

Trenes de pulso como alternativa a conjuntos de registros tipo pulso

Pulse Trains as an Alternative to Pulse-Like Record Sets

Doctorando/a:

Abel ZAMBRANO

<https://orcid.org/0000-0003-3184-7952>

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Argentina

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Facultad de Ingeniería Civil, Industria y Arquitectura, Ecuador

angel.zambrano@uleam.edu.ec

Director/a:

Carlos FRAU

Codirector/a: (si corresponde)

Roberto AGUIAR

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología para generar trenes de pulso como alternativa simplificada a los conjuntos de registros sísmicos exigidos por los códigos de construcción para el análisis dinámico de estructuras. Estos códigos requieren emplear al menos 3 acelerogramas, pudiendo ampliarse a 7 y 12 registros según diversas normas internacionales. La propuesta plantea la generación de un tren de pulsos equivalente para cada caso: uno para el conjunto de 3 registros, tres para el de 7 y cuatro para el de 12, manteniendo correspondencia directa con la cantidad de acelerogramas requerida.

Se evalúa la respuesta estructural obtenida mediante los trenes de pulso frente a la derivada de los sets completos, calculando los espectros de respuesta elástica e inelástica para cada conjunto. La respuesta inelástica se analiza para distintos niveles de fluencia. Los resultados muestran que los trenes de pulso reproducen adecuadamente la demanda estructural en períodos cortos e intermedios, con discrepancias controladas en períodos largos, evidenciando su potencial como herramienta eficiente para análisis sísmicos en estructuras sensibles a pulsos de velocidad.

Palabras clave: Tren de pulsos; pulsos de velocidad; índice de impulsividad; análisis inelástico; espectros de respuesta

Abstract

This work presents a methodology for generating pulse trains as a simplified alternative to the sets of seismic records required by building codes for structural dynamic analysis. These codes mandate the use of at least three accelerograms, which may be expanded to sets of seven or twelve records according to various international standards. The proposed approach establishes an equivalent pulse train for each case: one train for the set of three records, three trains for the set of seven, and four trains for the set of twelve, maintaining direct correspondence with the number of accelerograms required.

The structural response obtained from the pulse trains is evaluated against that derived from the complete record sets by computing elastic and inelastic response spectra for each group. Inelastic response is examined for different ductility levels. The results show that the pulse trains adequately reproduce structural demand in the short and intermediate period ranges, with controlled discrepancies at longer periods, demonstrating their potential as an efficient tool for seismic analysis of structures sensitive to velocity pulses.

Keywords: Pulse trains; velocity pulses; impulsivity index; inelastic analysis; response spectra.

Introducción

Los códigos de construcción exigen conjuntos mínimos de acelerogramas para el análisis dinámico en el tiempo, generalmente tres registros según NEC (2015), ASCE 7-10 (2010), UBC (1997) y NZS 1170.5 (2004), y siete registros en normas como FEMA P-58 (2012). Versiones recientes, como ASCE 7-22 (2022), amplían este requerimiento hasta once pares de registros, aumentando la demanda computacional y dificultando su aplicación en regiones con bases de datos sísmicas limitadas (Zambrano & Frau, 2021).

La identificación de registros tipo pulso, característicos de movimientos cercanos a falla, ha avanzado mediante métodos como el análisis con wavelets de Baker (2007), los algoritmos de Zhai et al. (2013, 2017) y el índice de impulsividad de Panella et al. (2017). Sobre esta base, Zambrano y Frau (2024) introdujeron el concepto de tren de pulsos, un registro sintético recortado a partir de pulsos de velocidad, capaz de reproducir la respuesta estructural de un conjunto de tres registros.

Este artículo generaliza dicho enfoque proponiendo trenes de pulso equivalentes a conjuntos de 3, 7 y 12 registros. Los registros impulsivos se seleccionan mediante el índice de impulsividad y se recortan según la duración del pulso dominante. La metodología se valida comparando la respuesta elástica e inelástica de los trenes con la de los conjuntos completos, evaluando su capacidad para representar la demanda estructural en estructuras sensibles a pulsos de velocidad.

Desarrollo

Selección de registros impulsivos y extracción del pulso dominante.

Para aplicar la metodología se seleccionó un conjunto de 12 registros sísmicos de campo cercano provenientes del listado impulsivo del FEMA P695 (2009), el cual reúne movimientos clasificados como tipo pulso según el criterio de Baker (2007). La identificación de registros impulsivos se realizó mediante el índice de impulsividad de Panella et al. (2017), definido como el cociente entre la longitud desarrollada de la historia de velocidad y el PGV, lo que permite distinguir impulsividad alta, media y baja y proporciona una clasificación objetiva para conformar los trenes de pulso. Los doce registros seleccionados fueron reorganizados y codificados alfabéticamente (A–L) para facilitar su referencia en la metodología y en los análisis posteriores.

No. Panella	Código alfabético	RSN	Nombre	PGA [g]	PGV [cm/s]	IP	Clasificación	Duración total [s]	tip [s]	tfp [s]	Duración recortada [s]	Porcentaje de duración recortada [%]
5	A	821	RSN821_ERZINCAN_ERZ-NS.AT2	0.39	107.20	7.5	Elevada	21.3050	2.1100	4.5750	2.4650	11.57%
43	B	1063	RSN1063_NORTHR_RRS228.AT2	0.87	148.20	12.1	Media	19.9000	1.7800	9.0000	7.2200	36.28%
401	C	1503	RSN1503_CHICHI_TCU065-E.AT2	0.79	125.40	27.6	Baja	89.9950	25.8750	58.1450	32.2700	35.86%
89	D	181	RSN181_IMPVALH_H-E06140.AT2	0.45	67.00	14.7	Media	39.0850	4.4600	8.8000	4.3400	11.10%
191	E	879	RSN879_LANDERS_LCN260.AT2	0.73	133.60	18.8	Media	48.1200	7.8400	16.3600	8.5200	17.71%
30	F	723	RSN723_SUPERB_B-PTS225.AT2	0.43	134.40	11.3	Elevada	22.3000	10.6800	13.7800	3.1000	13.90%
436	G	828	RSN828_CAPEMEND_PET000.AT2	0.59	49.60	30.7	Baja	35.9800	0.6800	6.1400	5.4600	15.18%
47	H	182	RSN182_IMPVALH_H-E07140.AT2	0.34	51.70	12.6	Media	36.8650	2.6250	9.3650	6.7400	18.28%
95	I	1086	RSN1086_NORTHR_SYL090.AT2	0.61	77.80	15	Media	39.98	2.94	8.8	5.86	14.66%
139	J	1529	RSN1529_CHICHI_TCU102-E.AT2	0.30	91.70	16.8	Media	89.9950	30.5450	51.6250	21.0800	23.42%
205	K	1605	RSN1605_DUZCE_DZC180.AT2	0.40	71.20	19.2	Media	25.88	0.81	14.76	13.9500	53.90%
293	L	802	RSN802_LOMAP_STG000.AT2	0.51	41.60	22.2	Baja	39.9900	5.7200	7.0000	1.2800	3.20%

Tabla 1: Registros seleccionados y reorganizados para el análisis metodológico

La Tabla 1 resume las principales características de cada acelerograma, incluyendo su número RSN (codificación de la base de datos del Pacific Earthquake Engineering Research Center, PEER), el nombre del registro, y los valores de PGA y PGV asociados a cada movimiento. Asimismo, se presenta el índice de impulsividad (IP) calculado según Panella et al. (2017), junto con la clasificación correspondiente (alta, media o baja impulsividad) de cada registro.

La extracción del pulso dominante se realizó siguiendo el procedimiento de Zambrano y Frau (2024). Primero se identifican los tiempos t_{ip} y t_{fp} , definidos como los instantes en que la velocidad es nula antes y después del pulso dominante. Luego, estos límites se ajustan para obtener un segmento recortado con condiciones iniciales adecuadas para el análisis en el dominio del tiempo. El resultado es un conjunto de acelerogramas que conservan únicamente el pulso dominante y pueden concatenarse de manera estable para conformar los trenes de pulso empleados en este estudio.

Conformación de trenes de pulso para conjuntos normativos

Set de 3 registros

Los códigos de construcción exigen un mínimo de tres acelerogramas para análisis dinámicos. En correspondencia, se propone un tren de pulso único compuesto por tres segmentos recortados (A, B y C), ordenados según su impulsividad, como alternativa simplificada al conjunto completo y manteniendo su variabilidad impulsiva. El análisis en el tiempo se realiza mediante el método Beta de Newmark (Chopra, 2014), obteniéndose los espectros de respuesta elástica de aceleración, velocidad y desplazamiento mostrados en la Figura 1.

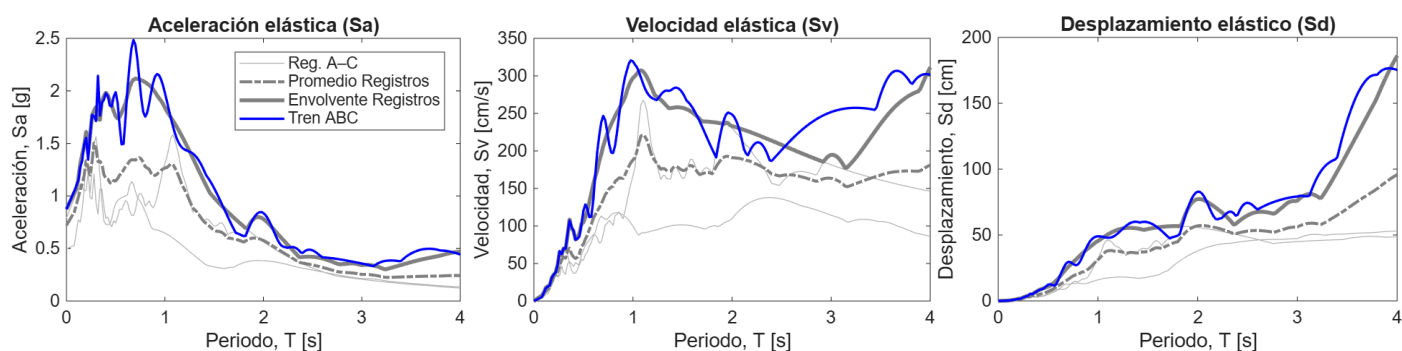


Figura 1: Espectros elásticos S_a , S_v y S_d para el conjunto de 3 registros

En los gráficos se muestra la respuesta de los registros completos A, B y C (curvas grises delgadas), junto con la envolvente del set (curva gris gruesa), definida como la respuesta máxima del conjunto según los códigos de construcción. Se incluye también la respuesta promedio (curva gris discontinua) y la del tren de pulsos ABC (curva azul). El tren reproduce de manera consistente la envolvente del set, reduciendo significativamente el tiempo computacional.

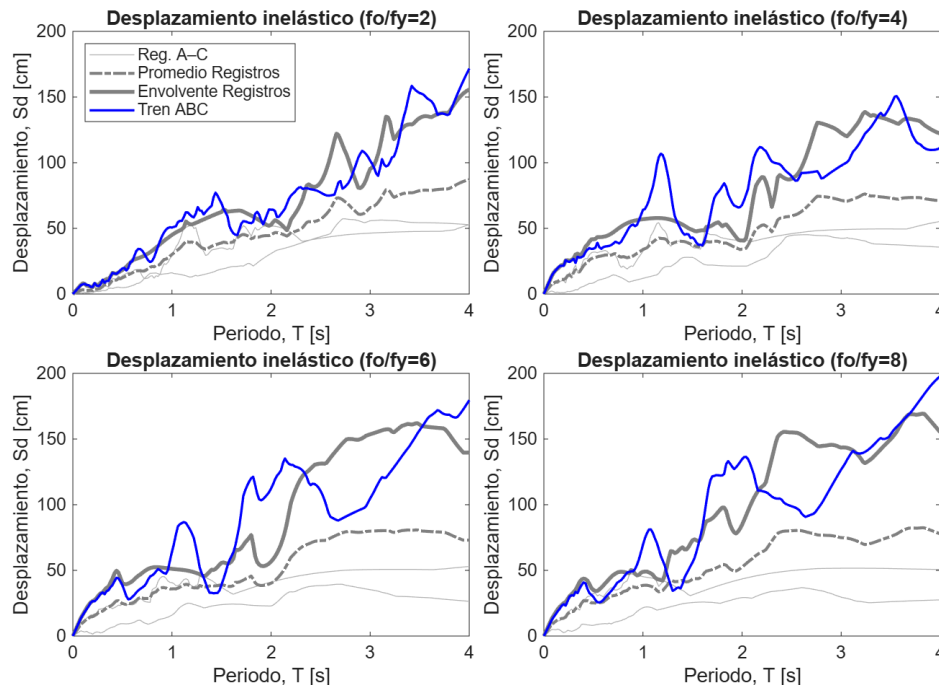


Figura 2: Espectros de desplazamiento inelástico para el conjunto de 3 registros

La respuesta del tren reproduce adecuadamente la envolvente del set en el rango elástico y también en el rango no lineal para $f_0/f_y = 2$. Para valores mayores de f_0/f_y se observan diferencias: por ejemplo, en periodos de 1.0 s y 2.0 s el tren ABC supera la envolvente, mientras que en 3.0 s se sitúa por debajo. No obstante, estas variaciones son coherentes con la dinámica del sistema y la representación del tren se considera adecuada.

Set de 7 registros

Para conjuntos de siete registros, se propone la conformación de tres trenes de pulso (ACE, DBA y BDC), cada uno integrado por cinco segmentos (A–E). La metodología garantiza que cada segmento se repita al menos dos veces, excepto el segmento E, y que exista alternancia en el orden de conformación. Esto asegura variabilidad y representatividad dinámica equivalente al set completo. En la Figura 3 y 4 se muestran los espectros de respuesta elástica e inelástica, respectivamente.

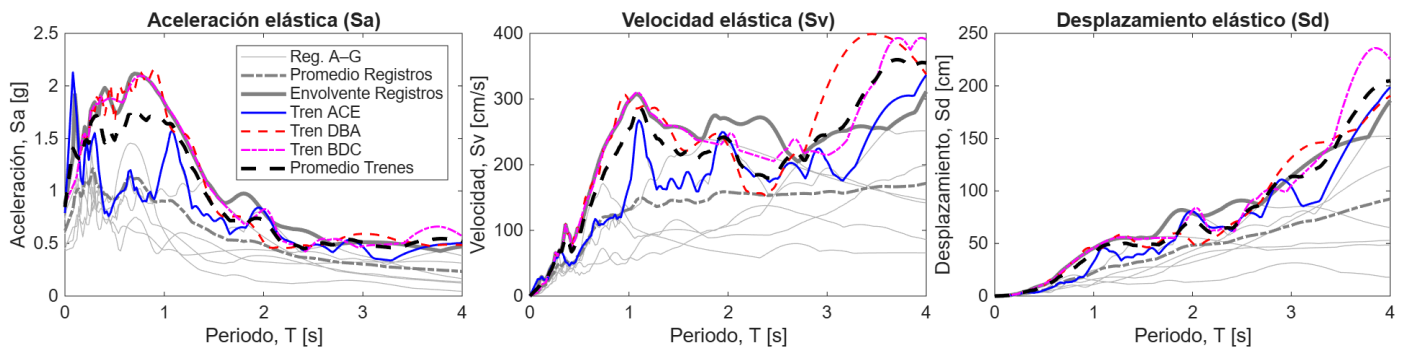


Figura 3: Espectros elásticos S_a , S_v y S_d para el conjunto de 7 registros

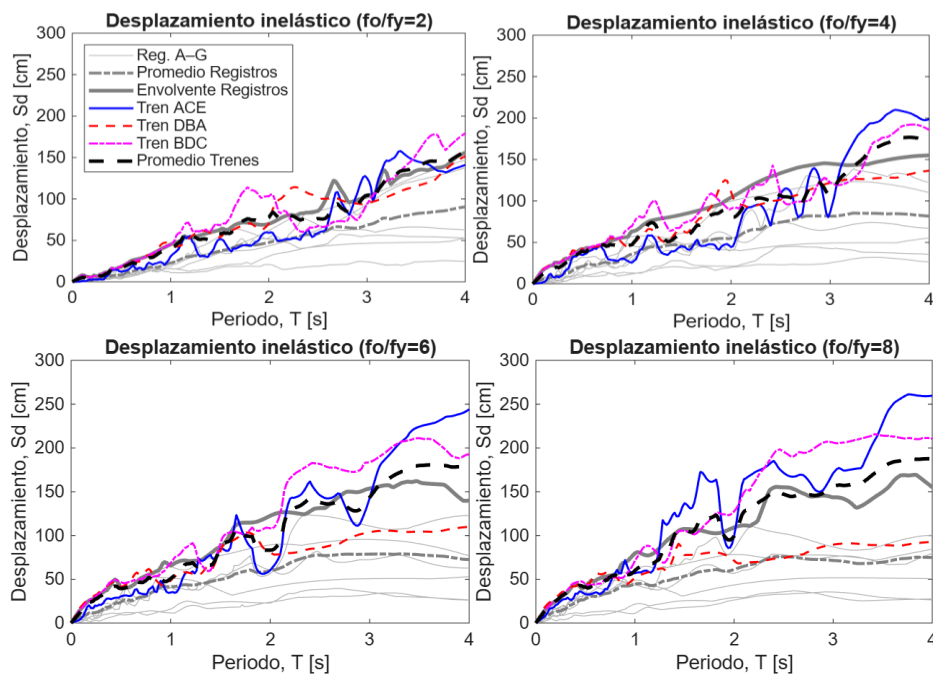


Figura 4: Espectros de desplazamiento inelástico para el conjunto de 7 registros

Para la respuesta elástica, el promedio de los trenes (curva negra discontinua) permanece dentro de la envolvente del set de siete registros (curva gris gruesa). Aunque los códigos de construcción establecen que, para conjuntos de siete o más acelerogramas, debe emplearse el promedio del set, resulta relevante contrastarlo también con la envolvente, ya que esta representa la demanda máxima del conjunto. Además, cada tren individual muestra un espectro consistente con el promedio del set (curva gris discontinua), confirmando la representatividad de los segmentos recortados. En el análisis inelástico, a medida que se incrementa la incursión no lineal, se evidencia que los trenes de pulsos tienden a originar respuestas superiores al promedio del set en determinadas franjas de periodo. No obstante, es importante destacar que el promedio de los trenes presenta una muy buena correspondencia con la envolvente del set completo.

Set de 12 registros

Para conjuntos de doce registros, se conforman cuatro trenes de pulso integrados por siete segmentos (A–G). Se garantiza que cada segmento aparezca al menos dos veces, excepto los segmentos F y G. La alternancia en la posición inicial de cada tren introduce variabilidad adicional, permitiendo capturar la diversidad impulsiva del conjunto completo. Los 4 trenes de pulso a considerar son: ACE, BDF, DAG y EBC.

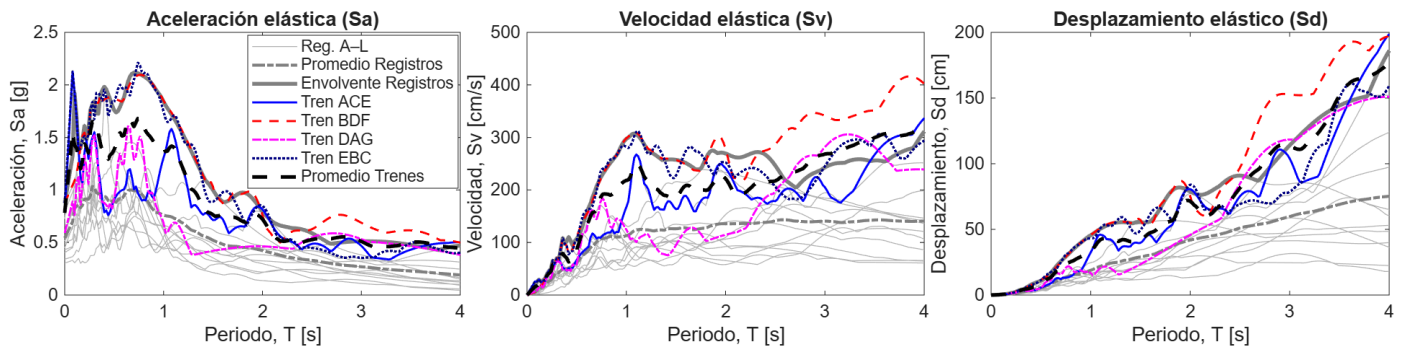


Figura 5: Espectros elásticos S_a , S_v y S_d para el conjunto de 12 registros

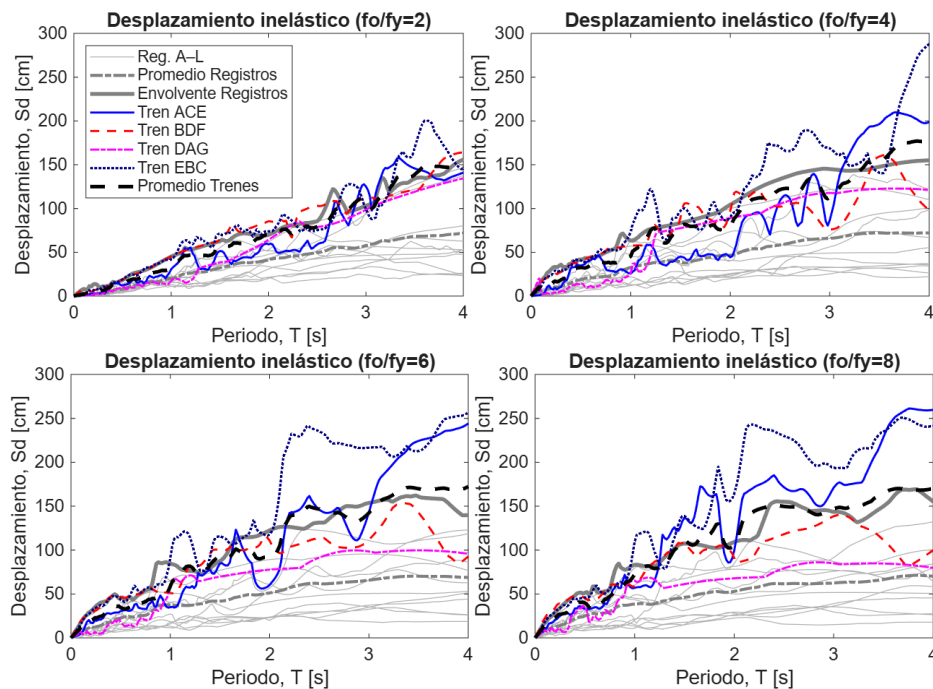


Figura 6: Espectros de desplazamiento inelástico para el conjunto de 12 registros

Los espectros elásticos muestran que el promedio de los trenes reproduce con precisión la envolvente del set, y que cada tren individual se mantiene cercano o ligeramente por encima del promedio. En el análisis inelástico, el tren EBC y el tren ACE superan la envolvente de los registros en períodos largos. Este comportamiento refleja la alta sensibilidad de los pulsos de velocidad frente a la no linealidad, tal como señaló Bertero et al. (1978).

Resultados

Los trenes de pulso generados para los conjuntos de 3, 7 y 12 registros reproducen con alta fidelidad la demanda estructural dominante. En el rango elástico, todos se ajustan de manera consistente a la envolvente del conjunto, y en el rango inelástico mantienen esta correspondencia especialmente en períodos cortos e intermedios, donde la energía impulsiva controla la respuesta. En niveles de fluencia mayores, algunos trenes superan la envolvente en períodos largos, reflejando la sensibilidad de los pulsos de velocidad frente a la no linealidad. Aun así, el promedio de los trenes conserva una excelente correspondencia con la envolvente en todos los valores de f_0/f_y .

La respuesta en el tiempo confirma que los trenes capturan los desplazamientos máximos y la energía acumulada de los registros más críticos; los trenes con segmentos altamente impulsivos reproducen con mayor precisión los picos de demanda, evidenciando la influencia en la respuesta no lineal.

Conclusiones

Los resultados muestran que los trenes de pulso son una representación eficiente de la demanda estructural asociada a conjuntos de 3, 7 y 12 registros. Reproducen de manera consistente la respuesta elástica e inelástica, y aunque algunos trenes superan la envolvente en períodos largos bajo altos niveles de fluencia, el promedio de los trenes refleja adecuadamente la

tendencia global del conjunto. La reducción de la duración y la concentración de la energía impulsiva disminuyen significativamente el tiempo computacional sin sacrificar precisión, lo que hace a los trenes especialmente útiles cuando se dispone de pocos registros o se requieren múltiples análisis no lineales.

La metodología consolida el concepto de tren de pulsos como una alternativa práctica para análisis en el tiempo, particularmente en estructuras sensibles a pulsos de velocidad y en cercanía a falla. Además, los trenes capturan los desplazamientos máximos y la energía acumulada de los registros más críticos lo que contribuye a reproducir la demanda dominante del conjunto. Finalmente, los resultados abren líneas de investigación para evaluar los trenes de pulso en sistemas de múltiples grados de libertad y explorar aplicaciones en modelos no lineales avanzados.

Utilización de IA generativa / herramientas IA (si no corresponde borrar esta sección)

Declaro que utilicé la herramienta de inteligencia artificial Microsoft Copilot únicamente como apoyo en la redacción y mejora de estilo del presente manuscrito. El contenido técnico, la revisión bibliográfica y el análisis fueron desarrollados íntegramente por el autor, quien asume plena responsabilidad por la versión final presentada.

Referencias

- American Society of Civil Engineers. (2010). Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-10). American Society of Civil Engineers.
- American Society of Civil Engineers. (2022). Minimum design loads for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-22). American Society of Civil Engineers.
- Baker, J. W. (2007). Quantitative classification of near-fault ground motions using wavelet analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 97(5), 1486–1501.
- Bertero, V. V., Mahin, S. A., & Herrera, R. A. (1978). Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 6(1), 31–42.
- Chopra, A. K. (2014). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering* (4th ed.). Prentice Hall.
- Federal Emergency Management Agency. (2009). Quantification of building seismic performance factors (FEMA P-695). Federal Emergency Management Agency.
- Federal Emergency Management Agency. (2012). NEHRP seismic performance assessment of buildings: Volume 1—Methodology (FEMA P-58-1). Washington, DC.
- NEC. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción: Capítulo Peligro Sísmico. Diseño Sismo Resistente (NEC-SE-DS, 2015). Quito: Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- Panella, D. S., Tornello, M. E., & Frau, C. D. (2017). A simple and intuitive procedure to identify pulse-like ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 94, 234-243.
- Uniform Building Code (1997). *Structural Engineering Design Provisions*. International Conference of Building Officials.
- Zambrano, A., & Frau, C. (2021). Requerimientos de acelerogramas para el análisis dinámico en el tiempo. En XI EnIDI Proceedings (pp. 60-67). Mendoza, Argentina.
- Zambrano, A. (2024). Tren de pulsos para análisis en el tiempo. AJEA – Actas de Jornadas y Eventos Académicos de UTN. <https://doi.org/10.33414/ajea.1733.2024>
- Standards New Zealand. (2004). *Structural design actions. Part 5: Earthquake actions New Zealand (NZS 1170.5)*. Standards New Zealand.
- Zhai, C., Chang, Z., Li, S., Chen, Z., Xie, L. (2013). Quantitative Identification of Near-Fault Pulse-Like Ground Motions Based on Energy. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(5), 2591-2603.
- Zhai, C., Li, C., Sashi, K. & Wen, W. (2017). An efficient algorithm for identifying pulse-like ground motions based on significant velocity half-cycles. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*. 47 (3), 757-771.