

Dynamic Response of Short-Period Structures: Influence of Focal Depth in Peruvian Earthquakes

José Luis Díaz Terrones¹ ; Noemi Geraldine Perez Laura² ; David Dionicio Coro Salinas, M.Sc.³ 
^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, n00227685@upn.pe, n00243166@upn.pe, david.coro@upn.edu.pe

Abstract—Perú, located in the Pacific Ring of Fire, exhibits high seismic vulnerability, a critical issue given that a significant percentage of self-constructed housing lacks the necessary stiffness and ductility to withstand major events. To address this structural risk, this research validates a numerical methodology to evaluate the dynamic response of short-period structures ($T_n = 0.4$ s) under Peruvian subduction earthquakes, specifically analyzing the influence of focal depth. Five real accelerograms (Arequipa 2001, Ica 2007, Tacna 2010, Tacna 2012, and the Lima 1974 aftershock) were processed using Butterworth filtering and baseline correction, calculating the response through Newmark's integration method. Results demonstrate that seismic demand is not linearly dependent on moment magnitude (M_w) but rather on source configuration and local site effects. It was observed that the Lima event (M_w 7.1), due to its shallow nature (12.8 km), generated the highest dynamic amplification factor (3.36). In contrast, the deep Tacna 2012 earthquake (98 km) recorded the lowest displacement (0.75 cm), evidencing energy attenuation in high-frequency waves. These findings validate the numerical methodology on a controlled physical model, establishing a fundamental baseline for future structural resilience assessments and specialized earthquake-resistant design in the region.

Keywords—Focal Depth, Site Effects, Newmark Method, SDOF System, Peruvian Earthquakes.

Respuesta Dinámica de Estructuras de Periodo Corto: Influencia de la Profundidad Focal en Sismos Peruanos

José Luis Díaz Terrones¹; Noemi Geraldine Perez Laura²; David Dionicio Coro Salinas, M.Sc.³
^{1,2,3}Universidad Privada del Norte, Perú, n00227685@upn.pe, n00243166@upn.pe, david.coro@upn.edu.pe

Resumen— El Perú, ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, presenta una alta vulnerabilidad sísmica, una problemática crítica considerando que gran porcentaje de las edificaciones autoconstruidas carece de la rigidez y ductilidad necesarias para soportar grandes eventos. Para abordar este riesgo estructural, esta investigación valida una metodología numérica para evaluar la respuesta dinámica de estructuras de periodo corto ($T_n = 0.4$ s) ante sismos peruanos de subducción, analizando la influencia de la profundidad focal. Se procesaron cinco acelerogramas reales (Arequipa 2001, Ica 2007, Tacna 2010, Tacna 2012 y la réplica de Lima 1974) mediante filtrado Butterworth y corrección de línea base, empleando el método de integración de Newmark. Los resultados demuestran que la demanda sísmica no obedece linealmente a la magnitud de momento (M_w), sino a la configuración de la fuente y efectos de sitio locales. Se constató que el evento de Lima (M_w 7.1), por su naturaleza superficial (12.8 km), generó el mayor factor de amplificación dinámica (3.36). En contraste, el sismo profundo de Tacna 2012 (98 km) registró el desplazamiento más bajo (0.75 cm), evidenciando la atenuación de energía en ondas de alta frecuencia. Estos hallazgos validan la metodología numérica sobre un modelo físico controlado, estableciendo una línea base fundamental para futuros análisis de resiliencia estructural ante eventos de subducción en la región.

Palabras clave— Profundidad Focal, Efectos de Sitio, Método de Newmark, Sistema SDOF, Sismos Peruanos.

I. INTRODUCCIÓN

El Perú se encuentra emplazado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una región caracterizada por una intensa actividad sísmica y volcánica producto de la convergencia entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana. Este proceso de subducción genera una continua acumulación de energía de deformación que, al liberarse, provoca sismos de diversas magnitudes que afectan predominantemente a la costa y la región sur del país [1]. Históricamente, eventos de gran magnitud como los terremotos de Arequipa en 2001 (M_w 8.4) [2] e Ica (Pisco) en 2007 (M_w 7.9) [3], sumados a los sismos de Tacna en 2010 (M_w 6.2) [4] y 2012 (M_w 6.3) [5], así como el de Lima en 1974 (M_w 7.2) [6], han evidenciado la alta exposición sísmica del territorio nacional y la vulnerabilidad de la infraestructura urbana frente a sollicitaciones dinámicas intensas.

Desde el punto de vista normativo, el Reglamento Nacional de Edificaciones clasifica el territorio peruano en cuatro zonas sísmicas. Como se aprecia en la Fig. 1, la franja costera corresponde a la Zona 4, definida como la de mayor peligro sísmico, mientras que regiones como Arequipa se ubican mayoritariamente en la Zona 3, donde se presentan

aceleraciones basales considerables en áreas de alta densidad poblacional [7], [8].

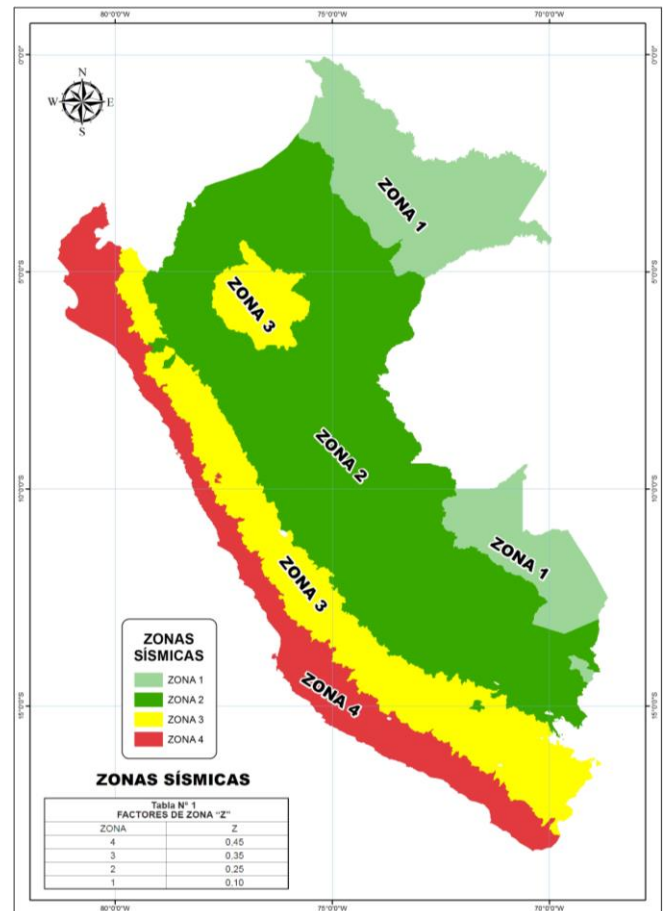


Fig. 1. Mapa de Zonificación Sísmica del Perú según la Norma Técnica E.030, destacando la región costera como Zona 4 de peligro muy alto y sectores del sur como Arequipa en la Zona 3 de peligro alto [7].

A pesar de la existencia de normativas de diseño sismorresistente actualizadas, reportes del Instituto Geofísico del Perú (IGP) y del CISMID advierten que un porcentaje significativo de las edificaciones autoconstruidas carece de la rigidez y ductilidad necesarias para soportar eventos de gran magnitud sin sufrir daños estructurales severos [9]. Asimismo, la literatura técnica señala que el diseño convencional suele basarse en espectros de respuesta elástica o inelástica normativos, dejando de lado, en muchas ocasiones, el análisis del desempeño estructural ante historias de tiempo-aceleración

(registros reales) que capturen las características particulares de la fuente y los efectos de sitio locales [10], [11].

Frente a esta necesidad, resulta imperativo validar metodologías de análisis que integren registros de movimiento fuerte procesados adecuadamente. El uso de señales sísmicas reales, corregidas por línea base y filtradas para eliminar ruido instrumental, permite estimar con mayor precisión la demanda de desplazamiento y aceleración en las estructuras.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo validar una metodología numérica-experimental para evaluar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones rígidas, sometiendo una estructura simplificada a cinco eventos sísmicos reales registrados en Arequipa, Ica, Tacna y Lima. La metodología comprende el procesamiento de los acelerogramas mediante el software SeismoSignal para garantizar la calidad de los datos de entrada [12].

Posteriormente, se emplea el método de integración numérica de Newmark [13], para determinar la historia de respuesta de un modelo físico a escala reducida, idealizado como un sistema de un grado de libertad (SDOF) representativo de edificaciones rígidas de baja altura. El estudio busca comparar la influencia de la magnitud, distancia epicentral y profundidad focal en la respuesta estructural, aportando una base metodológica para futuros análisis de resiliencia sísmica.

II. MARCO TEÓRICO

A. Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID)

Fundado en 1986 mediante la cooperación entre la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y el gobierno de Japón (a través de JICA), el CISMID se ha consolidado como una institución referente en ingeniería sísmica y gestión de riesgos en la región. Con más de tres décadas de trayectoria, la institución lidera investigaciones críticas en microzonificación sísmica y desarrollo de tecnologías constructivas sismorresistentes. Además, su impacto se extiende a nivel latinoamericano, habiendo capacitado a más de 500 profesionales y manteniendo alianzas estratégicas con entidades de prestigio global como la Universidad de Tokio y la Universidad de California, promoviendo el intercambio científico en foros internacionales [14].

B. Software SeismoSignal

Para el procesamiento de señales, se emplea SeismoSignal, una herramienta especializada en sismología e ingeniería sísmica diseñada para el tratamiento de registros de movimiento fuerte. Este software permite la corrección de línea base y filtrado de acelerogramas, facilitando la extracción de parámetros sísmicos fundamentales y la visualización de la respuesta en frecuencia, lo cual es indispensable para una correcta caracterización de los efectos de sitio y la evaluación de la demanda estructural [12].

C. Grados de Libertad (GDL) y Modelamiento SDOF

La precisión en el análisis de la sismorresistencia depende intrínsecamente de la idealización matemática de la estructura. Los Grados de Libertad (GDL) definen las coordenadas independientes necesarias para describir el movimiento del sistema. En el presente estudio, se opta por un modelo de Sistema de Un Grado de Libertad (SDOF, por sus siglas en inglés), el cual simplifica el problema dinámico concentrando la masa y rigidez en un único modo de vibración. Esta simplificación es efectiva para estimar desplazamientos, velocidades y aceleraciones en edificaciones regulares de baja altura, permitiendo aplicar métodos numéricos como Newmark para comprender la respuesta dinámica ante distintas excitaciones sísmicas [15].

D. Método de Integración Numérica de Newmark

El método de Newmark es un procedimiento numérico paso a paso ampliamente validado en ingeniería estructural y geotécnica para resolver ecuaciones diferenciales de movimiento ante cargas dinámicas arbitrarias, como los sismos. Este método asume una variación de la aceleración dentro de un intervalo de tiempo (Δt) y permite calcular la historia de respuesta (desplazamiento, velocidad y aceleración) del sistema. Sus ecuaciones constitutivas relacionan el estado del movimiento en el tiempo t_{i+1} con el estado en t_i mediante los parámetros de integración β y γ , los cuales determinan la estabilidad y precisión del método [16], [17], tal como se define en el conjunto de ecuaciones (1) a (5):

$$\ddot{u}_{i+1} = \frac{-\ddot{u}_{gi+1} - B\dot{u}_i - C\dot{u}_i - D\ddot{u}_i}{A} \quad (1)$$

$$A = 1 + 2\xi\omega\gamma\Delta t + \omega^2\beta(\Delta t)^2 \quad (2)$$

$$B = \omega^2 \quad (3)$$

$$C = 2\xi\omega + \omega^2\Delta t \quad (4)$$

$$D = 2\xi\omega(1 - \gamma)\Delta t + \omega^2(0.5 - \beta)(\Delta t)^2 \quad (5)$$

Donde:

β = Coeficiente de variación de aceleración

ξ = Fracción de amortiguamiento crítico.

γ = Coeficiente de variación de velocidad

Δt = Variación de tiempo (s).

ω_n = Frecuencia angular natural (rad/s).

A partir de estas variables, la velocidad y el desplazamiento en cada instante de tiempo se determinan mediante las expresiones (6) y (7):

$$\dot{u}_{i+1} = \dot{u}_i + [(1 - \gamma)\Delta t]\ddot{u}_i + (\gamma\Delta t)\ddot{u}_{i+1} \quad (6)$$

$$u_{i+1} = u_i + (\Delta t)\dot{u}_i + [(0.5 - \beta)(\Delta t)^2]\ddot{u}_i + [\beta(\Delta t)^2]\ddot{u}_{i+1} \quad (7)$$

E. Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier es una herramienta matemática fundamental en dinámica estructural que permite trasladar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Este proceso descompone el registro sísmico complejo en una suma de ondas sinusoidales simples, revelando el contenido energético y las frecuencias predominantes del sismo. Su aplicación es crucial para identificar fenómenos de resonancia entre el suelo y la estructura. Asimismo, existen variantes avanzadas empleadas en análisis no lineales y física matemática [18]–[20].

E.1) Transformada de Fourier Continua

Representa la base teórica que define la descomposición espectral de una señal continua en el tiempo, expresada matemáticamente en (8):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (8)$$

E.2) Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Dado que los registros sísmicos son señales digitales muestreadas a intervalos de tiempo constantes (Δt), se emplea la versión discreta de la transformada para su procesamiento computacional, definida en (9):

$$A_k = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) - j \sum_{n=0}^{N-1} a_n \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (9)$$

E.3) Parte Real e Imaginaria

La DFT genera componentes complejos que contienen la información de magnitud y fase de la señal. Las componentes real e imaginaria se definen, respectivamente, según (10) y (11):

$$Re(A_k) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (10)$$

$$Im(A_k) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad (11)$$

E.4) Espectro de Amplitud

El espectro de amplitud, calculado a partir de las componentes anteriores, cuantifica la energía de la señal en cada frecuencia, permitiendo identificar las frecuencias dominantes del evento sísmico mediante (12):

$$|A_k| = \sqrt{\left[\sum_{n=0}^{N-1} a_n \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right]^2 + \left[\sum_{n=0}^{N-1} a_n \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \right]^2} \quad (12)$$

E.5) Ángulo de Fase

El ángulo de fase determina el retardo temporal de las componentes frecuenciales y se obtiene a partir de (13):

$$\phi_k = \text{atan}\left(\frac{Im(A_k)}{Re(A_k)}\right) \quad (13)$$

III. METODOLOGÍA

Esta investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo y experimental, estructurado en dos fases secuenciales que van

desde la obtención y limpieza de datos sísmicos hasta el modelamiento dinámico de la estructura.

A. Fase 1: Selección y Procesamiento de Registros

El procedimiento inicial, detallado en la Fig. 2, consistió en la identificación y descarga de los acelerogramas correspondientes a cinco eventos de subducción críticos: Arequipa 2001 (M_w 8.4), Ica 2007 (M_w 7.9), Tacna 2010 (M_w 6.2), Tacna 2012 (M_w 6.3) y la réplica de Lima 1974 (M_w 7.1). Es preciso señalar que estos parámetros sismológicos corresponden a las Magnitudes de Momento (M_w) oficiales validadas por los catálogos del IGP y el USGS, actualizando así las magnitudes locales preliminares (M_l o m_b) presentes en las cabeceras de los registros crudos de las estaciones. Asimismo, el registro utilizado para el evento de Lima de 1974 corresponde a su réplica principal, la cual fue seleccionada por sus importantes características de aceleración en campo cercano. Posteriormente, los registros crudos ("raw data") fueron importados al software SeismoSignal para su corrección. El procesamiento incluyó una corrección de línea base polinómica para eliminar desviaciones de baja frecuencia y la aplicación de un filtro pasa-banda Butterworth (0.10 – 25 Hz) para mitigar el ruido instrumental. Se verificó que la velocidad y el desplazamiento final del suelo fueran aproximadamente cero antes de exportar la data corregida ($\ddot{u}_g$) para el análisis.

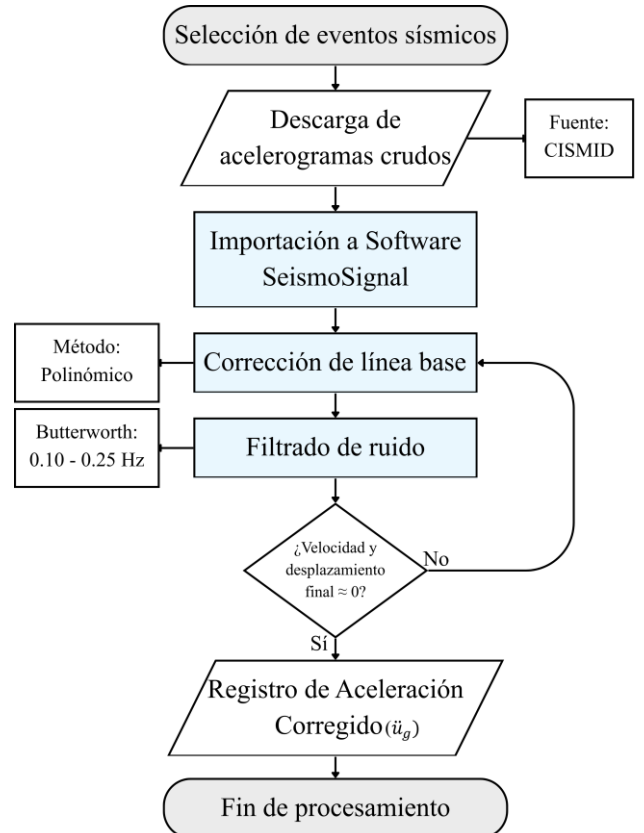


Fig. 2. Flujograma del proceso de selección, corrección de línea base y filtrado de registros sísmicos (Fase 1).

B. Fase 2: Caracterización y Modelamiento Numérico

Una vez procesados los registros, se definió el sistema estructural bajo estudio, cuyo proceso de análisis se resume en la Fig. 3. Se empleó un modelo físico experimental a escala reducida fabricado en madera, con dimensiones de 21 cm de base, 27 cm de altura, 13 cm de espesor y una masa de 3.68 kg.

La selección de este material permitió configurar un oscilador de un grado de libertad (SDOF) con una relación rigidez-masa controlada. A pesar de la diferencia de material con una estructura real, el modelo fue calibrado para obtener un periodo fundamental de vibración $T_n = 0.4$ s, valor que es dinámicamente equivalente y representativo de edificaciones de albañilería de baja altura típicas en la región. Las propiedades dinámicas utilizadas para la integración numérica se presentan en la Tabla I.

TABLA I
PROPIEDADES DEL MODELO FÍSICO (SDOF)

Parámetro	Símbolo	Valor
Material	-	Madera
Dimensiones	$b \times h \times e$	$21 \times 27 \times 13$ cm
Masa de bloque	m	3.68 kg
Periodo Natural	T_n	0.4 s
Frecuencia natural	ω_n	15.79 rad/s
Amortiguamiento	ξ	0.05 (5%)
Método Newmark	γ, β	0.5, 0.167

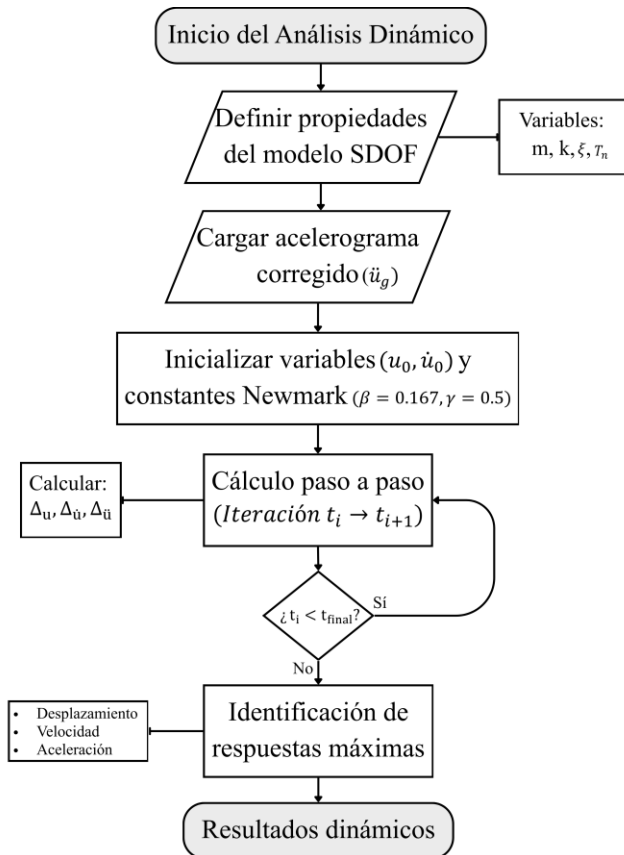


Fig. 3. Flujograma del algoritmo de integración numérica de Newmark para la obtención de la respuesta sísmica (Fase 2).

Con el sistema caracterizado por estos parámetros, se aplicó el algoritmo de Newmark paso a paso (con $\gamma = 0.5$ y $\beta = 0.167$), correspondiente al método de aceleración lineal) para obtener las historias de tiempo de desplazamiento, velocidad y aceleración absoluta ante los tres eventos sísmicos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El procesamiento de los registros sísmicos y la simulación numérica mediante el método de Newmark permitieron obtener la historia de respuesta del oscilador SDOF ($T_n = 0.4$ s). A continuación, se detallan las características de la excitación y la respuesta estructural obtenida.

A. Características de la Excitación Sísmica

Los acelerogramas corregidos en SeismoSignal muestran variaciones significativas en intensidad y contenido frecuencial. La Tabla II resume los parámetros sismológicos y los valores de la Aceleración Pico del Suelo (PGA, por sus siglas en inglés Peak Ground Acceleration).

TABLA II
PARÁMETROS DE LOS EVENTOS SÍSMICOS SELECCIONADOS

Evento	Año	Estación	Mw	Prof.(km)	PGA (cm/s ²)
Arequipa	2001	Moquegua (MOQ001)	8.4	33.0	288.59
Ica	2007	Univ. San Luis Gonzaga (ICA002)	7.9	40.0	291.97
Tacna	2010	Univ. Privada de Tacna (UPTAC)	6.2	36.0	98.49
Tacna	2012	Univ. Privada de Tacna (UPTAC)	6.3	98.0	172.59
Lima (Réplica)	1974	Univ. Nac. Agraria La Molina (MOL)	7.1	12.8	109.77

B. Respuesta Estructural (Método de Newmark)

La Tabla III consolida los valores máximos absolutos de desplazamiento (D_{max}), velocidad (V_{max}) y aceleración (A_{max}) experimentados por el modelo.

TABLA III
RESPUESTAS MÁXIMAS DEL MODELO SDOF ($t_n = 0.4$ s)

Sismo	D_{max} (cm)	V_{max} (cm/s)	A_{max} (cm/s ²)	Amplificación (A_{max}/PGA)
Arequipa 2001	2.47	37.06	598.26	2.07
Ica 2007	2.42	37.83	619.66	2.12
Tacna 2010	0.81	12.61	216.10	2.19
Tacna 2012	0.75	13.31	264.46	1.53
Lima 1974	1.25	20.51	368.77	3.36

C. Análisis de Resultados por Evento

1) *Evento Arequipa 2001 (M_w 8.4):* Este sismo representó una de las mayores demandas de energía del estudio. Registrado en la estación de Moquegua (a 33 km de profundidad), presentó un PGA de 288.59 cm/s². La respuesta del oscilador fue severa,

alcanzando una aceleración absoluta de 598.26 cm/s^2 y un desplazamiento máximo de 2.47 cm . Esto evidencia que los sismos de subducción de gran magnitud poseen la suficiente energía para generar desplazamientos críticos en estructuras de periodo corto, aun a distancias considerables de la fuente.

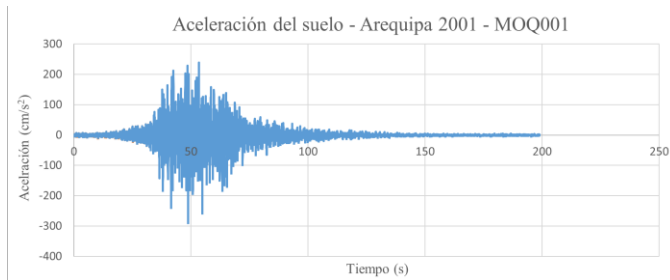


Fig. 4. Historia de aceleración del suelo (acelerograma corregido) en la estación MOQ001 durante el sismo de Arequipa 2001 (M_w 8.4).

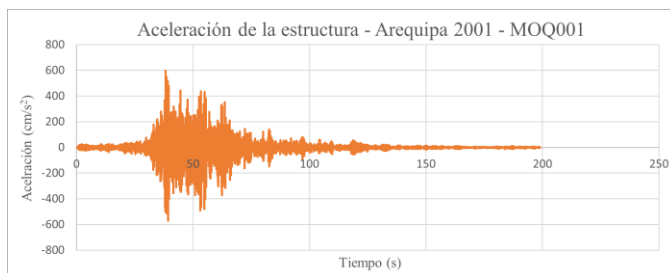


Fig. 5. Historia de aceleración absoluta del modelo SDOF ($T_n = 0.4 \text{ s}$) ante la excitación de Arequipa 2001.

2) *Evento Ica 2007 (M_w 7.9)*: Con una profundidad focal de 40 km , este evento registró el pico más alto de aceleración de entrada en el grupo analizado (291.97 cm/s^2). Como consecuencia, la estructura experimentó su máxima aceleración absoluta (619.66 cm/s^2) y una velocidad pico de 37.83 cm/s . El factor de amplificación de 2.12 confirma una importante transferencia de energía sísmica, lo cual es coherente con el nivel de daño documentado en las edificaciones de albañilería en la región durante este terremoto.

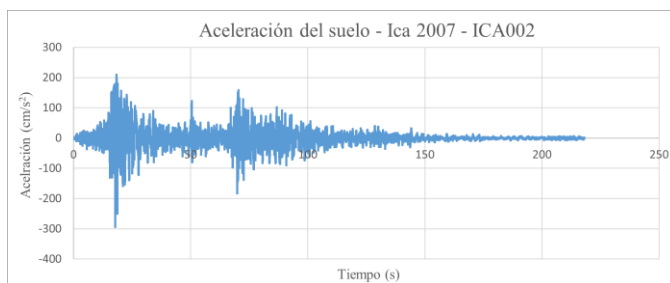


Fig. 6. Historia de aceleración del suelo (acelerograma corregido) en la estación ICA002 durante el sismo de Ica 2007 (M_w 8.0).

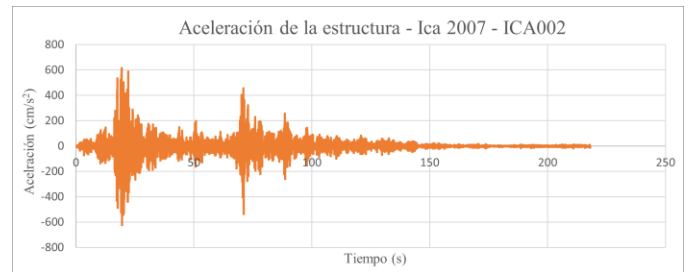


Fig. 7. Historia de aceleración absoluta del modelo SDOF ($T_n = 0.4 \text{ s}$) ante la excitación de Ica 2007.

3) *Evento Tacna 2010 (M_w 6.2)*: El análisis de este evento (profundidad de 36 km) muestra una respuesta estructural controlada. Si bien el PGA fue el más bajo del estudio (98.49 cm/s^2), el factor de amplificación dinámica fue de 2.19 . Esto indica que, aunque la energía total liberada fue moderada, el contenido frecuencial de la onda sísmica se acopló de manera eficiente con el periodo natural del sistema (0.4 s), generando un desplazamiento de 0.81 cm .

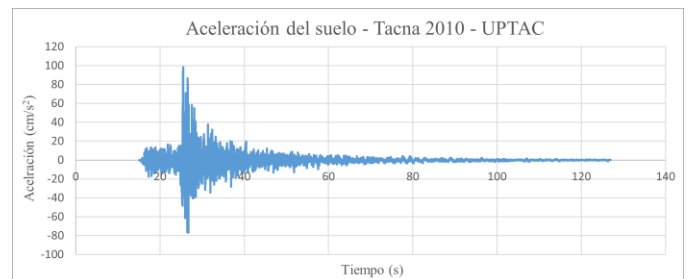


Fig. 8. Historia de aceleración del suelo (acelerograma corregido) en la estación UPTAC durante el sismo de Tacna 2010 (M_w 6.2).

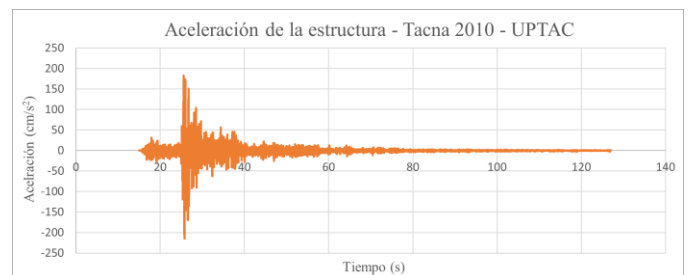


Fig. 9. Historia de aceleración absoluta del modelo SDOF ($T_n = 0.4 \text{ s}$) ante la excitación de Tacna 2010.

4) *Evento Tacna 2012 (M_w 6.3)*: Este sismo resulta fundamental para evaluar la influencia de la profundidad focal. Al originarse a 98 km de profundidad, las ondas que llegaron a la superficie presentaron un predominio de altas frecuencias. Aunque el PGA (172.59 cm/s^2) fue notablemente mayor que el evento del 2010, el desplazamiento estructural resultante fue el más bajo de toda la investigación (0.75 cm), acompañado del menor factor de amplificación (1.53). Esto corrobora matemáticamente que los sismos profundos tienden a atenuar su capacidad de excitar el modo fundamental de estructuras rígidas.

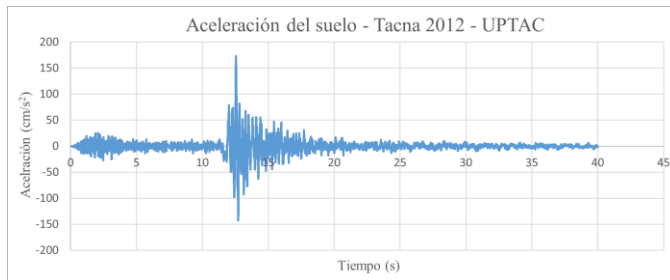


Fig. 10. Historia de aceleración del suelo (acelerograma corregido) en la estación UPTAC debido al sismo profundo de Tacna 2012 (M_w 6.3).

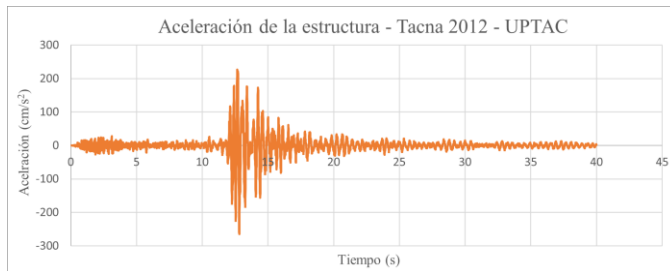


Fig. 11. Historia de aceleración absoluta del modelo SDOF ($T_n = 0.4$ s) ante la excitación de Tacna 2012.

5) *Evento Lima 1974 (Réplica M_w 7.1)*: Los resultados de este evento evidencian la criticidad del efecto de campo cercano. Con un hipocentro superficial de apenas 12.8 km, el PGA registrado fue de 109.77 cm/s^2 . Sin embargo, indujo el mayor factor de amplificación dinámica de todo el estudio (3.36), llevando a la estructura a una aceleración de 368.77 cm/s^2 y un desplazamiento de 1.25 cm. Este drástico incremento demuestra que la superficialidad del foco y los efectos de sitio locales (suelos de La Molina) pueden generar demandas estructurales que superan las expectativas basadas únicamente en la aceleración basal de entrada.

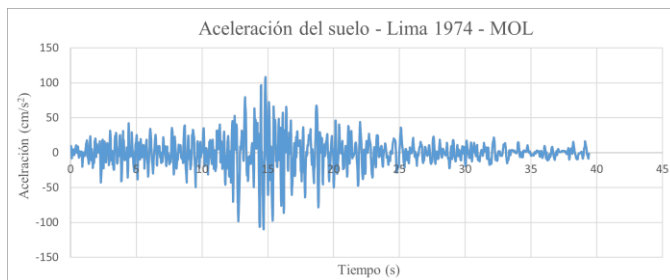


Fig. 12. Historia de aceleración del suelo (acelerograma corregido) en la estación MOL correspondiente a la réplica de Lima 1974 (M_w 7.1).

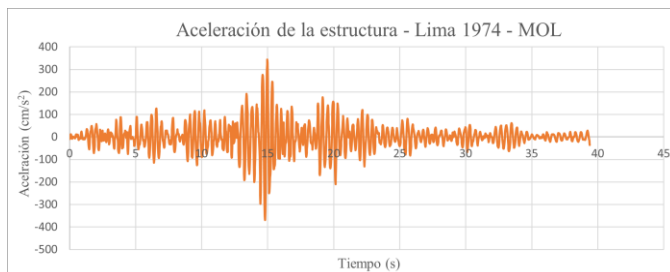


Fig. 13. Historia de aceleración absoluta del modelo SDOF ($T_n = 0.4$ s) ante la excitación de la réplica de Lima 1974.

D. Discusión General

La comparación de la respuesta dinámica ante los cinco eventos analizados revela que la demanda estructural en sistemas de periodo corto no es una función lineal de la magnitud de momento (M_w), sino el resultado de una interacción crítica entre la profundidad focal y los efectos de sitio. Si bien los mega-terremotos de Arequipa (2001) e Ica (2007) generaron las aceleraciones absolutas más elevadas ($>590 \text{ cm/s}^2$), sus factores de amplificación se mantuvieron constantes en un rango de 2.1, evidenciando una transferencia de energía predecible para sismos de subducción de gran escala.

El hallazgo más significativo surge al contrastar los eventos del sur con el escenario de Lima. El caso de Tacna 2012 (M_w 6.3), pese a su magnitud y aceleración basal, registró el desplazamiento más bajo (0.75 cm) y el menor factor de amplificación (1.53), validando físicamente cómo los focos profundos (98 km) actúan como filtros naturales de energía para estructuras rígidas. En contraparte, la réplica de Lima de 1974 (M_w 7.1) impuso la demanda más severa con una amplificación de 3.36.

Este comportamiento excepcional demuestra que la superficialidad del foco (12.8 km), característica de eventos en campo cercano, puede generar excitaciones estructurales que superan las expectativas basadas únicamente en la magnitud nominal, redefiniendo la percepción del peligro sísmico en zonas de suelos blandos.

V. CONCLUSIONES

A partir del modelamiento dinámico del sistema SDOF ($T_n = 0.4$ s) sometido a tres registros sísmicos peruanos, se concluye:

1) *Importancia de la Cercanía del Sismo frente a su Magnitud*: Se verificó que la profundidad focal y la proximidad al epicentro rigen la severidad de la respuesta dinámica por encima de la magnitud de momento (M_w). El registro de Lima indujo factores de amplificación 60% superiores a los grandes sismos del sur, confirmando que la cercanía de una fuente superficial es el factor más determinante para la vulnerabilidad de edificaciones de baja altura.

2) *Reducción de la Energía en Sismos Profundos*: Se comprobó matemáticamente la atenuación de la demanda estructural en eventos de subducción profunda. El caso de Tacna 2012 evidenció que, aun con una aceleración de suelo considerable, el contenido frecuencial de las ondas profundas no logra entrar en resonancia con el modo fundamental de estructuras rígidas, minimizando así los desplazamientos críticos.

3) *Influencia del Tipo de Suelo en la Amplificación Sísmica*: Los resultados resaltan el impacto de las condiciones geotécnicas locales, donde suelos con las características de los depósitos de La Molina pueden triplicar la demanda sísmica basal. Esto exige que el diseño sismorresistente en el Perú transite del uso de espectros normativos convencionales hacia el análisis de historias de tiempo reales procesadas.

4) *Confiabilidad del Método Numérico Utilizado*: La metodología que integró el procesamiento en SeismoSignal y la integración paso a paso de Newmark demostró ser una herramienta robusta para capturar la física del problema. Este procedimiento permitió depurar el ruido instrumental de los registros crudos, proporcionando una base analítica sólida para la evaluación de la respuesta sísmica.

VI. RECOMENDACIONES

A. *Expansión a Modelos MDOF*: Se recomienda extender el análisis a sistemas de Múltiples Grados de Libertad (MDOF) para evaluar cómo la profundidad focal afecta a estructuras más complejas, permitiendo analizar efectos de torsión y modos superiores de vibración en edificaciones irregulares.

B. *Validación Experimental*: Dado que esta investigación se basó en una integración numérica (Newmark), se sugiere para futuras líneas de investigación someter el modelo físico construido a ensayos reales en mesa vibratoria (shake table). Esto permitiría contrastar los resultados teóricos con la respuesta física real y calibrar con mayor precisión el amortiguamiento.

C. *Análisis de Campo Cercano*: Considerando los hallazgos del evento Lima (Réplica) 1974, se recomienda priorizar el estudio de registros sísmicos donde la estación acelerométrica se encuentre a muy corta distancia del epicentro (campo cercano). Estos registros suelen presentar pulsos de aceleración intensos que son críticos para el diseño, independientemente de la magnitud del sismo.

REFERENCIAS

- [1] Sociedad Geológica del Perú, "Alerta: Perú, un país altamente sísmico," [En línea]. Disponible en: <https://www.sgp.org.pe/alerta-peru-un-pais-altamente-sismico/>.
- [2] Instituto Geofísico del Perú, "El terremoto del sur del Perú del 23 de junio de 2001 y su secuencia sísmica," Repositorio Geofísico Nacional (REGEN), 2001. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.igp.gob.pe/items/b2e71e01-8983-4301-9445-70ef88c3a5e5>
- [3] Instituto Geofísico del Perú, "El sismo de Pisco del 15 de agosto de 2007," 2007. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.igp.gob.pe/items/9ebfc65c-a85c-400d-913e-12c570692a42>
- [4] H. Tavera, I. Bernal, y F. Strasser, "El sismo de Tacna del 5 de Mayo de 2010 (6.5 ML), región sur del Perú", Informe Técnico, Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú, 2010. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/1100>
- [5] H. Tavera, J. Martínez Herrera, P. Guardia Anampa y E. C. Flores Guerra, "Sismo de Tacna del 14 de mayo del 2012 (6.3 Mw): aspectos sismológicos", Informe Técnico N° 03-2012, Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú, mayo 2012. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/1102>
- [6] A. G. Brady and V. Perez, "Strong-motion earthquake accelerograms: Digitization and analysis, 1971-1974 - Records from Lima, Peru," U.S. Geological Survey, Open-File Report 77-587, 1977. [En línea]. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/of/1977/0587/report.pdf>
- [7] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, "Decreto Supremo N° 003-2016-VIVIENDA que modifica la Norma Técnica E.030 'Diseño Sismorresistente'," Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1337531-1>
- [8] Instituto Geofísico del Perú (IGP), "Mapa de Peligro Sísmico para el Perú", 2015. [En línea]. Disponible: <https://share.google/P8Vb0rn4msVz0bCS1>
- [9] R. Klingner, "Las normas de diseño y construcción deben conducir a sistemas estructurales con una probabilidad del colapso de menos del 10%", Presentación técnica, CISMID, Lima, Perú, 2007. [En línea]. Disponible en: <https://share.google/w6gdn0N0Pwk97n9n9>
- [10] N. Tarque, H. Varum, and M. Blondet, "Seismic vulnerability assessment of a 17th century adobe church in the Peruvian Andes," International Journal of Architectural Heritage, vol. 13, no. 1, pp. 140–152, 2019. doi: 10.1080/15583058.2018.1497224.
- [11] V. Sangiorgio, G. Uva, and J. M. Adam, "Integrated Seismic Vulnerability Assessment of Historical Masonry Churches Including Architectural and Artistic Assets," International Journal of Architectural Heritage, vol. 15, no. 11, pp. 1609-1622, 2021. doi: 10.1080/15583058.2019.1709916.
- [12] Seismosoft Ltd., "SeismoSignal – Signal Processing of Strong-Motion Data," 2025. [En línea]. Disponible: <https://seismosoft.com/products/seimosignal/>
- [13] H. A. Al-Jwaieri, "Closed-form solutions of dynamic vibration equations of seismically excited structures," Australian Journal of Civil Engineering, vol. 20, no. 2, 2022. doi: 10.1080/25765299.2022.2124754.
- [14] Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), "Historia," Universidad Nacional de Ingeniería. [En línea]. Disponible en: <https://www.cismid.uni.edu.pe/historia/>
- [15] A. Shibata y H. Masuno, "Seismic response analysis of an 11-story reinforced concrete building damaged by the 2011 Great East Japan earthquake," Journal of Applied Physics, vol. 1892, p. 120008, 2017. doi: 10.1063/1.5005749.
- [16] A. Yiğit, "Prediction of amount of earthquake-induced slope displacement by using Newmark method," Engineering Geology, vol. 264, p. 105385, 2020. doi: 10.1016/j.enggeo.2019.105385.
- [17] X. Wang, L. Dai, D. Djukem, A. Braun, T. Gorum, X. Zhang, M. Chevalier, Q. Xu, H. Havenith, C. Fang, y X. Fan, "Traditional and modified Newmark displacement methods after the 2022 Ms 6.8 Luding earthquake (Eastern Tibetan Plateau)," Landslides, 2024. doi: 10.1007/s10346-023-02194-5.
- [18] W. Gan, "Fourier Transform: Signal Processing and Image Processing for Acoustic Imaging," en Advances in Signal Processing, Springer, 2020. doi: 10.1007/978-981-10-5550-8_3.
- [19] M. Krukowski, "Characterization of the Fourier transform by its properties," Pacific Journal of Mathematics, 2023. doi: 10.2140/pjm.2024.329.217.
- [20] H. Ko y W. Schlag, "An introduction to the distorted Fourier transform," Advanced Nonlinear Studies, vol. 25, no. 1, 2025. doi: 10.1515/ans-2023-0164.