos con los registros ajustados a los espectros del EC-8 con sitio A (roca), y zonas tipo 1 y tipo 2, respectivamente, mientras que las Figs. 5c y 5d muestran los resultados de registros ajustados a los espectros de diseño del EC-8 para un sitio D (suelo blando), y zonas tipo 1 y 2, respectivamente. En todos los casos, se observa un aumento en el daño a medida que incrementa la I_A de los registros de aceleraciones.

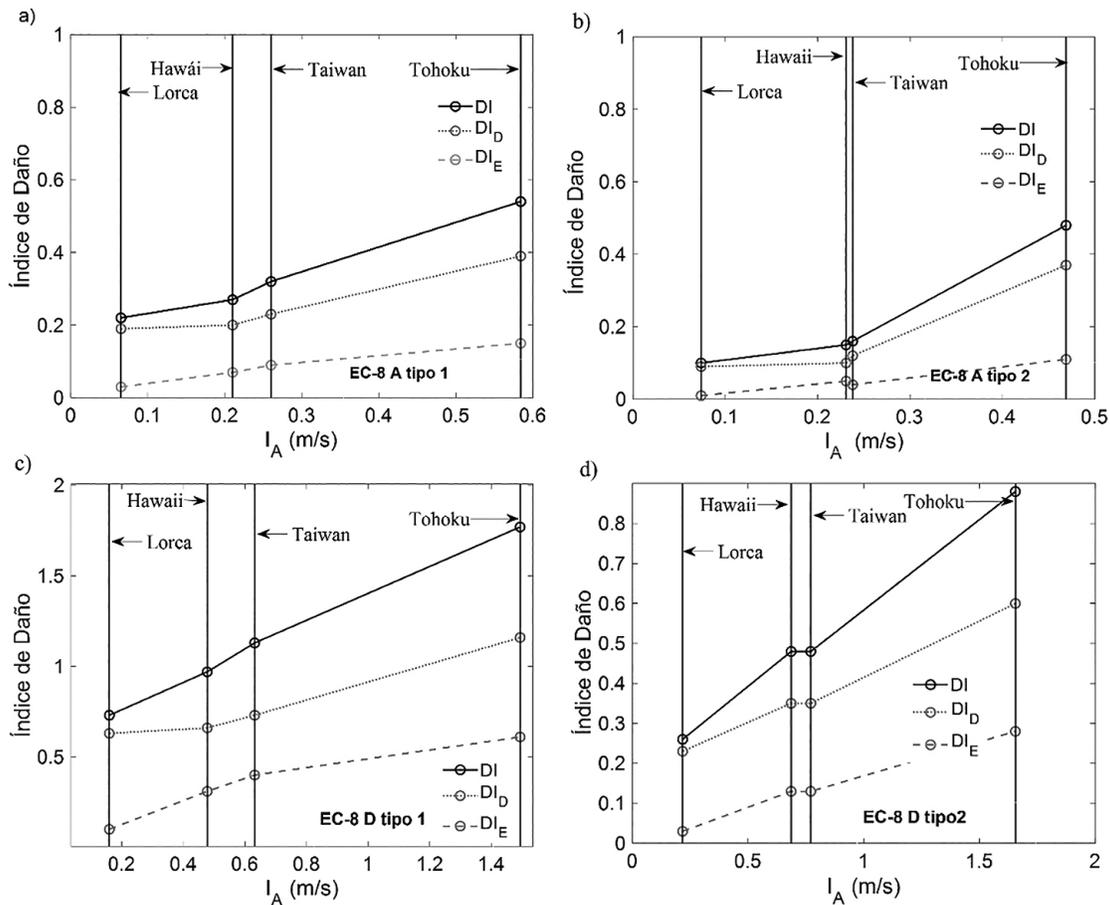


Fig. 5. Índice de daño (DI) en función de la intensidad de Arias (I_A), obtenidos a partir de los ADNL, con los registros ajustados a los espectros del EC-8: (a) sitio A tipo 1, (b) sitio A tipo 2, (c) sitio D tipo 1 y (d) sitio D tipo 2.

Estos resultados muestran que, a pesar de que los registros de aceleración poseen prácticamente el mismo espectro de respuesta, el daño varía significativamente caso a caso. En este sentido, existen parámetros como la duración significativa y la intensidad de Arias, que pueden arrojar más información sobre el daño esperado en una estructura. Por este motivo, es importante considerar otras características de los terremotos al seleccionar acelerogramas para análisis dinámico, tanto para diseño como para evaluación estructural.

6. CONCLUSIONES

En este estudio, el daño obtenido mediante ADNL fue relacionado con la intensidad de Arias y duración significativa. Los resultados muestran una clara tendencia a incrementar el daño estructural al aumentar los valores, tanto de la duración significativa como de la intensidad de Arias. El daño es considerablemente mayor en los registros generados a partir del acelerograma de Tohoku, el cual presenta la mayor D_{a5-95} e I_A , tanto en el acelerograma semilla como en los registros ajustados. Por otro lado, los registros generados a partir del acelerograma de Lorca, que corresponden a los valores más bajos de I_A y D_{a5-95} , producen los menores índices de daño del conjunto. Este incremento se refleja, tanto en la contribución de la energía como en la contribución de la deformación al daño total esperado. En el caso de Lorca, se alcanzaron daños totales menores (0.10 a 0.25), moderados (0.25 a 0.40) y severos (0.40 a 1.00), y en el caso de Tohoku, se obtuvieron daños severos y colapso (> 1.00). Estos resultados demuestran la influencia de estos parámetros en el daño esperado de edificios.

Dado que estos parámetros están asociados a la magnitud de un terremoto, la distancia epicentral y las características del suelo, deberían de ser considerados en la selección de acelerogramas para la realización de análisis dinámicos. Para que esto sea posible, se deben desarrollar estudios de amenaza sísmica a partir de estos parámetros (I_A y D_{a5-95}); esto con el objetivo de realizar una selección, tomando en cuenta estos valores como complemento al espectro de diseño objetivo. Esto permitiría seleccionar acciones sísmicas más realistas para la zona de estudio y con mayor sentido físico. No obstante, caber resaltar que sería conveniente realizar este tipo de análisis con diferentes tipologías estructurales y acciones sísmicas adicionales, correspondientes a diferentes tipos de terremotos (diferentes condiciones de sitio, magnitudes y distancias epicentrales), con el objetivo de estudiar en detalle cómo estos y otros parámetros pueden llegar a influir en el daño de edificios.

7. ROLES DE AUTORES

- Rodrigo E. Alva: Conceptualización; Análisis formal; Metodología; Software; Redacción.
- Luis A. Pinzón: Conceptualización; Metodología; Redacción.
- Luis G. Pujades: Conceptualización; Metodología; Software.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación recibió el apoyo de la Universidad Católica Santa María La Antigua a través del proyecto de investigación de la convocatoria de I+D USMA 2021-2022 con código SRUI-CPEI-ID-2021-2022-002.

REFERENCIAS

- [1] R. Chandramohan, J. W. Baker, y G. G. Deierlein, "Quantifying the influence of ground motion duration on structural collapse capacity using spectrally equivalent records", *Earthq. Spectra*, vol. 32, no. 2, pp. 927–950, 2016.

- [2] CEN, *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2004.
- [3] A. Arias, "A measure of earthquake intensity", *Cambridge, MA, M.I.T. Press*, pp. 438–483, 1970.
- [4] M. D. Trifunac y A. G. Brady, "A study on the duration of strong earthquake ground motion.", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 65, no. 3, pp. 581–626, 1975.
- [5] J. J. Kempton y J. P. Stewart, "Prediction equations for significant duration of earthquake ground motions considering site and near-source effects", *Earthq. Spectra*, vol. 22, no. 4, pp. 985–1013, 2006.
- [6] L. A. Pinzón, L. G. Pujades, A. Macau, E. Carreño, y J. M. Alcalde, "Seismic Site Classification from the Horizontal-to-Vertical Response Spectral Ratios: Use of the Spanish Strong-Motion Database", *Geosciences*, vol. 9, no. 7, p. 294, 2019.
- [7] Y. Park y A. H. -S. Ang, "Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete", *J. Struct. Eng.*, vol. 111, no. 4, pp. 722–739, 1985.
- [8] Y. F. Vargas-Alzate, L. G. Pujades, A. H. Barbat, J. E. Hurtado, S. A. Diaz, y D. A. Hidalgo-Leiva, "Probabilistic seismic damage assessment of reinforced concrete buildings considering direccionalidad effects.", *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 14, no. 6, pp. 817–829, 2018.
- [9] A. J. Carr, *Ruaumoko 2D and 3D - Inelastic Dynamic Analysis Program*. Christchurch, New Zealand: Dept. of Civil Engineering University of Canterbury, 2002.
- [10] S. Otani, *SAKE: A Computer Program for Inelastic Response of R/C Frames to Earthquakes*. Illinois, USA: University of Illinois Engineering Experiment Station, 1974.
- [11] J. B. Mander, M. J. N. Priestley, y R. Park, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *J. Struct. Eng.*, vol. 114, no. 8, pp. 1804–1826, 1988.
- [12] CEN, *European Standard EN 1992-1-1 Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1: General-Common rules for building and civil engineering structures*. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2004.
- [13] Francisco J. Crisafulli y Athol J. Carr, "Proposed macro-model for the analysis of infilled frame structures", *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.*, vol. 40, no. 2, pp. 69–77, 2007.
- [14] L. A. Pinzón, Y. F. Vargas-Alzate, L. G. Pujades, y S. A. Diaz, "A drift-correlated ground motion intensity measure: application to steel frame buildings", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 132, p. 106096, 2020.
- [15] L. A. Pinzón, S. A. Diaz, L. G. Pujades, y Y. F. Vargas, "An efficient method for considering the directionality effect of earthquakes on structures", *J. Earthq. Eng.*, vol. 25, no. 9, pp. 1679–1708, 2021.