

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**DETERMINACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE UNA  
EDIFICACIÓN AISLADA MEDIANTE EL MONITOREO DE LA SALUD  
ESTRUCTURAL**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR:**

**JOSEPH DARWIN JARAMILLO DEL AGUILA  
ID: 0000-0001-8912-5616**

**ASESOR:**

**Dr. MIGUEL AUGUSTO DIAZ FIGUEROA  
ID: 0000-0002-9421-4194**

**Lima- Perú**

**2024**

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte,  
con fines estrictamente académicos.”**

Jaramillo del Aguila, Joseph Darwin

[jjaramillod@uni.pe](mailto:jjaramillod@uni.pe)

+51-967 928 335

## **AGRADECIMIENTOS**

Me es dichoso aprovechar este apartado para expresar mi eterno y profundo agradecimiento a todos los docentes, investigadores y compañeros del CISMID que de alguna manera fueron partícipes en el desarrollo de esta investigación, en especial al Dr. Miguel Diaz, por tener la amabilidad y confianza de compartir sus conocimientos, experiencia y consejos tanto profesionales como humanistas; al Dr. Hugo Scaletti y al Ing. Ricardo Proaño por las facilidades en la información compartida y finalmente a mis padres por ser el apoyo emocional necesario para la culminación de la presente tesis.

A todos ellos, muchas gracias.

## ÍNDICE

Resumen .....	3
Abstract .....	4
Prólogo .....	5
Lista de tablas .....	7
Lista de figuras .....	9
Lista de símbolos y siglas .....	15
<b>Capítulo I: Introducción.....</b>	<b>19</b>
1.1 Generalidades .....	19
1.1.1 Antecedentes referenciales .....	19
1.2 Problemática .....	21
1.3 Objetivos .....	23
1.3.1 Objetivo general .....	23
1.3.2 Objetivos específicos.....	23
1.4 Hipótesis .....	24
1.4.1 Hipótesis general.....	24
1.4.2 Hipótesis específicas.....	24
<b>Capítulo II: Marco teórico y conceptual .....</b>	<b>25</b>
2.1 Conceptos preliminares.....	25
2.1.1 Monitoreo de la salud estructural.....	25
2.1.2 Sensores de vibración .....	25
2.1.3 Aislador .....	25
2.1.4 Procesamiento de señales .....	26
2.1.5 Transformada de Fourier .....	26
2.1.6 Convolución de señales discretas .....	27
2.1.7 Ventanas Parzen.....	28
2.1.8 Suavizado de señales (smoothing).....	29
2.1.9 Integración numérica .....	30
2.1.10 Análisis dinámico no lineal .....	30
2.1.11 Sistemas de aislamiento sísmico.....	31
2.1.12 Escalamiento de registros sísmicos.....	32
2.2 La transformada de Wavelets.....	33
2.2.1 La transformada de Wavelets continua .....	34
2.2.2 La transformada de Wavelets discreta .....	37

2.3	Filtrado de señales .....	38
2.3.1	Filtro por corrección línea base .....	38
2.3.2	Filtro pasa-banda butterworth .....	42
2.3.3	Filtro por transformada de Wavelets discreta .....	44
	<b>Capítulo III: Estructura objetivo .....</b>	<b>48</b>
3.1	Descripción .....	48
3.1.1	Ubicación .....	48
3.1.2	Geometría y sistema estructural .....	49
3.1.3	Propiedades dinámicas .....	51
3.1.4	Aisladores del CIIFIC .....	52
3.2	Sistema de observación de la respuesta .....	52
3.2.1	Sensores sísmicos (acelerómetros) .....	52
3.2.2	Distribución de los sensores .....	53
3.2.3	Sistema de adquisición de datos .....	55
	<b>Capítulo IV: Modelamiento matemático .....</b>	<b>56</b>
4.1	Modelamiento de la estructura .....	56
4.1.1	Propiedades de los materiales .....	56
4.1.2	Modelo de sistema aporticado .....	58
4.1.3	Configuración del análisis dinámico no lineal .....	58
4.2	Aplicación de la transformada de Wavelets .....	59
4.2.1	Caso de estudio: El Centro .....	59
4.2.2	Calibración del modelo .....	71
	<b>Capítulo V: Estudio de la respuesta sísmica .....</b>	<b>82</b>
5.1	Registros sísmicos .....	82
5.2	Respuesta sísmica elástica .....	84
5.3	Respuesta sísmica inelástica .....	89
	<b>Capítulo VI: Análisis y discusión de resultados .....</b>	<b>93</b>
6.1	Parámetros dinámicos participativos (PDP) .....	93
6.1.1	Parámetros de la respuesta elástica .....	95
6.1.2	Parámetros de la respuesta inelástica .....	100
6.2	Caso aplicativo .....	102
6.3	Propuesta metodológica .....	106
	Conclusiones .....	108
	Recomendaciones .....	111
	Referencias bibliográficas .....	112
	Anexos .....	115

## RESUMEN

El monitoreo de la salud estructural basado en la medición de las vibraciones es un proceso que implementa la instrumentación de sensores y metodologías que proporcionan información respecto a la condición de una estructura, lo cual permite la evaluación de la seguridad e integridad del sistema estructural. Debido a esto, en las últimas décadas, una gran cantidad de algoritmos han sido desarrollados; entre ellos, la transformada de Wavelets es considerada como una metodología eficiente para el filtrado de las aceleraciones registradas por los sensores. Sin embargo, debido a la naturaleza compleja de los sismos y a la particularidad de los sistemas estructurales, los parámetros utilizados por la transformada de Wavelets para el filtrado de la respuesta sísmica son frecuentemente variables. Esta investigación propone un método para obtener la respuesta sísmica de una edificación aislada sujeta a movimientos fuertes del terreno a través de simulaciones numéricas de un modelo matemático de la estructura, usando registros sintéticos basados en eventos sísmicos ocurridos en Perú.

Primeramente, se generaron registros sintéticos a partir de evento sísmicos catalogados como históricos mediante el escalamiento de sus contenidos de frecuencias al espectro de peligro uniforme de la ciudad de Lima para un periodo de retorno de 2475 años (2% de probabilidad de excedencia en 50 años). Luego, se hicieron simulaciones en el dominio del tiempo al modelo matemático con los registros sintéticos, y se contaminaron intencionalmente las respuestas sísmicas con ondas estocásticas estacionarias (ruido blanco) para asemejarse a lo que sería registrado por un acelerómetro en una estructura real. Posteriormente, se procedió a la aplicación de la transformada de Wavelets para el filtrado de las respuestas contaminadas escogiendo aquellos parámetros que den una mejor aproximación con la respuesta teórica del modelo antes de la contaminación. De esta manera, se encontró que los parámetros intrínsecos óptimos de la estructura son aquellos correspondientes aproximadamente a una banda de frecuencias de 0.20 a 6.25 Hz. Además, con las respuestas obtenidas del modelo se pudo determinar que la respuesta sísmica de la estructura permanecerá elástica para movimientos fuertes del terreno de hasta 0.8 g. Dado estos resultados, se concluye que el método puede ser aplicado en el monitoreo de la salud estructural de forma confiable a sistemas estructurales aislados.

## ABSTRACT

Structural health monitoring based on vibration measurements is a process that implements the instrumentations of sensors and methodologies to provide information regarding the condition of a structure, which allows the evaluation of the safety and integrity of structural systems. Because of this, in the last decades, several algorithms have been developed; among them, the Wavelets transform is considered an efficient method for filtering the accelerations recorded by the sensors. However, due to the complex nature of earthquakes and the particularity of the structural systems, the parameters used by Wavelets transform for filtering the seismic response are frequently variables. This research proposes a method to obtain the seismic response of a base-isolated building subjected to ground strong motions through numerical simulations of a mathematical model of the structure, using synthetic records based on seismic events that occurred in Peru.

Firstly, synthetic records were generated from seismic events classified as historical by scaling their frequency content to the uniform hazard spectrum of Lima city for a return period of 2475 years (2% probability of exceedance in 50 years). Then, time domain simulations were made for the mathematical model with synthetic records, and the seismic responses were contaminated with stationary stochastic waves (white noise) to resemble what would be recorded by an accelerometer on a real structure. Subsequently, the Wavelets transform was applied to filter the contaminated responses, choosing those parameters that give a better approximation of the theoretical response of the model before contamination. In this way, it was found that the optimal intrinsic parameters of the structure are those corresponding to a frequency band from 0.20 to 6.25 Hz. In addition, with the responses obtained from the model, it was possible to determine that the seismic response of the structure will remain elastic for ground strong motions up to 0.8 g. Given these results, it can be concluded that the method can be reliably applied in structural health monitoring to isolated structural systems.

## PRÓLOGO

Este trabajo tiene como objetivo la obtención de la respuesta dinámica frente a movimientos sísmicos fuertes de una edificación con aislamiento en la base, la cual a su vez constan de un sistema de monitoreo mediante la instrumentación de ciertos niveles a través de sensores de aceleración que registran continuamente las vibraciones de la estructura frente a excitaciones ya sean sísmicas o ambientales. Debido a que las aceleraciones registradas por los sensores no solo contienen la respuesta de la estructura monitoreada sino también ruido que la contamina originado por diferentes factores ya sean ambientales o propios del sensor, en ese sentido es necesario desarrollar un método confiable para la obtención de los desplazamientos a partir de las aceleraciones registradas que dependa más de las características propias de la estructura que del propio método en sí. A través del uso de la transformada de Wavelets se puede descomponer las señales en diferentes bandas de frecuencias, conocidas como rangos, las cuales luego pueden ser incluidas o descartadas para la reconstrucción de la señal sin verse comprometida la respuesta objetivo. La determinación de estos rangos participativos son el objetivo principal de esta investigación y se suponen variables asociadas a las características estructurales de la edificación.

Para esto se hicieron uso tanto de los registros de aceleración de la edificación provenientes de eventos sísmicos, así como de respuestas estructurales sintéticas obtenidas a partir de simulaciones de un modelo matemático, teniéndose como principales limitaciones la cantidad reducida de sensores y la falta de eventos sísmicos lo suficientemente fuertes como para activar el sistema de aislamiento y lograr que la estructura incurriere dentro del rango no lineal. La calibración del modelo matemático se realizó comparando la respuesta obtenida por los sensores y la obtenida sintéticamente por simulaciones para un mismo evento sísmico registrado en la base de la subestructura.

Se generaron registros sintéticos para cubrir la ausencia de eventos sísmicos correspondientes a movimientos fuertes del terreno en base al escalamiento de registros históricos con la finalidad que en las simulaciones se logre activar el sistema de aislamiento y que la estructura incurriere dentro del rango no lineal. Tomadas estas consideraciones se logró activar el sistema de aislamiento evidenciando el comportamiento histerético bilineal en la base de la subestructura, sin embargo, la superestructura permaneció dentro del rango lineal elástico. Una

vez obtenidas estas respuestas se procedió a su contaminación mediante la adición de una onda estocástica estacionaria (ruido blanco) para simular el ruido natural contenido en los acelerómetros con el objetivo de minimizar el error de forma automática mediante los algoritmos desarrollados en base a la transformada de Wavelets. Con este proceso fue posible determinar aquellos rangos de frecuencias que proporcionen una mejor aproximación con las respuestas antes de la contaminación.

Como resultado final se concluyó que los parámetros o rangos que interviene en la reconstrucción de la señal dependen de las propiedades estructurales de las edificaciones.

ASESOR

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Frecuencias $f_{s,i}$ para cada rango en diferentes intervalos de tiempo $\Delta t$ .....	37
Tabla 3.1: Parámetros sísmicos según plano estructural.....	50
Tabla 3.2: Desplazamientos máximos de diseño. ....	50
Tabla 3.3: Periodos fundamentales.....	51
Tabla 3.4: Especificaciones técnicas de los sensores.....	53
Tabla 4.1: Parámetros de diseño de los aisladores.....	58
Tabla 4.2: Resultados del filtrado para diferentes combinaciones de rango en la dirección Norte-Sur de todos los niveles monitoreados. ....	78
Tabla 4.3: Resultados del filtrado para diferentes combinaciones de rango en la dirección Este-Oeste de todos los niveles monitoreados. ....	79
Tabla 5.1: Registros sísmicos.....	82
Tabla 5.2: Estaciones acelerográficas. ....	83
Tabla 5.3: Aceleraciones máximas por niveles relativas al terreno en dirección Norte-Sur respuesta elástica. ....	84
Tabla 5.4: Aceleraciones máximas por niveles relativas al terreno en dirección Este-Oeste respuesta elástica.....	85
Tabla 5.5: Distorsiones máximas por niveles en dirección Norte-Sur respuesta elástica.....	85
Tabla 5.6: Distorsiones máximas por niveles en dirección Este-Oeste respuesta elástica. ....	86
Tabla 5.7: Distorsiones máximas del nivel 0 (aisladores) respuesta elástica. ....	86
Tabla 5.8: Límites de distorsión de entresijos por material E030. ....	88
Tabla 5.9: Límites de deformación lateral ATC-40. ....	88
Tabla 5.10: Aceleraciones máximas por niveles relativas al terreno para la respuesta inelástica.....	89

Tabla 5.11: Distorsiones máximas por niveles para la respuesta inelástica. ....	89
Tabla 5.12: Distorsiones máximas del nivel 0 (aisladores) respuesta inelástica. ....	90
Tabla 6.1: Parámetros dinámicos participativos Tacna 2010. ....	95
Tabla 6.2: Parámetros dinámicos participativos Pisco 2007. ....	95
Tabla 6.3: Parámetros dinámicos participativos Huaraz 1970. ....	95
Tabla 6.4: Parámetros dinámicos participativos Lima noviembre 1974. ....	95
Tabla 6.5: Parámetros dinámicos participativos Lima octubre 1974. ....	96
Tabla 6.6: Parámetros dinámicos participativos Iquique 2005. ....	96
Tabla 6.7: Parámetros dinámicos participativos Lima 1966. ....	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama esquemático de un sensor de vibraciones basado en GMR.....	25
Figura 2.2: Transformada rápida de Fourier normalizada respecto al tiempo para un registro de aceleraciones.....	27
Figura 2.3: Estimación de densidad de probabilidad mediante ventanas Parzen.....	28
Figura 2.4: Suavizado de un espectro de Fourier para diferentes longitudes de ventanas Parzen. ....	29
Figura 2.5: Aisladores LRB. ....	32
Figura 2.6: Modelo de histéresis de un LRB. ....	32
Figura 2.7: Escalamiento de registro sísmico a un espectro de peligro uniforme (EPU) de 475 años de periodo de retorno. ....	33
Figura 2.8: Comparación entre el análisis de Fourier y análisis Wavelets. ....	34
Figura 2.9: Esquematización del factor de escalamiento "a".....	35
Figura 2.10: Esquematización del factor de traslación "b". ....	35
Figura 2.11: Escalograma componente Norte-Sur sismo El centro 1940 para una wavelet madre Mexican Hat. ....	36
Figura 2.12: Función de escalamiento y wavelet madre B-Spline de orden 4. ...	38
Figura 2.13: Obtención de la línea de tendencia para una señal general.....	39
Figura 2.14: Métodos de extrapolación. ....	40
Figura 2.15: Aceleración, velocidad y desplazamiento del terremoto de Chi-Chi de 1999.....	41
Figura 2.16: Corrección por línea base. ....	41
Figura 2.17: Gráficas características de los filtros de corte bajo (izquierda) y alto (derecha). ....	42
Figura 2.18: Espectros de Fourier de la señal antes y después de filtro. ....	43

Figura 2.19: Señal de aceleraciones antes y después de filtro.....	43
Figura 2.20: Esquema de la descomposición y reconstrucción de una señal mediante la transformada de Wavelets discreta. ....	44
Figura 2.21: Respuestas calculadas mediante integración trapezoidal del registro de aceleraciones con promedio de valores sustraído. ....	45
Figura 2.22: Desplazamientos calculados mediante integración trapezoidal de las velocidades con promedio de valores sustraído.....	46
Figura 2.23: Desplazamientos calculados con diferentes rangos mediante la transformada de Wavelets discreta. ....	46
Figura 3.1: Vista exterior de la superestructura del CIIFIC.....	48
Figura 3.2: Perfiles de columnas primer y segundo nivel. ....	49
Figura 3.3: Perfiles de columnas niveles superiores. ....	49
Figura 3.4: Perfiles de vigas típicas. ....	49
Figura 3.5 Vista en planta niveles 4, 5, 6 y 7 del CIIFIC.....	50
Figura 3.6: Variación del periodo fundamental a lo largo del proceso constructivo. ....	51
Figura 3.7: Ejemplo de aisladores empleados en el CIIFIC.....	52
Figura 3.8: Sensor ITK-002.....	53
Figura 3.9: Distribución en planta de los sensores.....	54
Figura 3.10: Instalación de los sensores ITK-002. ....	54
Figura 3.11: Esquema de distribución en altura de los sensores y niveles de la estructura vista cara este.....	54
Figura 3.12: Alineamiento de ejes de sensores con los puntos cardinales del sistema de coordenadas UTM. (Vista satelital Google Earth).....	55
Figura 3.13: Diagrama de sistema de comunicación centro de monitoreo local – CISMID.....	55
Figura 4.1: Modelo matemático 3D del CIIFIC. ....	56

Figura 4.2: Modelos de esfuerzos vs deformación unitaria del acero y concreto. ....	57
Figura 4.3: Ensayo cíclico aisladores.....	57
Figura 4.4: Componente Norte–Sur del sismo El Centro de 1940, no escalado. ....	59
Figura 4.5: Procedimiento para el filtrado de señales aplicando la metodología de la transformada de Wavelets.....	60
Figura 4.6: Respuesta de aceleraciones contaminadas en la componente Este-Oeste en unidades de aceleración de la gravedad.....	61
Figura 4.7: Sismo El Centro escalado y sus 11 componentes para cada rango con $\Delta t=0.02$ .....	62
Figura 4.8: Respuesta de aceleraciones alteradas del nivel 4 y sus 11 componentes para cada rango con $\Delta t=0.02$ . ....	63
Figura 4.9: Respuesta de desplazamientos alteradas del nivel 4 y sus 11 componentes para cada rango con $\Delta t=0.02$ . ....	64
Figura 4.10: Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) total y de las 11 componentes del nivel 4. ....	65
Figura 4.11: Espectros de Fourier normalizados respecto al tiempo de la respuesta original y alterada para las 11 componentes de aceleración del nivel 4.....	66
Figura 4.12: Respuesta de desplazamiento original (modelo), respuesta reconstruida con filtro (rango 3+4+5+6+7) y respuesta reconstruida con todos los rangos (sin filtro) para el nivel 4.....	66
Figura 4.13: Diagrama de flujo del procedimiento para la obtención de señales de desplazamientos filtradas mediante la metodología de la transformada de Wavelets.....	67
Figura 4.14: Respuesta de aceleraciones alteradas del nivel 8 y sus 11 componentes para cada rango con $\Delta t=0.02$ . ....	68
Figura 4.15: Respuesta de desplazamientos alterados Nivel 8 y sus 11 componentes para cada rango con $\Delta t=0.02$ .....	69

Figura 4.16: Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) total y de las 11 componentes del nivel 8. ....	69
Figura 4.17: Espectros de Fourier normalizados respecto al tiempo de la respuesta original y alterada para las 11 componentes del nivel 8. ....	70
Figura 4.18: Respuesta de desplazamiento original (modelo), respuesta reconstruida con filtro (rango 4+5+6+7) y respuesta reconstruida con todos los rangos (sin filtro) para el nivel 8.....	70
Figura 4.19: Registro de aceleraciones, espectros de respuesta $S_a$ vs $S_d$ para un factor de amortiguamiento del 5% y espectros de Fourier normalizados respecto al tiempo, del terreno (sensor itk-00) para ambas direcciones principales.....	71
Figura 4.20: Diagrama de flujo para la calibración del modelo.....	72
Figura 4.21: Cortante vs desplazamiento de entre piso en la dirección Norte-Sur para cada nivel. ....	73
Figura 4.22: Cortante vs desplazamiento de entre piso en la dirección Este-Oeste para cada nivel.....	74
Figura 4.23: Registro de aceleraciones del sensor 03 – nivel 4 y sus 8 primeras componentes con $\Delta t=0.01$ en dirección Norte - Sur. ....	75
Figura 4.24: Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) total y de las 11 componentes del sensor 03 correspondiente al nivel 4 en la dirección Norte-Sur. ....	76
Figura 4.25: Espectros de Fourier de aceleraciones del nivel 4 del modelo y de las 8 primeras componentes del sensor 03 en dirección Norte - Sur. ....	77
Figura 4.26: Respuesta de aceleración original (modelo) y respuesta reconstruida con filtro (rango 2+4+5) para el nivel 4 sensor itk-03 dirección Norte-Sur. ....	78
Figura 4.27: Registro de aceleraciones del sensor 03 – nivel 4 y sus 8 primeras componentes con $\Delta t=0.01$ en dirección Este - Oeste.....	79

Figura 4.28: Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) total y de las 11 componentes del sensor 03 correspondiente al nivel 4 en la dirección Este-Oeste. ....	80
Figura 4.29: Espectros de Fourier de aceleraciones del nivel 4 del modelo y de las 8 primeras componentes del sensor 03 en dirección Este – Oeste. ....	80
Figura 4.30: Respuesta de desplazamiento original (modelo) y respuesta reconstruida con filtro (rango 2+4) para el nivel 4 sensor itk-03 dirección Este-Oeste. ....	81
Figura 5.1: Mapa de estaciones acelerográficas. ....	82
Figura 5.2: Espectro de respuesta de sismos sintéticos y espectro de peligro uniforme (EPU), con periodo de retorno de 2475 años, en la dirección a) Norte-Sur y b) Este-Oeste. ....	83
Figura 5.3: Puntos de coordenadas (aceleración en Este-Oeste y Norte-Sur) para los registros sintéticos con periodo de retorno de 2475 años. ....	84
Figura 5.4: Distorsiones máximas de entrepiso a) Norte-Sur y b) Este-Oeste para la respuesta elástica. ....	86
Figura 5.5: Órbitas de las respuestas en desplazamientos de los Niveles 1 y 8 para cada sismo sintético simulado. ....	87
Figura 5.6: Distorsiones máximas de entrepiso a) Norte-Sur y b) Este-Oeste para la respuesta inelástica. ....	90
Figura 5.7: Órbitas de la respuesta del modelo para Pisco 2007 escalado a 1 g de PGA. ....	91
Figura 5.8: Órbitas de la respuesta del modelo para Iquique 2005 escalado a 1 g de PGA. ....	92
Figura 6.1: Diagrama de flujo para la obtención de los parámetros dinámicos participativos de la estructura frente movimientos sísmicos fuertes del terreno. ....	94
Figura 6.2: Órbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Tacna 2010. ....	97
Figura 6.3: Órbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Pisco 2007. ....	97

Figura 6.4: Orbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Huaraz 1970. ....	98
Figura 6.5: Orbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Lima noviembre 1974.....	98
Figura 6.6: Orbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Lima octubre 1974.....	99
Figura 6.7: Orbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Iquique 2005.....	99
Figura 6.8: Orbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Lima 1966.....	100
Figura 6.9: Componentes del desplazamiento residual para la respuesta inelástica correspondiente a Pisco 2007 escalado a 1g de PGA en la dirección Norte-Sur. ....	101
Figura 6.10: Aceleraciones, espectros de respuesta y espectros de Fourier itk-00 del 22/06/2021.....	102
Figura 6.11: Registros de aceleración de los niveles instrumentados. ....	103
Figura 6.12: Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) rangos 1 al 11 de los niveles instrumentados de la estructura para la dirección Norte-Sur con $\Delta t=0.01$ .....	103
Figura 6.13: Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) rangos 1 al 11 de los niveles instrumentados de la estructura. para la dirección Este-Oeste con $\Delta t=0.01$ .....	104
Figura 6.14: Respuestas sísmicas de desplazamientos, relativos a la base, filtrados a partir de los PDP de la estructura para un $\Delta t = 0.01$ . ....	105
Figura 6.15: Diagrama de flujo de la metodología propuesta. ....	107

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

$g_i$	: Coeficientes de detalle
$\tilde{a}_d(t)$	: Aceleraciones corregidas en los desplazamientos
$\tilde{a}_v(t)$	: Aceleraciones corregidas en las velocidades
$c_k^{(j)}$	: Secuencia de coeficientes para $f_i$
$d_k^{(j)}$	: Secuencia de coeficientes para $g_i$
$\sqrt{E[e^2]}$	: Raíz cuadrada de la esperanza de los errores cuadráticos (gals)
$\Psi_{(w)}$	: Transformada de Fourier de la función wavelet madre
$\Delta d_i$	: Desplazamiento relativo del entrepiso $i$
$f'_c$	: Esfuerzo de compresión del concreto ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )
$f_H$	: Frecuencia de corte alto (Hz)
$f_i$	: Coeficientes de aproximación
$f_L$	: Frecuencia de corte bajo (Hz)
$f_{s,i}$	: Frecuencia de Nyquist
$f_y$	: Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo ( $\text{Kg}/\text{cm}^2$ )
$GB_{(f)}$	: Ganancias del filtro pasa banda
$GH_{(f)}$	: Ganancias del filtro de corte alto
$GL_{(f)}$	: Ganancias del filtro de corte bajo
$K_d$	: Rigidez secundaria del aislador
$K_u$	: Rigidez inicial del aislador
$M_w$	: Momento magnitud
$p_d(t)$	: Línea de tendencia de los desplazamientos
$p_v(t)$	: Línea de tendencia de las velocidades
$Q_d$	: Fuerza de fluencia del aislador
$W_{a,b}$	: Coeficientes de la transformada de wavelets
$x_s(n)$	: Señal suavizada
$\beta_{eff}$	: Amortiguamiento efectivo del aislador
$\Psi_{(t)}$	: Wavelet madre
$F_y$	: Fluencia del núcleo de plomo del aislador
$K_{eff}$	: Rigidez efectiva del aislador

$K_v$	: Rigidez vertical del aislador
$P_i$	: Carga de gravedad total para el piso $i$
$V_i$	: Fuerza cortante lateral total calculada para el piso $i$
$h_{ei}$	: Altura del entrepiso $i$
$\sigma^2$	: Desviación estándar
$\Delta$	: Distorsiones máximas de entrepiso
$\Delta_{picos}(\%)$	: Diferencia porcentual entre picos máximos
$\Delta t$	: Intervalo de tiempo de muestreo
$a$	: Factor de escalamiento de la transformada de Wavelets
$a(t)$	: Señal de aceleraciones
ADNL	: Análisis Dinámico no Lineal
ASCE	: American Society of Civil Engineers
ATC	: Applied Technology Council
$b$	: Factor de traslación lateral de la transformada de Wavelets
CIIFIC	: Centro de Información e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil
CISMID	: Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres
CWT	: Continuous Wavelets Transform (Transformada de Wavelets Continua)
$d(t)$	: Señal de desplazamientos
$e(n)$	: Ruido contenido en una señal
E031	: Norma de Aislamiento Sísmico del Reglamento Nacional de Edificaciones
EPU	: Espectro de Peligro Uniforme
$f$	: Frecuencia (Hz)
$f(t)$	: Función integrable dependiente del tiempo
FFT	: Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
FIC	: Facultad de Ingeniería Civil
IFFT	: Inverse Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier Inversa)
ITK-002	: Modelo de los acelerómetros
LRB	: Lead Rubber Bearing (Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo)

NGA	: Nex Generation Attenuation
PDP	: Parámetros Dinámicos Participativos
PEER	: Pacific Earthquake Engineering Research Center
PGA	: Pak Ground Acceleration (Máxima Aceleración del Suelo)
R	: Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas
REMOED	: Red de Monitoreo de Edificaciones
RNE	: Reglamento Nacional de edificaciones
SHM	: Structural Health Monitoring (Monitoreo de la Salud Estructural)
t	: Tiempo (s)
TCP	: Transmission Control Protocol (Protocolo de Control de Transmisión)
U	: Factor de uso
UDP	: User Datagram Protocol (Protocolo de Datagramas de Usuario)
UNI	: Universidad Nacional de Ingeniería
UTC	: Universal Time Coordinated (Tiempo Universal Coordinado)
UTM	: Universal Transversal Mercator (Sistemas de coordenadas Universal Transversal de Mercator)
UTP	: Unshielded Twisted Pair (Par Trenzado no Blindado)
v(t)	: Señal de Velocidades
VPN	: Virtual Private Network (Red Privada Virtual)
w(n)	: Ventana Parzen
WT	: Wavelets Transform (Transformada de Wavelets)
x[n]	: Señal de tiempo discreto
X(f)	: Señal continua en el dominio de la frecuencia (Transformada de Fourier de x(t))
x(t)	: Señal continua en el dominio del tiempo
$\beta$	: Parámetro beta para la integración numérica por el método de Newmark
$\gamma$	: Parámetro gamma para la integración numérica por el método de Newmark
$\mu$	: Esperanza o media
$\phi(x)$	: Función de escalamiento
$\omega$	: Frecuencia angular
A	: Factor de categoría de la edificación

S : Factor de amplificación del suelo  
Z : Factor de zona

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

#### 1.1.1 Antecedentes referenciales

El monitoreo de la salud estructural o *Structural Health Monitoring* (SHM por sus siglas en inglés), es un proceso que implementa una estrategia de detección de daños a nivel estructural, donde se utilizan varios algoritmos que han sido desarrollados en las últimas décadas considerando a la transformada de Wavelets como un método eficiente para el procesamiento de señales que permite la identificación de las propiedades modales y detectar los niveles de daños en las estructuras monitoreadas (Kankanamge et al., 2020).

El desarrollo de un sistema de evaluación de la capacidad sísmica residual se da a través de la obtención de las aceleraciones absolutas medidas a partir de acelerómetros colocados en una edificación, luego los desplazamientos se obtienen a partir del cálculo de la doble integración de estas aceleraciones. Para eliminar el efecto del error contenido en las aceleraciones medidas, la transformada de Wavelets es aplicada para la descomposición de las aceleraciones en varias componentes con determinadas bandas de frecuencias en el dominio temporal. Las componentes que están asociadas a bandas de frecuencias bajas son consideradas como componentes de error y por lo tanto son eliminadas (Kusunoki, 2017).

El SHM basado en la medición de vibraciones, se utiliza como una de las herramientas para determinar la presencia de daños, su ubicación, magnitud y pronóstico de la vida útil restante de la estructura. La base fundamental de las técnicas de detección de daños es que este induce cambios en las propiedades físicas y dinámicas de las estructuras, por lo que se podría intuir que el daño se puede detectar evaluando los cambios en la respuesta de las vibraciones de las edificaciones (Patel et al., 2016).

El SHM es un sistema que comprende instrumentos de detección y otros sistemas auxiliares, que pueden proporcionar información relativa respecto a la condición de la estructura, lo cual permite la evaluación de la seguridad e integridad de los sistemas estructurales, por lo que se necesita un método que permita una rápida inspección después de ocurrido un gran terremoto y aprovechar la disponibilidad de la red de monitoreo de la edificación, aplicando un juicio uniforme en la

evaluación de las condiciones estructurales y anticipar si los edificios pueden resistir las posteriores réplicas (Díaz et al., 2014).

El SHM de estructuras y la estimación del daño luego de ocurrido un evento sísmico, requiere la respuesta de desplazamientos producidos, así como las fuerzas que usualmente son registradas como aceleraciones absolutas a través de la instrumentación de sensores de aceleración. Si el desplazamiento puede ser medido, entonces la relación fuerza desplazamiento puede ser obtenida, así el daño puede ser estimado a partir de esta relación. Según esto se utiliza la transformada de Wavelets para descomponer una señal en componentes de ciertas frecuencias en el dominio temporal, por lo tanto, cualquier componente de cualquier frecuencia puede ser despreciada del cálculo integral sin afectar el cálculo con el resto de las componentes (Kusunoki, 2005a).

En base a las investigaciones mencionadas, se argumenta que el método de la transformada de Wavelets es ampliamente utilizado en el mundo dentro del campo del procesamiento de señales, teniendo como principal atractivo el desarrollo de sistemas de Monitoreo de la Salud Estructural, por lo que en esta investigación se utilizará el sistema de monitoreo del Centro de Información e Investigación (CIIFIC) de la Facultad de Ingeniería Civil (FIC) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), edificación aislada perteneciente a la Red de Monitoreo de Edificaciones (REMOED) del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID), la cual viene siendo monitoreada desde octubre del 2016. Mediante un modelo matemático, la edificación será sometida a simulaciones tiempo historia de eventos sísmicos peruanos ajustados a niveles de peligro característicos del suelo de Lima, para la determinación de los “Parámetros Dinámicos Participativos”, que ahora en adelante llamaremos PDP, de la estructura obtenidos a partir de la aplicación de la transformada de Wavelets ante movimientos fuertes del terreno. Dado esto se tendrá una metodología para generar una mejor aproximación de la respuesta dinámica de la estructura ante futuros eventos sísmicos extraordinarios.

## 1.2 PROBLEMÁTICA

Los recientes mega terremotos acontecidos en Sumatra 2004, de momento-magnitud  $9.2 M_w$ , Chile 2010 de  $8.8 M_w$  y Japón 2011 de  $9.0 M_w$ , han destacado el enorme peligro asociado con estos mega eventos en las zonas de subducción. En el caso de Perú, en la zona central al norte de la Cordillera de Nazca, ha sido repetidamente afectada por grandes terremotos tales como el gran evento de entre  $8.6$  y  $9.2 M_w$  sucedido el 28 de octubre de 1746, que fue reportado como el mayor y peor terremoto de subducción que la ciudad de Lima ha experimentado desde su fundación, dejando un total de 1300 personas fallecidas. Posteriormente siguió un tsunami que azotó las costas dejando unos 3800 muertos en el Callao. Luego de este terremoto hubo un largo periodo de silencio sísmico hasta el inicio de una secuencia de terremotos de entre  $7.0$  y  $8.0 M_w$  durante el siglo XX en los años 1940, 1966, 1974 y 2007 (Carcelén et al., 2020) & (Pulido et al., 2015).

En un desastre por terremoto que cubre una amplia región como el gran terremoto del este de Japón en el 2011, el estado de las edificaciones del centro de control de emergencias en la región oriental de la prefectura de Aichi en Japón permanece desconocido durante un tiempo luego de sucedido el evento. Esto genera un problema nacional en la planificación ante emergencias, ya que las instalaciones centrales deben continuar en operación para brindar asistencia de forma efectiva. Sin embargo, la toma de decisión de retomar las operaciones de los centros son llevadas a cabo por personal administrativo que no son necesariamente expertos en terremotos (Hayashi et al., 2019).

Cuando un sismo catastrófico sucede, se necesita evaluar el nivel de daño de las edificaciones con el fin de prever la pérdida de vidas humanas que serían causadas por el colapso de la estructura si en caso ocurriera una réplica. En el terremoto de Kobe (Japón 1995) se vio que las personas evacuaron de sus hogares por temor al daño causado a pesar de que este no fuera tan grave. Al hacer una inspección visual de las edificaciones dañadas se necesita demasiado tiempo y personal técnico para revisar cada componente estructural, lo que conlleva a un aumento en la suspensión de las actividades en la edificación por lo que el desarrollo de un sistema de evaluación rápida del daño a través del monitoreo mediante sensores de aceleración en las estructuras es indispensable para superar estos problemas (Kusunoki, 2017).

El 27 de febrero del 2010 se registró el sexto terremoto de mayor magnitud en el mundo, el cual afectó gran parte del centro de Chile donde más de 1500 edificios, puentes y presas sufrieron fuertes sacudidas. La revisión de los daños perpetrados requirió más de un mes, conllevando una alta presión social y política. Una de las edificaciones instrumentadas contaba con un sistema de monitoreo remoto continuo, lo cual permitió determinar el nivel de cambio en las propiedades dinámicas de la estructura en menos de 10 minutos (Boroschek et al., 2014).

Las experiencias recientes ante eventos sísmicos en el Perú y alrededor del mundo, han evidenciado el importante grado de vulnerabilidad de las edificaciones esenciales, debido a que gran cantidad de estas han colapsado ya sea estructural o funcionalmente dejándolas incapacitadas para el objetivo de brindar refugio y asistencias durante y después de un evento sísmico desastroso (Camacho, 2011).

Es sabido que las aceleraciones medidas contienen componentes de error en las señales, los cuales surgen de la no linealidad de los instrumentos y el ruido ambiental. Estos errores por lo general son muy pequeños, pero al momento de producir el cálculo de la doble integración, el efecto puede verse aumentado drásticamente en la obtención de los desplazamientos. Se han propuesto muchos métodos para eliminar el error intrínseco, como la corrección por línea base o el filtrado pasa banda del espectro de Fourier. Generalmente el periodo fundamental del desplazamiento calculado a partir de la señal sin filtrar suele ser muy largo por lo que el filtro pasa banda puede parecer un método adecuado, sin embargo, dado a que el espectro de Fourier se obtiene a partir de las aceleraciones registradas y que las frecuencias fundamentales de la estructura pueden variar debido al daño, es muy difícil eliminar la componente de error, incluso se puede llegar a eliminar los desplazamientos residuales, por lo que ninguno de estos métodos pueden eliminar de forma automática y precisa el error (Kusunoki, 2005a).

En conclusión, se tiene que el Perú es un país con una alta vulnerabilidad sísmica y que está bajo la constante amenaza de un evento catastrófico debido al silencio sísmico que se viene manteniendo hasta la actualidad de esta investigación. Esto se ve agravado por la escasez de sistemas de monitoreo en las edificaciones esenciales a nivel nacional. Si bien el CIIFIC posee un sistema de monitoreo al formar parte de REMOED, se tiene como problemática principal que no se ha planteado una metodología que permita determinar la respuesta sísmica de la estructura de forma confiable, ya que los parámetros dinámicos participativos

(PDP) de la estructura, que se deben determinar para el proceso de eliminación del error en la respuesta mediante la transformada de Wavelets, son variables debido a la naturaleza compleja de los sismos y a los propios sistemas estructurales, lo que genera una elección subjetiva de dichos parámetros en base a las propiedades físicas y dinámicas de la estructura, así como la magnitud y contenido de frecuencias de las aceleraciones del terreno generadas por dichos eventos extraordinarios.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Determinar la respuesta sísmica frente a movimientos fuertes del terreno de una edificación aislada mediante el monitoreo de la salud estructural, tomando como base de observación las vibraciones del CIIFIC por medio de la Red de Monitoreo de Edificaciones del CISMID-FIC-UNI y las respuestas sintéticas obtenidas a partir de un modelo matemático calibrado.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

- Recopilar registros de aceleración del CIIFIC existentes en la base de datos del CISMID-FIC-UNI.
- Construir un modelo matemático que pueda representar la incursión de la estructura en el rango no lineal frente a un evento sísmico extraordinario.
- Implementar la transformada de Wavelets en el análisis de las vibraciones de la estructura.
- Construir respuestas sísmicas sintéticas de la estructura a partir de análisis tiempo historia utilizando eventos sísmicos históricos peruanos escalados.
- Determinar que los niveles de distorsión obtenidos por la respuesta sísmica sintética estén por debajo de los límites máximos permisibles dictados por la norma peruana y otras literaturas.
- Determinar los parámetros dinámicos participativos (PDP) de la respuesta sísmica que han de utilizarse en el análisis de la estructura a través de la transformada de Wavelets.
- Proponer una metodología aplicada a la determinación de la respuesta sísmica y detección de daño del CIIFIC y edificaciones en general frente a movimientos sísmicos fuertes.

## **1.4 HIPÓTESIS**

### **1.4.1 Hipótesis general**

Mediante el análisis de vibraciones y el monitoreo de la salud estructural, será posible definir los parámetros dinámicos participativos para la determinación de la respuesta sísmica de una edificación aislada, tomando como base de observación el CIIFIC por medio de la Red de Monitoreo de Edificaciones del CISMID-FIC-UNI, con lo cual se logrará una mejor aproximación de la respuesta sísmica a través de la aplicación de la transformada de Wavelets frente a movimientos sísmicos fuertes.

### **1.4.2 Hipótesis específicas**

- La respuesta dinámica de la superestructura del CIIFC, obtenida mediante su modelo matemático, permanecerá lineal elástica sin presencia de daño estructural frente a movimientos sísmicos fuertes.
- Los parámetros dinámicos participativos (PDP) del CIIFIC y de edificaciones en general son dependientes de las propiedades dinámicas de la estructura.
- El filtrado de la respuesta dinámica del CIIFIC mediante el uso de la transformada de Wavelets es efectivo para la determinación de los desplazamientos a partir de las aceleraciones registradas.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 CONCEPTOS PRELIMINARES

#### 2.1.1 Monitoreo de la salud estructural

El monitoreo de la salud estructural es una estrategia que implementa métodos no destructivos para la detección, localización y determinación de la magnitud del daño en sistemas estructurales basado en la medición de vibraciones obtenidas a partir de sensores de aceleración ubicados estratégicamente mediante un sistema de adquisición de datos remoto y en tiempo real que permite la evaluación de la seguridad e integridad estructural en edificaciones, con lo cual se reduce costos de evaluación y tiempos de alerta. Estos métodos se basan en el cambio de las propiedades físicas y dinámicas de las estructuras a partir de la obtención los desplazamientos producidos, así como las fuerzas que son registradas por los sensores como aceleraciones absolutas por lo que, al conocerse la relación fuerza–desplazamiento, es posible determinar y localizar el daño.

#### 2.1.2 Sensores de vibración

El fenómeno de magnetorresistencia gigante o GMR (por sus siglas en inglés) se da por el cambio drástico en la resistividad de los materiales magnéticos cuando se ve alterado el campo magnético a su alrededor, esto puede ser medido mediante los cambios de los valores de resistencia o voltaje. Este efecto es aplicado en el desarrollo de sensores con la capacidad de medir desplazamiento, velocidad, aceleración, velocidad angular, etc.

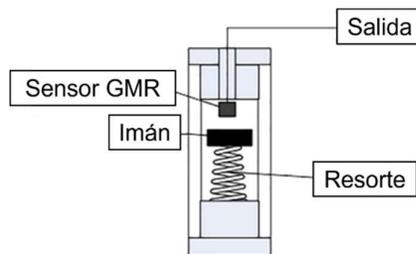


Figura 2.1 Diagrama esquemático de un sensor de vibraciones basado en GMR.  
Fuente: Adaptado de (Gao et al., 2019)

#### 2.1.3 Aislador

Según la (NT E031, 2019) un aislador es un elemento estructural del sistema de aislamiento sísmico que es verticalmente rígido y horizontalmente flexible, y que permite grandes deformaciones laterales bajo sollicitaciones sísmicas.

### 2.1.4 Procesamiento de señales

Las señales o registros de aceleración son generalmente medidas o grabadas usando acelerómetros, y sus correspondientes registros tiempo historia de la velocidad y desplazamiento son obtenidos mediante su integración numérica, sin embargo, estos valores son difíciles de obtener con precisión dado que estos instrumentos de medición son imperfectos y añaden una componente de error a la señal que surge por la no linealidad de los sensores, el ruido ambiental, entre otros factores. Estos errores son generalmente muy pequeños, pero al efectuarse la doble integración, el efecto del error puede incrementarse drásticamente. Por lo tanto, son necesarios algoritmos que eliminen estos errores para lograr desplazamientos razonables a partir de las aceleraciones medidas.

### 2.1.5 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier es una herramienta matemática que permite expresar una función como una suma de componentes periódicas que corresponden al contenido de frecuencias de la señal, lográndose así una transformación de la señal del dominio del tiempo al de la frecuencia. Entonces, la transformada de Fourier " $X(f)$ " de una señal " $x(t)$ " que es función del tiempo " $t$ ", traslada la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia " $f$ ". Esta transformación es reversible, por lo que  $X(f)$  puede transformarse en  $x(t)$  teniéndose así la capacidad de pasar a cualquiera de los dos dominios. Las ecuaciones (2.1) y (2.2) son conocidas como la transformada y la transformada inversa de Fourier respectivamente (Bendat & Piersol, 2010).

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

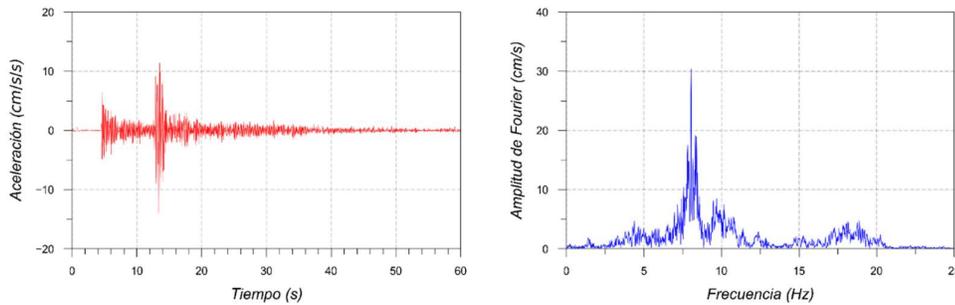
$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{i2\pi ft} df \quad (2.2)$$

En el caso de señales discretas de duración finita, la transformada y la transformada inversa de Fourier están dadas por las ecuaciones (2.3) y (2.4) respectivamente. (Kashima, 2016) y (Cooley et al., 1969).

$$X_{[k]} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_{[j]} e^{-i\left(\frac{2\pi}{N}\right)kj}, \quad (k = 0, 1, \dots, N - 1) \quad (2.3)$$

$$x[j] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{i\left(\frac{2\pi}{N}\right)kj}, \quad (j = 0, 1, \dots, N-1) \quad (2.4)$$

Existe un algoritmo eficiente que implementa una ventaja significativa tratándose de velocidad tiempo de cómputo a la hora de calcular las transformadas discretas de Fourier llamada la Transformada Rápida de Fourier o *Fast Fourier Transform* (FFT) y su respectiva inversa (IFFT). Este algoritmo, descrito por (Cooley et al., 1969), tiene una gran cantidad de aplicaciones en el campo de la ingeniería para el tratamiento tanto de señales análogas como digitales y es el cual se utiliza en esta investigación. La gráfica de la transformada de Fourier es llamada Espectro de Fourier, el cual muestra el contenido de frecuencias de una señal, versus una de las componentes de la transformación, parte real o imaginaria o la amplitud de las anteriores. En la Figura 2.2b puede observarse picos que indican que frecuencias son predominantes en un determinado rango y pueden interpretarse como puntos de resonancia para el caso de un sistema estructural.



a) Tiempo historia de aceleraciones

b) Espectro de Fourier de la señal

Figura 2.2 Transformada rápida de Fourier normalizada respecto al tiempo para un registro de aceleraciones.

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.6 Convolución de señales discretas

Para dos señales de tiempo discreto  $x[n]$  y  $v[n]$ , siendo  $x[n] = 0$  y  $v[n] = 0$  para todo entero  $n < 0$ , la convolución estas dos señales se define mediante la ecuación (2.5) (Kamen & Heck, 2008).

$$x[n] * v[n] = \sum_{i=0}^n x[i] v[n-i], \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (2.5)$$

Una manera más eficiente de lograr la convolución de dos señales de tiempo discreto es mediante una de las propiedades de la transformada de Fourier que la relaciona con la convolución. Entonces, sean las dos señales  $x(t)$ ,  $v(t)$  y sus respectivas transformadas de Fourier  $X(f)$  y  $V(f)$ , la transformada de Fourier de la convolución  $x(t) * v(t)$  es igual al producto de  $X(f)V(f)$ , lo que indica que la convolución en el dominio del tiempo corresponde a la multiplicación en el dominio de la frecuencia, esta propiedad da como resultado el par de transformación mostrado en la ecuación (2.6). Así, la convolución  $x(t) * v(t)$  puede ser calculada tomando la transformada inversa de Fourier al producto  $X(f)V(f)$ .

$$x(t) * v(t) \leftrightarrow X(f)V(f) \quad (2.6)$$

### 2.1.7 Ventanas Parzen

Una Ventana Parzen " $w(n)$ " es una estimación de una función de densidad de probabilidad definida por (Parzen, 1961), que puede representarse mediante la ecuación (2.7).

$$w(n) = \begin{cases} 1 - 6u^2 + 6|u|^3, & |u| < 1/2 \\ 2(1 - |u|)^3, & 1/2 \leq |u| \leq 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

Donde  $u = 2n/(N - 1)$  y  $N$  es el ancho o longitud de la ventana Parzen, siendo  $n$  definido entre los límites  $-(N - 1)/2 \leq n \leq (N - 1)/2$  y  $n_{i+1} = n_i + 1$ . La Figura 2.3 muestra ventanas Parzen para diferentes anchos  $N = 15, 25$  y  $100$ .

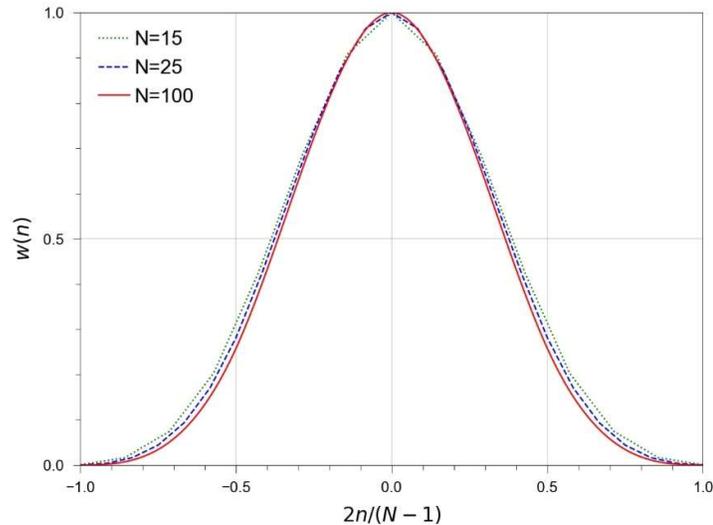


Figura 2.3 Estimación de densidad de probabilidad mediante ventanas Parzen.  
Fuente: Elaboración propia

### 2.1.8 Suavizado de señales (Smoothing)

El suavizado o *smoothing*, es la forma en la que enfocamos patrones importantes de los datos de una señal, eliminando aquellos que no lo son (es decir, eliminando el ruido), con el objetivo de producir cambios lentos en los valores de la señal para que sea más sencillo ver las tendencias en los datos de esta. Entonces si se tiene una señal discreta  $x(n)$  (no necesariamente función del tiempo) con ruido aditivo de la siguiente manera:

$$x(n) = x_s(n) + e(n) \quad (2.8)$$

donde  $x_s(n)$  es la parte suave o sin ruido y  $e(n)$  es la parte ruidosa, lo que se hace es minimizar esta parte a través del promedio de una cierta cantidad de puntos de  $x(n)$  alrededor de un punto “ $i$ ”, al hacer esto  $e(n)$  se reduce en gran medida dado a que el ruido se aproxima a una variable aleatoria uniforme alrededor de cero. Este proceso se puede mejorar haciendo un promedio ponderado donde los pesos de ponderación pueden ser una ventana de estimación de densidad de probabilidad como la ventana de Parzen. Esta forma de suavización se logra mediante la convolución de la señal y la ventana de estimación normalizada. Entonces para una señal  $x(n)$  y una ventana  $w(n)$  de tamaño  $N$ , la señal suavizada  $x_s(n)$  queda definida por la ecuación (2.9), donde  $\sum w_n$  representa la suma de los elementos de la ventana, siendo el suavizado mayor a medida que el valor de  $N$  se torna más grande. La Figura 2.4 muestra el suavizado de la gráfica del Espectro de Fourier correspondiente a la señal de un registro de aceleraciones para unas longitudes de ventana  $N = 20, 50$  y  $100$ .

$$x_s(n) \cong x(n) * w(n) / \sum w_n \quad (2.9)$$

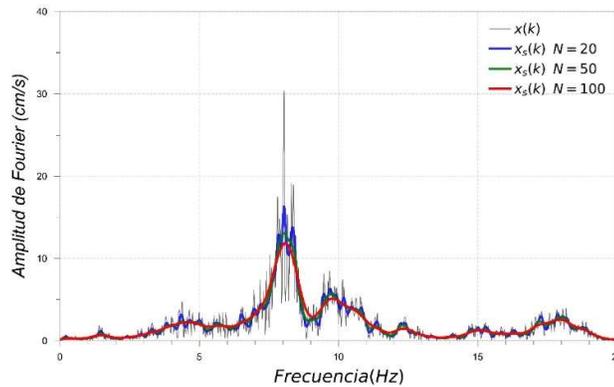


Figura 2.4 Suavizado de un espectro de Fourier para diferentes longitudes de ventanas Parzen.  
Fuente: Elaboración propia

### 2.1.9 Integración numérica

Para analizar la respuesta dinámica de estructuras sujetas a perturbaciones irregulares tales como terremotos, los métodos de integración numérica son convenientemente usados en la determinación de la solución a través de sucesivas integraciones a la ecuación que gobierna el movimiento en cada pequeño intervalo de tiempo (Shibata, 2010).

#### 2.1.9.1 Método de Newmark

Newmark desarrollo en 1959 una familia de métodos asumiendo diferentes patrones para la variación de la aceleración, los cuales han sido ampliamente utilizados en el análisis de la respuesta ante terremotos a través de fórmulas que son expresadas en términos de los parámetros  $\gamma$  y  $\beta$ , los cuales definen la variación de la aceleración y determinan la estabilidad y precisión del método. Estas fórmulas son unificadas bajo el nombre de métodos  $\beta$  de Newmark, siendo el método de la aceleración promedio constante definido para los valores de  $\gamma = \frac{1}{2}$  y  $\beta = \frac{1}{4}$  (Chopra, 2007).

#### 2.1.9.2 Método de integración en el dominio de la frecuencia

La integración de una señal también puede efectuarse en el dominio de la frecuencia mediante el uso de la transformada de Fourier de la siguiente manera.

$$V(f) = A(f)/i2\pi f \quad (2.10)$$

$$D(f) = -A(f)/(i2\pi f)^2 \quad (2.11)$$

Donde  $A(f)$ ,  $V(f)$  y  $D(f)$  son las transformadas de Fourier de la aceleración  $a(t)$ , velocidad  $v(t)$  y desplazamiento  $d(t)$  respectivamente, siendo  $i$  la unidad imaginaria ( $i = \sqrt{-1}$ ) y  $f$  el dominio de la frecuencia.

Luego los tiempos historia de velocidad  $v(t)$  y desplazamiento  $d(t)$  son calculados mediante las transformadas inversas de Fourier de  $V(f)$  y  $D(f)$  obtenidos en las ecuaciones (2.10) y (2.11) respectivamente (Kashima, 2016).

### 2.1.10 Análisis dinámico no lineal

El análisis dinámico no lineal (ADNL) o análisis tiempo historia es un método analítico que se basa en principios sólidos para simular de forma precisa el comportamiento dinámico intrínseco inelástico de estructuras sujetas a grandes

niveles de excitación sísmica. Es una herramienta muy poderosa y compleja que puede conllevar a mucho tiempo de cómputo, dependiendo de la elección del intervalo de tiempo de integración, del esquema de integración, de la estrategia del algoritmo iterativo incremental y del tamaño de la malla, por lo que un equilibrio óptimo de todos estos factores permitirá generar soluciones precisas con relativo poco esfuerzo computacional (Pinho, 2007).

### 2.1.11 Sistemas de aislamiento sísmico

Los sistemas de aislamiento sísmico son mecanismos empleados en edificaciones para reducir la respuesta de aceleración o desplazamiento y así mitigar la extensión de daños causados por movimientos sísmicos del suelo y excitaciones eólicas. Esta tecnología emplea elementos flexibles como el caucho y mecanismo deslizantes o de rodamiento que suelen ir integrados con amortiguadores para la absorción de energía y reducción de la respuesta estructural, esto da la posibilidad de reducir el tamaño de los elementos estructurales y mejorar la funcionalidad de un edificio luego de un terremoto. El concepto básico de los sistemas de aislamiento es aumentar el amortiguamiento y proveer de periodos naturales más largos a la estructura, con esto se logra disminuir la probabilidad de que la estructura entre en resonancia ya que los movimientos sísmicos del suelo cuentan con componentes de periodos relativamente cortos (Higashino & Okamoto, 2006). Cabe mencionar que los sistemas de aislamiento son más eficientes para suelos rígidos, los cuales tienen periodos fundamentales más cortos respecto a suelos flexibles, por lo que las aceleraciones ejercidas sobre la estructura serán reducidas en mayor medida para este tipo de suelos en comparación a los suelos flexibles.

#### 2.1.11.1 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo

Los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo o *lead rubber bearing (LRB)* son dispositivos de aislamiento sísmico compuestos de múltiples capas de materiales elastoméricos y vulcanizados de caucho que otorgan flexibilidad lateral, y reforzados con planchas de acero las cuales proporcionan rigidez vertical al elemento, además poseen un núcleo de plomo que incrementa el nivel de energía disipada. Este sistema puede ser representado mediante un modelo cíclico de histéresis denominado bilineal como se muestra en la Figura 2.6. Los parámetros del modelo son la rigidez inicial  $K_u$ , la rigidez secundaria  $K_d$  y la fuerza de fluencia  $Q_d$  (Higashino & Okamoto, 2006).

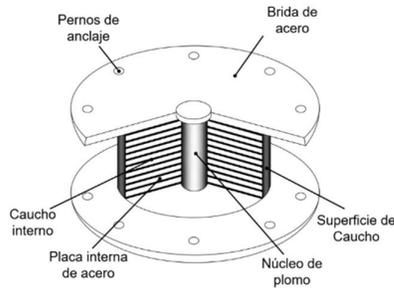


Figura 2.5 Aisladores LRB.

Fuente: Adaptado de (Higashino & Okamoto, 2006)

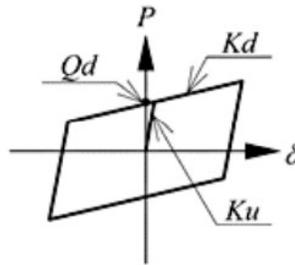


Figura 2.6 Modelo de histéresis de un LRB.

Fuente: Tomado de (Higashino & Okamoto, 2006)

## 2.1.12 Escalamiento de registros sísmicos

### 2.1.12.1 Registros sintéticos

Para realizar un análisis dinámico no lineal tiempo historia se recomienda utilizar registros sísmicos reales que cumplan con ciertos requisitos de amplitud de aceleraciones y contenidos de frecuencias de la zona en estudio, quedando así establecida la demanda sísmica sujeta a la estructura en análisis. Debido a que no siempre se tiene registros sísmicos que cumplan con dichos requisitos, alternativamente se utilizan registros generados artificialmente (registros sintéticos) a través procedimientos numéricos en base a un modelo objetivo equivalente al de la zona en estudio (Orellana & Parra, 2017).

### 2.1.12.2 Escalamiento

El escalamiento de registros sísmicos es un procedimiento para la obtención de registros sintéticos a partir de registros reales. Este procedimiento consiste en hacer que el espectro de pseudo aceleraciones del registro real se asemeje a un espectro objetivo característico a través de sucesivas iteraciones, lográndose trasladar las características del registro sísmico en un determinado lugar a como si hubiera ocurrido en la zona de estudio bajo sus requerimientos de amplitud,

contenido de frecuencias, etc. Existen diferentes métodos para escalar acelerogramas haciendo que estos tengan una correspondencia más cercana con un espectro de respuesta objetivo. Mukherjee y Gupta en (Mukherjee & Gupta, 2002a) y (Mukherjee & Gupta, 2002b) emplean la transformada de Wavelets (ver Sección 2.2) para descomponer registros originales de aceleración tiempo historia en un número finito de series de tiempo, cada una con energía en bandas de frecuencias no superpuestas a través de un procedimiento iterativo que es utilizado para escalar cada serie de tiempo tal que cuando estas son añadidas juntas producen un espectro compatible al movimiento del terreno objetivo (Hancock et al., 2006).

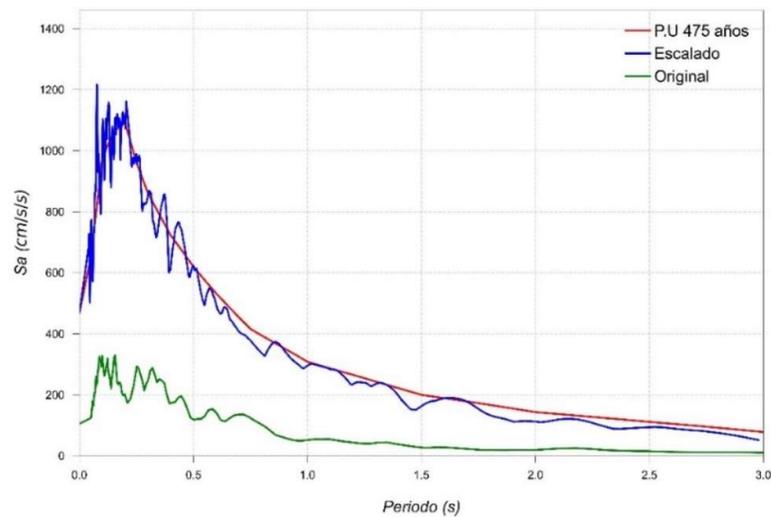


Figura 2.7 Escalamiento de registro sísmico a un espectro de peligro uniforme (EPU) de 475 años de periodo de retorno.

Fuente: Elaboración propia

## 2.2 LA TRANSFORMADA DE WAVELETS

La transformada de Wavelets o *Wavelets Transform (WT)* es un método de análisis basado en ondas de duración finita llamadas Wavelets, que tienen como característica principal que el promedio de sus valores es igual a cero. De manera análoga a la transformada de Fourier, que se basa en la similitud existente entre una señal y ondas sinusoidales de diferentes frecuencias y duración ilimitada al extenderse de menos a más infinito, la transformada de Wavelets es un método más generalizado que compara una señal en versiones escaladas y desplazadas de la wavelet madre la cual tiende a ser irregular y asimétrica, por lo que una señal física real no estacionaria (de naturaleza compleja y cambios abruptos) puede ser analizada de mejor forma que con una senoide suave y regular.

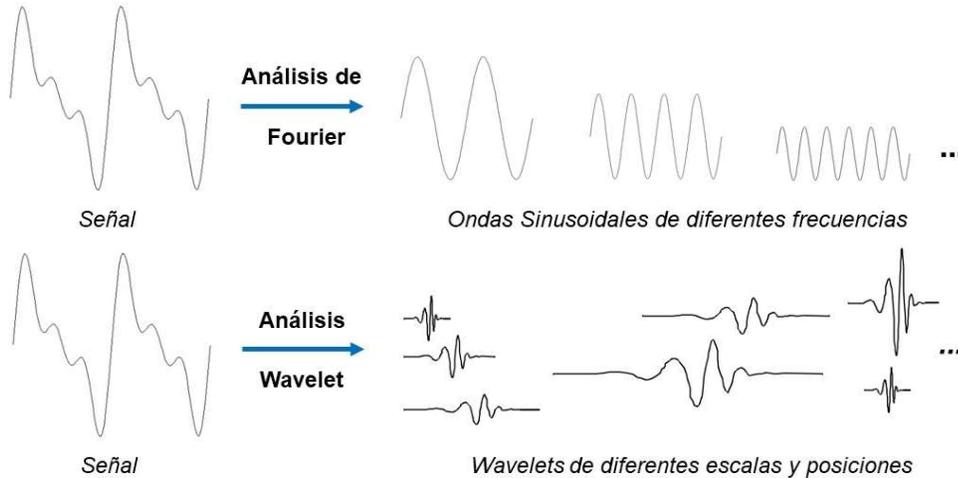


Figura 2.8 Comparación entre el análisis de Fourier y análisis Wavelets.  
Fuente: Adaptado de (Mathworks, 2017)

La teoría básica de la transformada de Wavelets es expuesta por el Dr. Koichi Kusunoki en (Kusunoki, 2005a) y (Kusunoki, 2005b).

### 2.2.1 La transformada de Wavelets continua

Sea  $f(t)$  una función integrable dependiente del tiempo " $t$ ", la transformada de Wavelets continua o *Continuous Wavelets Transform (CWT)* de  $f(t)$  es definida por (Daubechies, 1992) como

$$W_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (2.12)$$

La porción  $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) f(t) dt$ , de la ecuación (2.12) indica que tan similar es la señal  $f(t)$  a la función  $\psi \left( \frac{t-b}{a} \right)$  alrededor del instante de tiempo  $t = b$ , donde  $\psi(t)$  es la función wavelet o wavelet madre,  $*$  denota su conjugada compleja, " $a$ " representa el factor de escalamiento y " $b$ " el factor de traslación lateral. Un alto valor de " $a$ " representa una wavelet de frecuencia baja, mientras que un bajo valor de " $a$ " corresponde a una wavelet de alta frecuencia, así " $a$ " es un factor de frecuencia. El factor " $b$ " determina la traslación de la wavelet en el eje del tiempo y que zona local en la serie de tiempo de la señal se está analizando, así " $b$ " es un factor de tiempo (Takanami & Kitagawa, 2003). Las figuras Figura 2.9 y Figura 2.10 muestran una descripción gráfica de estos dos parámetros.



Figura 2.9 Esquematización del factor de escalamiento "a".  
Fuente: Adaptado de (Mathworks, 2017)

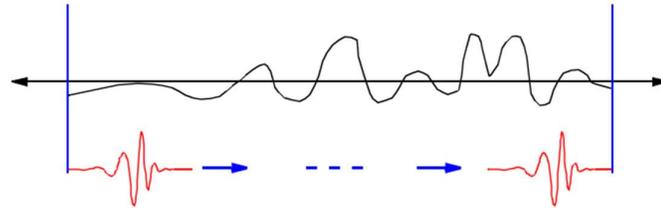


Figura 2.10 Esquematización del factor de traslación "b".  
Fuente: Adaptado de (Mathworks, 2017)

Los coeficientes de la transformada continua de wavelets  $W_{a,b}$  son el resultado de la suma de productos de la ecuación (2.12), que indican la correlación entre la señal y la función wavelet  $\psi(t)$  para sus diferentes escalas y en diferentes secciones de la señal. La señal original  $f(t)$  puede ser reconstruida (devuelta al dominio del tiempo) mediante la inversa de la transformada de Wavelets (Daubechies, 1992).

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \iint_{R^2} W_{a,b} \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{da \cdot db}{a^2} \quad (2.13)$$

Donde se debe cumplir la siguiente condición de admisibilidad

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (2.14)$$

O en su defecto  $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$ , además en la ecuación (2.14)  $\hat{\psi}(\omega)$  representa la transformada de Fourier de la función wavelet  $\psi(t)$  en función de la frecuencia angular  $\omega$  y es dada por

$$\hat{\psi}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i\omega t} dt \quad (2.15)$$

Dados los coeficientes de la transformada de Wavelets  $W_{a,b}$  para una señal  $f(t)$  proveniente de un registro de acelerogramas de un movimiento sísmico, esta puede ser representada en su forma escalogramétrica como función de dos dimensiones tiempo-escala o tiempo-frecuencia. El eje horizontal representa el tiempo o parámetro de traslación " $b$ ", el eje vertical representa la frecuencia o el parámetro de escalamiento " $a$ " y la magnitud de los coeficientes  $W_{a,b}$  para los puntos  $(a, b)$  son representado mediante una gradiente de colores en escala de grises. A continuación, la Figura 2.11 muestra el escalograma para la componente Norte-Sur de un registro de aceleraciones horizontales del terreno correspondiente al evento sísmico El Centro, California, durante el sismo del Valle Imperial el 18 de mayo de 1940 (Chopra, 2007), utilizando una función wavelet denominada Mexican Hat Mother Wavelet.

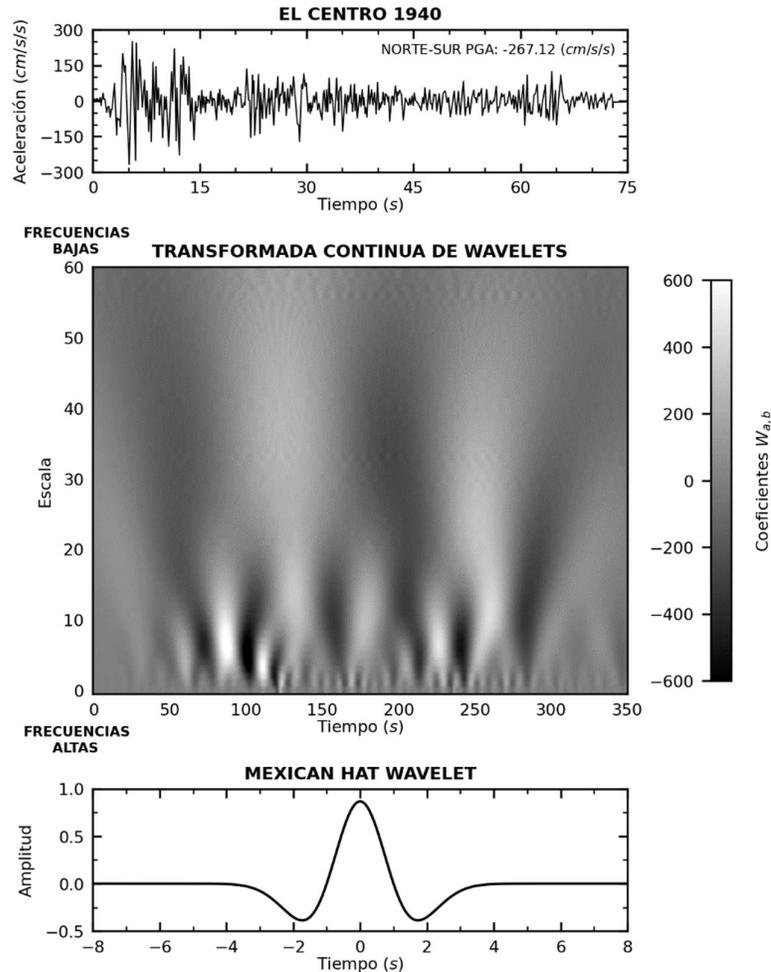


Figura 2.11 Escalograma componente Norte-Sur sismo El centro 1940 para una wavelet madre Mexican Hat.

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.2 La transformada de Wavelets discreta

Sea una señal discreta  $f[t]$  función del tiempo “ $t$ ”, con un número de datos  $N$  e intervalo de tiempo constante entre cada dato de la señal  $\Delta t$ , puede ser descompuesta en componentes  $g_i$  (coeficientes de detalle) y su remanente  $f_i$  (coeficientes de aproximación) asociadas a frecuencias específicas, donde el número “ $n$ ” de componentes  $g_i, f_i$  para los rangos  $i = 1, 2, \dots, n$  es el resultado de redondear la expresión  $n = \log_2 N$ , siendo  $g_i, f_i$  componentes asociadas a la frecuencia de Nyquist  $f_{s,i}$ . La frecuencia de Nyquist correspondiente al rango  $i$ , es calculada mediante la ecuación (2.16). La Tabla 2.1 muestra las frecuencias  $f_{s,i}$  correspondientes a una muestra de  $2^{12}$  datos que puede ser descompuesta en 12 rangos para valores de  $\Delta t = 0.01$  y  $\Delta t = 0.02$  segundos.

$$f_{s,i} = \frac{2^{-i}}{2\Delta t} \quad (2.16)$$

Tabla 2.1 Frecuencias  $f_{s,i}$  para cada rango en diferentes intervalos de tiempo  $\Delta t$ .

$\Delta t = 0.01 \text{ s}$		$\Delta t = 0.02 \text{ s}$	
Rango $i$	$f_{s,i} \text{ (Hz)}$	Rango $i$	$f_{s,i} \text{ (Hz)}$
1	25.00	1	12.500
2	12.50	2	6.250
3	6.250	3	3.125
4	3.125	4	1.563
5	1.563	5	0.781
6	0.781	6	0.391
7	0.391	7	0.195
8	0.195	8	0.098
9	0.098	9	0.049
10	0.049	10	0.024
11	0.024	11	0.012
12	0.012	12	0.006

Fuente: Elaboración propia

Entonces la señal  $f[t]$  puede ser descompuesta en componentes de la primera frecuencia para  $g_1$  y el remanente  $f_1$  como se muestra en la ecuación (2.17)

$$f[t] = f_0 = g_1 + f_1 \quad (2.17)$$

$$f[t] = f_0 = g_1 + g_2 + g_3 + \dots + g_n + f_n \quad (2.18)$$

Las descomposiciones  $g_1, f_1$  tienen  $N/2$  número de datos, nuevamente  $g_2, f_2$  se obtienen a partir de la descomposición de  $f_1$ , con lo que la transformada de Wavelets discreta puede tomarse “ $n$ ” veces y así la señal original se descompone como se muestra en la ecuación (2.18).

El remanente  $f_n$  es un valor único. Las componentes  $g_i$  y  $f_i$  para el  $i$ -ésimo pueden ser calculadas como sigue

$$g_i = \sum_k d_k^{(j)} \psi(2^i x - k) \quad (2.19)$$

$$f_i = \sum_k c_k^{(j)} \phi(2^i x - k) \quad (2.20)$$

Donde,  $d_k^{(j)}$  es la secuencia de coeficientes para  $g_i$ ,  $c_k^{(j)}$  es la secuencia de coeficientes para  $f_i$ ,  $\psi(x)$  es la wavelet madre y  $\phi(x)$  es la función de escalamiento. Existen muchos tipos de familias wavelets que han sido propuestas en la literatura, para esta investigación se ha utilizado como función de escalamiento y wavelet madre la familia de wavelets B-Spline, específicamente las de orden 4, las cuales se muestran en la Figura 2.12.

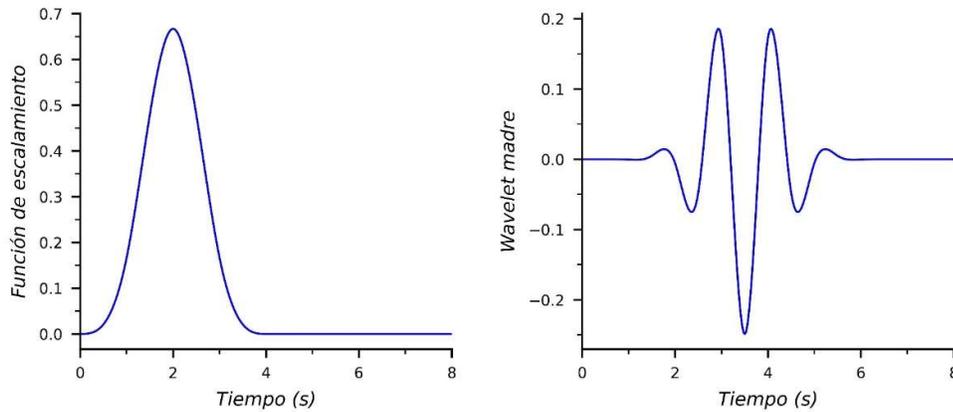


Figura 2.12 Función de escalamiento y wavelet madre B-Spline de orden 4.

Fuente: Adaptado de (Kusunoki, 2005a)

## 2.3 FILTRADO DE SEÑALES

### 2.3.1 Filtro por corrección línea base

Generalmente los valores iniciales de velocidad y desplazamiento al momento de la doble integración ( $v_{(t=0)} = 0$  y  $d_{(t=0)} = 0$ ), son inconsistentes con los valores reales, lo que resulta en el fenómeno de la deriva de línea base de los resultados de velocidad y desplazamiento. Incluso en algunos casos este resultado se ve aún más agravado por una distorsión directa en los valores de la señal que se encuentran desplazados respecto a la línea cero de aceleración debido a factores como la nivelación del sensor que produce la señal. El desfase de desplazamiento

puede ser lineal, como no lineal por lo que es necesario corregir la señal a través de una línea base (UNI, 2017).

El algoritmo de corrección por línea base presentado por (Pan et al., 2016), propone que para generar este tipo de corrección primero se debe integrar numéricamente la aceleración  $a(t)$ , (considerando como valor inicial  $v_0 = 0$ ), para obtener la velocidad  $v(t)$ , luego se ajusta esta velocidad mediante una línea de tendencia  $p_v(t)$  cuyo valor inicial es cero (así la velocidad inicial asumida es válida), que dará lugar a la correspondiente serie de tiempo corregida  $\tilde{a}_v(t)$ , la cual puede ser expresada mediante la ecuación (2.21).

$$\tilde{a}_v(t) = a(t) - \frac{d}{dt}p_v(t) \quad (2.21)$$

Como segundo paso se integra numéricamente dos veces la aceleración corregida  $\tilde{a}_v(t)$  para obtener la nueva velocidad  $v(t)$  y el desplazamiento  $d(t)$ , y luego ajustar  $d(t)$  mediante una línea de tendencia  $p_d(t)$  cuyo valor inicial y su primera derivada para  $t = 0$  son cero, (así los valores iniciales de velocidad y desplazamiento asumidos aún permanecen válidos). Entonces la nueva corrección de la aceleración puede obtenerse mediante la ecuación (2.22).

$$\tilde{a}_d(t) = a(t) - \frac{d^2}{dt^2}p_d(t) \quad (2.22)$$

La exactitud de este procedimiento depende del tipo línea de tendencia que se utilice para ajustar la velocidad y el desplazamiento. Generalmente se utilizan polinomios grado “ $n$ ” siendo  $n \geq 1$ , sin embargo, estas líneas de tendencia también pueden obtenerse a partir de la convolución entre la señal a ajustarse y una ventana Parzen de tamaño “ $N$ ” lo suficientemente grande como para que el suavizado generado resulte en la línea de tendencia deseada.

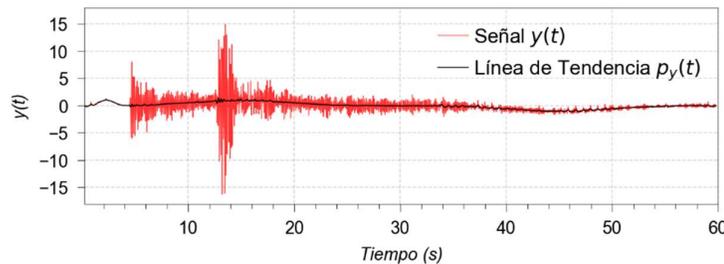


Figura 2.13 Obtención de la línea de tendencia para una señal general.  
Fuente: Elaboración propia

La Figura 2.13 muestra una señal general  $y(t)$  y su línea de tendencia  $p_y(t)$  obtenida mediante la convolución de la señal y una ventana Parzen de longitud  $N = 50$  mediante la ecuación (2.9). En la gráfica se observa que la línea de tendencia resultante adopta una forma que no podría lograrse con un polinomio.

Un inconveniente al generar las líneas de tendencias mediante esta forma es que al ser “ $N$ ” grande pueden presentarse efectos de borde en los extremos de  $p_y(t)$ , lo cual conlleva a que el valor de  $p_y(t)$  para  $t = 0$ , no sea igual al supuesto (los valores iniciales de velocidad y desplazamiento asumidos ya no permanecen válidos). Este efecto negativo puede eliminarse mediante la extrapolación los datos de la señal  $y(t)$  para ampliarla en sus extremos antes de calcular  $p_y(t)$ . Debe usarse un método de extrapolación que genere un  $p_y(t)$  conforme al supuesto de los valores iniciales. La Figura 2.14 muestra algunos métodos de extrapolación.

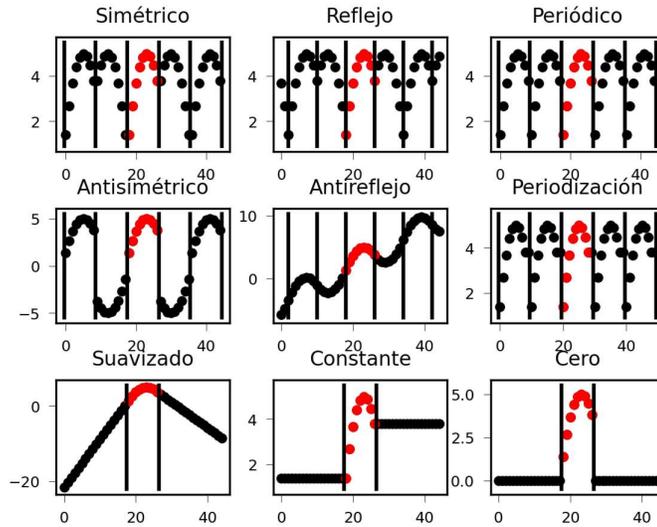


Figura 2.14 Métodos de extrapolación.  
Fuente: Adaptado de (Lee et al., 2019)

La Figura 2.15 muestra una traza de aceleración, velocidad y desplazamiento de un registro sísmico obtenido de la base de datos del Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Nex Generation Attenuation (NGA) del canal CHY039 con número de registro 2711 correspondiente al terremoto de Chi-Chi de 1999 para la componente Este–Oeste (llamado RSN2711\_CHICHI.04\_CHY039E). En la gráfica se puede observar que la componente de desplazamiento está desfasada de la real debido a que el supuesto de velocidad inicial no es igual a cero ( $v_{(t=0)} = 0$ ).

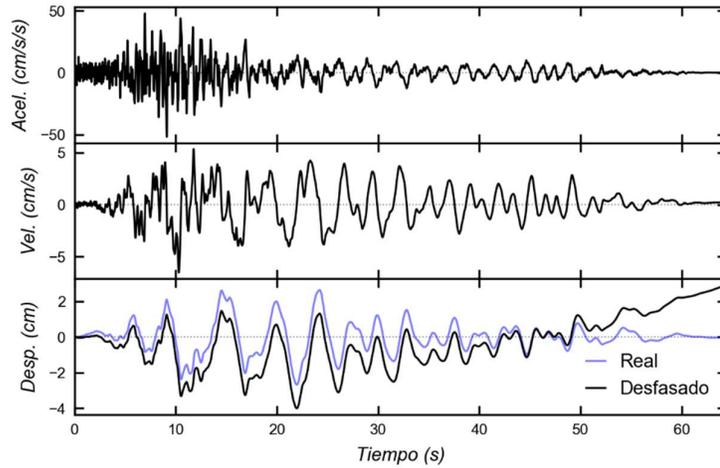
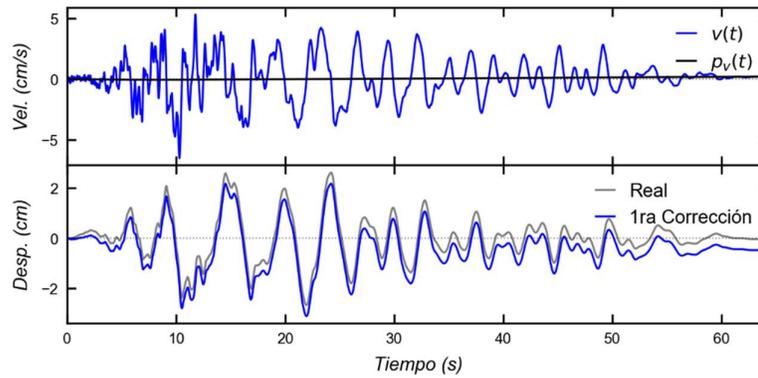
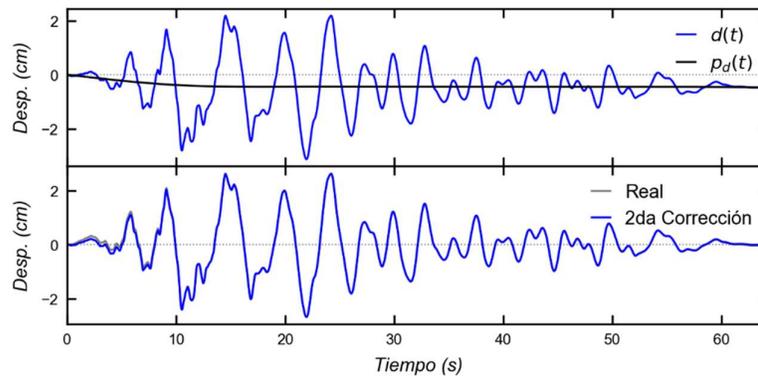


Figura 2.15 Aceleración, velocidad y desplazamiento del terremoto de Chi-Chi de 1999.  
Fuente: Adaptado de (Pan et al., 2016)

La Figura 2.16 muestra como hay un mejoramiento en el desplazamiento correspondiente a la segunda corrección (ajuste en el desplazamiento) respecto a la primera corrección (ajuste en la velocidad).



a) Primera corrección en la velocidad



b) Segunda corrección en el desplazamiento

Figura 2.16 Corrección por línea base.  
Fuente: Elaboración propia

### 2.3.2 Filtro pasa-banda butterworth

El proceso de eliminar componentes sinusoides con frecuencias o en intervalos de frecuencias particulares (ruido) sin alterar componentes cuyas frecuencias se encuentran fuera de estos intervalos, se conoce como *filtrado*, y al sistema que hace cumplir estas características se conoce como *filtro*. Entonces, si se tiene que una señal " $x(t)$ " es la salida o registro de un sensor, las componentes sinusoidales dominantes contenidas en la señal estarán contaminadas con ruido debido a la naturaleza del proceso de recolección de datos y de las condiciones ambientales, por lo que la señal necesitará un proceso de filtrado. El filtro pasa-banda es el producto de un filtro de corte bajo y un filtro de corte alto como se muestra en la ecuación (2.23). Los filtros de corte bajo y alto son funciones del contenido de frecuencias del espectro de Fourier y se definen por las ecuaciones (2.24) y (2.25) respectivamente (Kashima, 2016).

$$G_B(f) = G_L(f)G_H(f) \quad (2.23)$$

$$G_L(f) = \sqrt{\frac{(f/f_L)^{2n}}{1 + (f/f_L)^{2n}}} \quad (2.24)$$

$$G_H(f) = \sqrt{\frac{1}{1 + (f/f_H)^{2n}}} \quad (2.25)$$

Donde  $G_L(f)$  y  $G_H(f)$  son las ganancias de los filtros de corte bajo y alto,  $f_L$  y  $f_H$  son las frecuencias de corte bajo y alto, respectivamente. Las formas de los filtros están determinadas por las frecuencias de corte  $f_L$ ,  $f_H$  y el orden " $n$ ". Las formas de los filtros para  $n = 3, 5, 10$  y  $20$  son mostradas en la Figura 2.17.

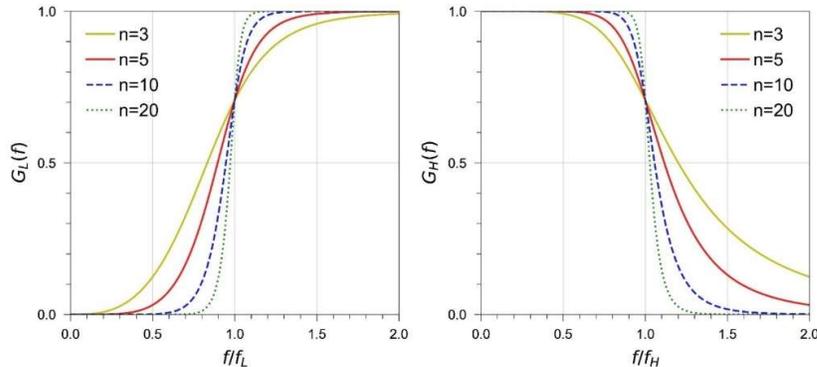


Figura 2.17 Gráficas características de los filtros de corte bajo (izquierda) y alto (derecha).  
Fuente: Adaptado de (Kashima, 2016)

Entonces, para hacer el filtrado de frecuencias a una señal " $x(t)$ ", se le multiplica a la FFT de la señal por las ecuaciones(2.23), (2.24) o (2.25), dependiendo del tipo de corte que se requiera hacer (pasa-banda, corte bajo o corte alto, respectivamente), luego esta es devuelta al dominio del tiempo usando la inversa de la FFT teniéndose así la señal  $x(t)$  filtrada con el contenido de frecuencias deseado. La Figura 2.18 muestra el espectro de Fourier, antes y después del filtrado, de una señal correspondiente a un registro de aceleraciones mediante un pasa-banda con frecuencias de corte baja y alta de 5 Hz y 15 Hz respectivamente, y la Figura 2.19 muestra la señal antes y después del proceso de filtrado.

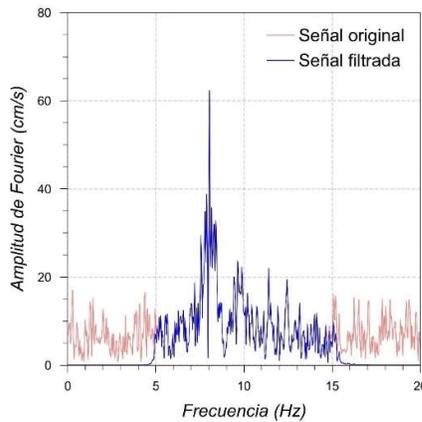


Figura 2.18 Espectros de Fourier de la señal antes y después de filtro.  
 Fuente: Elaboración propia

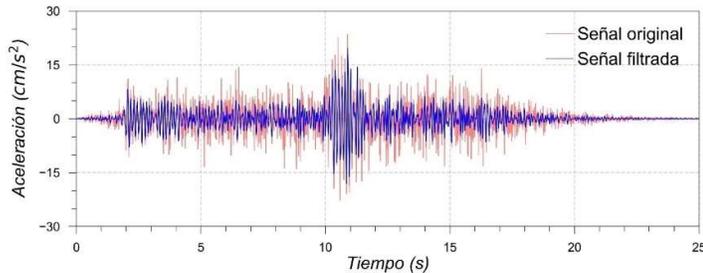


Figura 2.19 Señal de aceleraciones antes y después de filtro.  
 Fuente: Elaboración propia

Es práctica común aplicar de manera conjunta los dos tipos de filtros antes mencionados, la primera para eliminar líneas de tendencia (línea base) y la segunda para eliminar componentes en un rango de frecuencias determinado (pasa banda). Primeramente, se debe aplicar la corrección por línea base, ya que la existencia de una línea de tendencia contradice el supuesto en la transformada de Fourier de que la señal es un conjunto de señales periódicas.

### 2.3.3 Filtro por transformada de Wavelets discreta

Como se mencionó en la Sección (2.2.2), la transformada de Wavelets discreta puede descomponer una señal  $f_0$  sucesivamente en  $N$  componentes de distintas frecuencias  $g_i$  y sus remanentes  $f_i$ , dado esto la descomposición y reconstrucción puede darse como se muestra en la Figura 2.20.

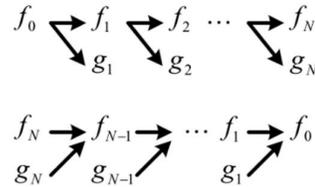


Figura 2.20 Esquema de la descomposición y reconstrucción de una señal mediante la transformada de Wavelets discreta.

Fuente: Tomado de (Kusunoki, 2005a)

La ecuación (2.18), que representa la reconstrucción de la señal, puede ser expresada de manera compacta mediante la ecuación (2.26).

$$f(t) = f_0 = \sum_{i=1}^N g_i(t) + f_N(t) \quad (2.26)$$

Dado que la señal original  $f_0$  puede ser descompuesta en términos de  $g_i$  y  $f_N$ , la integral de estos términos puede efectuarse de forma separada como se muestra a continuación (Kusunoki, 2005a).

$$\begin{aligned} \int f(t) dt &= \int \left\{ \sum_{i=1}^N g_i(t) + f_N(t) \right\} dt \\ &= \sum_{i=1}^N \int g_i(t) dt + \int f_N(t) dt \\ \iint f(t) dt &= \iint \left\{ \sum_{i=1}^N g_i(t) + f_N(t) \right\} dt \\ &= \sum_{i=1}^N \iint g_i(t) dt + \iint f_N(t) dt \end{aligned}$$

Por lo tanto, cualquier componente de cualquier frecuencia puede ser eliminada del cálculo integral sin afectar el resultado con otros componentes teniendo así una ventaja en comparación a otros métodos como la transformada de Fourier que depende de un filtro pasa banda el cual descarta un rango de frecuencias que bien podría eliminar componentes significativos en la respuesta.

A continuación, se muestra un estudio realizado por el Dr. Koichi Kusunoki en (Kusunoki, 2005a), donde muestra la aplicación de la transformada de Wavelets discreta en el filtrado de un registro de aceleraciones con una frecuencia de muestreo de 100 Hz correspondiente a las aceleraciones observadas del puente colgante *Vicent Thomas* que cruza el puerto de Los Ángeles, California en Estados Unidos, tomado el 28 de noviembre de 2004 a las 5:00 pm. Este registro se caracteriza por tener componentes de periodos largos o frecuencias bajas por la misma naturaleza de la estructura cuya respuesta permanece lineal.

La Figura 2.21.a muestra el registro de aceleraciones luego de haber removido el desfase vertical vía sustracción del promedio de sus valores, la Figura 2.21.b y Figura 2.21c muestran las velocidades y desplazamientos calculados por integración directa de la Figura 2.21.a mediante el método del trapecio. La velocidad calculada presenta un desfase vertical por lo que los desplazamientos obtenidos resultan ser relativamente grandes para ser representativos de la estructura en estudio. Incluso si el desfase vertical de la velocidad es sustraído mediante corrección por línea base o eliminación del promedio de sus valores, los desplazamientos permanecen excesivos como se muestra en la Figura 2.22.

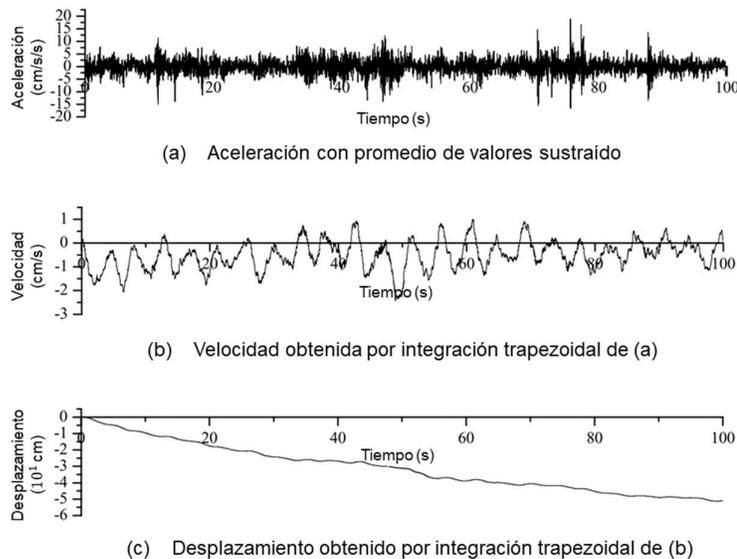


Figura 2.21 Respuestas calculadas mediante integración trapezoidal del registro de aceleraciones con promedio de valores sustraído.

Fuente: Adaptado de (Kusunoki, 2005a)

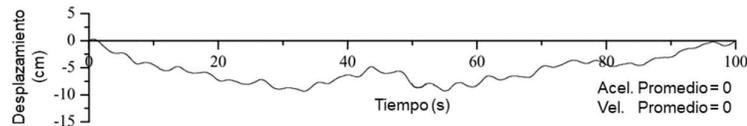
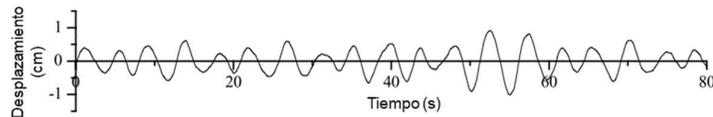


Figura 2.22 Desplazamientos calculados mediante integración trapezoidal de las velocidades con promedio de valores sustraído.

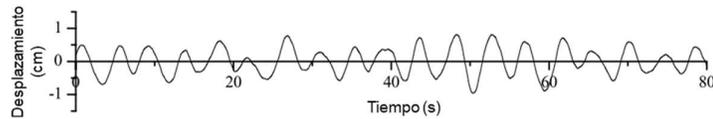
Fuente: Adaptado de (Kusunoki, 2005a)

Al aplicar la transformada de Wavelets a las aceleraciones de la Figura 2.21.a, esta se descompone en 13 componentes o rangos (ya que la cantidad de puntos analizados son  $2^{13}$ ). De acuerdo con las frecuencias naturales de la estructura de 0.233 Hz y 0.367 Hz correspondientes a los dos primeros modos, las componentes predominantes son las correspondientes a los rangos 7 y 8 según la Tabla 2.1 para un  $\Delta t = 0.01$  segundos.

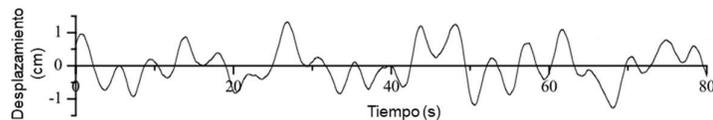
A continuación, la Figura 2.23 muestra los resultados de la reconstrucción de la señal  $f_0$  a partir de diferentes composiciones de rangos limitados. La Figura 2.23a fue obtenida considerando los rangos del  $g_1$  al  $g_8$  despreciando los rangos del  $g_9$  al  $g_{13}$  y su remanente  $f_{13}$ . Las Figura 2.23b y Figura 2.23c fueron obtenidas considerando los rangos del  $g_1$  al  $g_9$  y  $g_1$  al  $g_{10}$  respectivamente. De estas 3 gráficas podría considerarse que la mejor aproximación a la realidad lo da la combinación mostrada en Figura 2.23a, debido al supuesto de que la respuesta de la estructura permanece lineal y es acorde a sus frecuencias naturales.



(a)  $f_0$  Considerando las componentes  $g_1$  a  $g_8$



(b)  $f_0$  Considerando las componentes  $g_1$  a  $g_9$



(c)  $f_0$  Considerando las componentes  $g_1$  a  $g_{10}$

Figura 2.23 Desplazamientos calculados con diferentes rangos mediante la transformada de Wavelets discreta.

Fuente: Adaptado de (Kusunoki, 2005a)

A partir de estos resultados el Dr. Koichi Kusunoki hace las siguientes conclusiones:

- La transformada de wavelets discreta puede descomponer una señal proveniente de un registro de aceleraciones exitosamente.
- Las componentes asociadas a rangos muy bajos pueden ser fuentes de error en las señales, pero estas no afectan los desplazamientos calculados de forma significativa debido a que frecuencias asociadas son muy altas.
- Las componentes asociadas a rangos muy altos contienen mucho error en la respuesta y afectan significativamente los desplazamientos calculados porque sus frecuencias asociadas son relativamente bajas y amplifican el efecto del error al realizar la doble integración.
- Si se desprecian las componentes asociadas a rangos altos se pueden obtener desplazamientos razonables relativos a la estructura en análisis.

En base a estas conclusiones los ingenieros deben decidir que componentes deben ser asumidos como error y ser despreciados al momento de la reconstrucción (filtrado) de la señal original de acuerdo con las propiedades dinámicas de la estructura en cuestión.

En esta investigación, la transformada de Wavelets discreta es aplicada para la eliminación del error que se genera al momento obtener la respuesta de los desplazamientos a partir del cálculo de la doble integración de las aceleraciones registradas por los acelerómetros instrumentados en el Centro de Información e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil (CIIFIC) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

## CAPÍTULO III: ESTRUCTURA OBJETIVO

### 3.1 DESCRIPCIÓN

El Centro de Información e Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil (CIIFIC) es una edificación aislada que consta de una subestructura conformada por 20 aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (ver Sección 3.1.4), y una superestructura de pórticos de concreto armado de 8 niveles. La Figura 3.1 muestra la parte exterior de la superestructura de la edificación.



Figura 3.1 Vista exterior de la superestructura del CIIFIC.  
Fuente: Elaboración propia

La superestructura de la edificación fue construida en dos etapas, en la primera se construyeron los 4 primeros niveles en los cuales se instalaron los sensores para el inicio del proceso de monitoreo, en la segunda etapa se construyeron los 4 niveles superior faltantes por lo que se tiene registros para estos dos estados del ciclo constructivo.

#### 3.1.1 Ubicación

El CIIFIC se ubica en la Universidad Nacional de Ingeniería (Av. Tupac Amaru, distrito del Rímac, Departamento de Lima) siendo sus coordenadas geográficas aproximadas de  $-12.021^\circ$  de latitud sur y  $-77.049$  longitud oeste. Internamente se encuentra rodeada por el sur con los pabellones G2 (Aulas), por el este con el pabellón G3 (Laboratorio de Hidráulica), por el norte con el pabellón G9 (Laboratorio de Mecánica de Suelos) y por el oeste con la Facultad de Urbanismo y Arquitectura, ocupando un área en planta aproximada de terreno de 770 m<sup>2</sup>.

### 3.1.2 Geometría y sistema estructural

El CIIFIC tiene un sistema estructural denominado pórticos de concreto armado para ambas direcciones principales, con una configuración regular en planta e irregular en altura. Las dimensiones en planta son de 36.00m x 18.20m con una altura total de 28.00m y una altura de entrepiso de 3.50m. La estructura cuenta con 7 diferentes perfiles de columnas separadas en dos grupos, las columnas del primer y segundo piso, y las columnas de los niveles superiores, el detalle de los perfiles de las columnas se muestra en la Figura 3.2 y Figura 3.3. Algunas secciones de vigas típicas se muestran en la Figura 3.4. La Figura 3.5 muestra la configuración estructural para los niveles 4, 5, 6 y 7 de la edificación (que es similar para todos los niveles a excepción de la estructura de las losas). Otros desarrollos en planta se y elevación se muestran en el ANEXO 3.

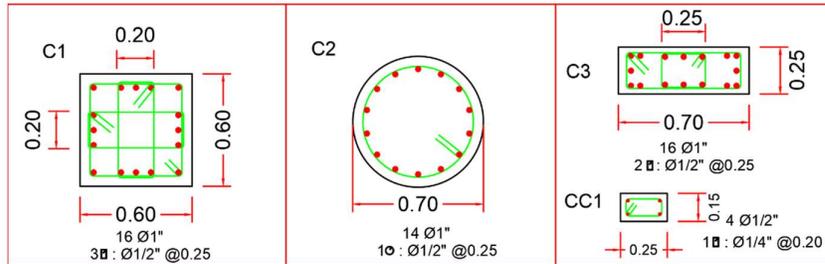


Figura 3.2 Perfiles de columnas primer y segundo nivel.

Fuente: Expediente técnico, Plano E-4

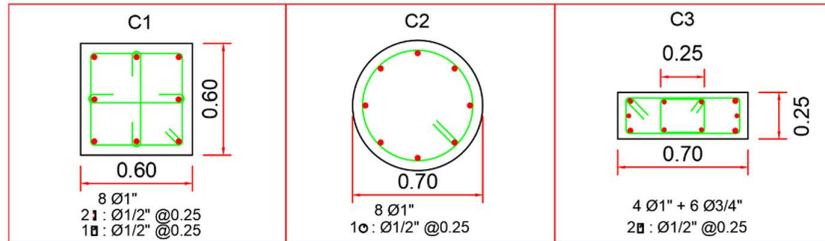


Figura 3.3 Perfiles de columnas niveles superiores.

Fuente: Expediente técnico, Plano E-4

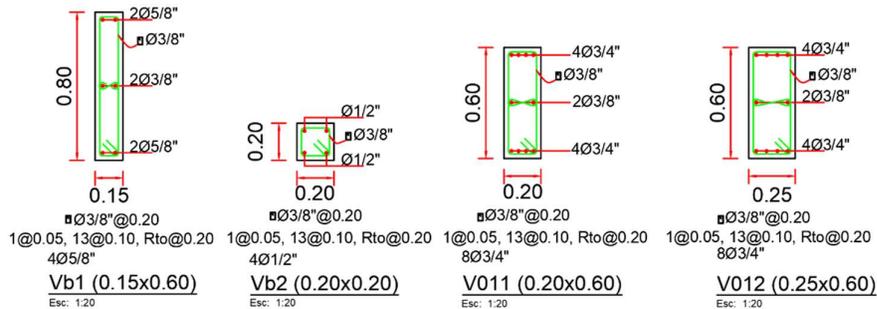


Figura 3.4 Perfiles de vigas típicas.

Fuente: Expediente técnico, Plano E-8

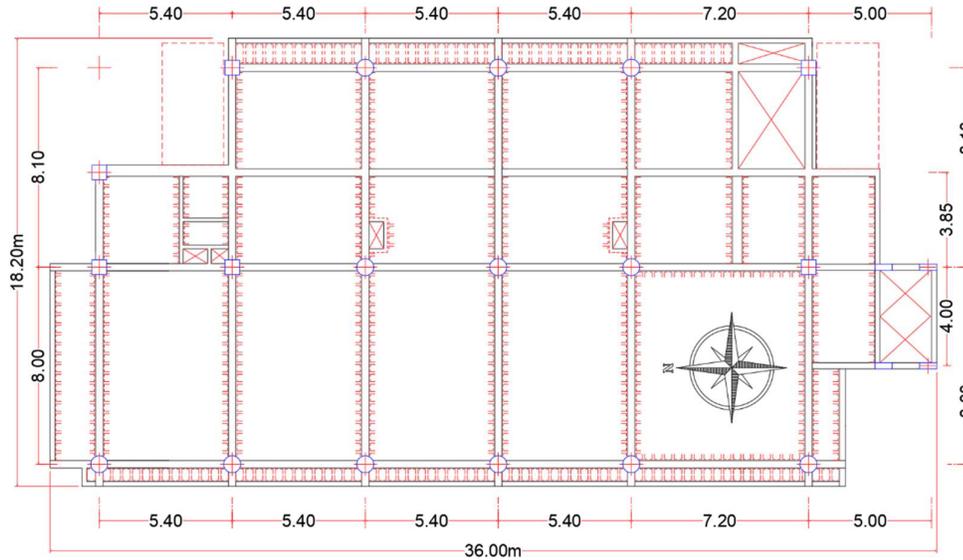


Figura 3.5 Vista en planta niveles 4, 5, 6 y 7 del CIIFIC.

Fuente: Expediente técnico, Plano E-23

El CIIFIC se encuentra asentado (según el estudio de mecánica de suelos) sobre un suelo rígido ( $S_1$ ), ubicado en una zona sísmica 4 ( $Z_4$ ) y categorizado como una edificación para uso de biblioteca más oficinas ( $C$ ) según la Norma técnica E.030 “Diseño Sismo Resistente” del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú del año 2003 (NTE E030, 2003) vigente durante el diseño de la estructura. A continuación, la Tabla 3.1 muestra un resumen de los parámetros sísmicos que caracterizan al CIIFIC. Adicionalmente la Tabla 3.2 muestra los desplazamientos máximos de diseño.

Tabla 3.1 Parámetros sísmicos según plano estructural.

Factor de Zona	$Z=0.4$
Factor de Uso	$U=1.0$
Factor de Suelo	$S=1.0$
Cociente de Reducción X-X	$R_x=1.0$
Cociente de Reducción Y-Y	$R_y=1.0$

Fuente: Expediente técnico, plano E-4

Tabla 3.2 Desplazamientos máximos de diseño.

	NS (cm)	EO (cm)
Desplazamiento de diseño en la base	11.97	11.77
Desplazamiento máximo en la base	25.55	25.48
Desplazamiento de diseño en el último nivel	16.38	18.98
Desplazamiento en el último nivel	34.39	34.68

Fuente: Expediente técnico, plano E-4

### 3.1.3 Propiedades dinámicas

Como se ha mencionado, el CIIFIC fue construido en dos etapas de 4 niveles cada una, por lo que sus propiedades dinámicas han ido variando durante dichos procesos. Una de estas propiedades es el periodo fundamental de la estructura, el cual se halló mediante un análisis de frecuencias a través de la transformada rápida de Fourier.

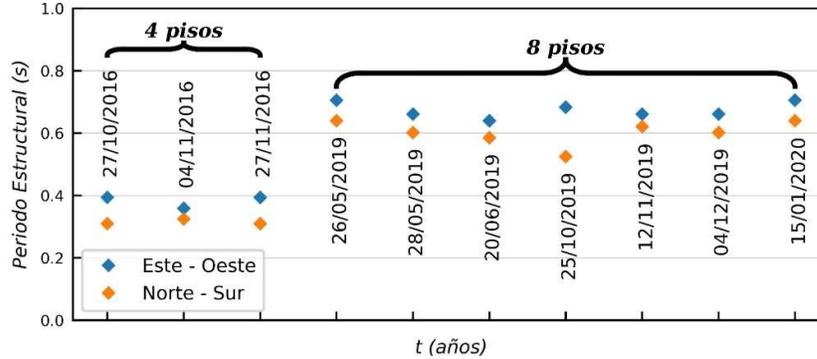


Figura 3.6 Variación del periodo fundamental a lo largo del proceso constructivo.  
Fuente: Elaboración propia

La Figura 3.6 muestra la variación de los periodos fundamentales para cada dirección principal a lo largo de los años 2016, 2019 y 2020. De la gráfica se puede apreciar un aumento del periodo fundamental debido a que hasta el año 2016 se tenían 4 niveles terminados, ya para los años 2019 y 2020 se habían culminado los 4 niveles restante. La Tabla 3.3 muestra valores de los periodos fundamentales graficados en la Figura 3.6.

Tabla 3.3 Periodos fundamentales.

Fecha	Periodo Fundamental (s)	
	Norte - Sur	Este - Oeste
27/10/2016	0.310	0.394
04/11/2016	0.325	0.359
27/11/2016	0.310	0.394
26/05/2019	0.640	0.706
28/05/2019	0.602	0.661
20/06/2019	0.585	0.640
25/10/2019	0.525	0.683
12/11/2019	0.621	0.661
04/12/2019	0.602	0.661
15/01/2020	0.640	0.706

Fuente: Elaboración propia

Cabe resaltar que estos periodos son los esperados al comportamiento de la estructura como un sistema con empotramiento en la base y no a lo que se tiene en realidad (sistema de base aislada), esto se debe a que los registros empleados para la determinación de estos periodos no son los suficientemente fuertes como para activar los aisladores por lo que estos prácticamente se comportan como un sistema empotrado. Dichos registros se muestran en el ANEXO 1.

#### 3.1.4 Aisladores del CIIFIC

El CIIFIC consta de 20 aisladores sísmicos adquiridos de la empresa *Dynamic Isolation Systems* en el año 2013. Estos aisladores denominados elastoméricos están conformados por láminas de caucho natural vulcanizado e intercaladas con planchas de acero, además poseen un núcleo de plomo de forma cilíndrica para un aumento de la disipación de energía mediante de su deformación plástica.



Figura 3.7 Ejemplo de aisladores empleados en el CIIFIC.  
Fuente: Dynamic Isolation Systems

### 3.2 SISTEMA DE OBSERVACIÓN DE LA RESPUESTA

La instrumentación del CIIFIC se realizó entre el 21 y 28 de octubre del año 2016 dentro del marco del proyecto de ampliación de la Red de Monitoreo de Edificaciones (REMOED) del CISMID, la importancia del monitoreo de esta edificación radica en que cuenta con un sistema de aislamiento sísmico en la base. Este sistema de instrumentación permite analizar el estado de la salud estructural del edificio (CISMID, 2016).

#### 3.2.1 Sensores sísmicos (Acelerómetros)

El sistema de monitoreo consta de cuatro sensores ITK-002 (ver Figura 3.8), una computadora portátil y un switch unidos mediante un sistema de cableado estructural e integrados bajo el sistema de adquisición de datos Aries de ALAB Ltd. En la primera etapa de construcción (cuatro primeros niveles) se instalaron

cuatro de estos sensores, perteneciente a la segunda generación de sensores sísmicos de bajo costo desarrollados por el Consorcio IT Kyoshin, cuyas especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 3.4. Cabe mencionar que se planea aumentar la cantidad de sensores para los niveles superiores.



Figura 3.8 Sensor ITK-002.

Tabla 3.4 Especificaciones técnicas de los sensores.

Ejes de medición	X, Y, Z (3 ejes)
Capacidad nominal	$\pm 24.50 \text{ m/s}^2 (\pm 2.5 \text{ g})$ ,
Ruido	$< 0.1 \text{ gal}$
Voltaje nominal	DC $6\text{V} \pm 10\%$
Angulo de aceptación permisible	Dentro de $\pm 3^\circ$
Precisión de marcha	NTP - dependiente
Muestreo	24 bits, 100 SPS
Material de cubierta	Aluminio moldeado a presión
Peso	Aprox. 800 g

Fuente: (CISMID, 2016).

### 3.2.2 Distribución de los sensores

En la base y techo del semisótano se encuentran ubicados los sensores itk-00 e itk-01 respectivamente, mientras que los sensores itk-02 e itk-03 se ubican en los techos del segundo y cuarto piso respectivamente. La ubicación en planta de los sensores se muestra en la Figura 3.9, estos están colocados aproximadamente en el centro de masas de la estructura, para mayor detalle ver el ANEXO 3. Como se mencionó en la Sección 3.1, los sensores fueron instalados durante la primera etapa de construcción (primeros 4 niveles), sin embargo, durante la segunda etapa de construcción, no se añadieron más sensores para los niveles superiores y tampoco se reubicaron ningunos de los sensores ya existentes, por lo que, a la actualidad de esta investigación, se mantiene la misma distribución. Es recomendable instrumentar como mínimo el techo del último nivel con la finalidad de tener una mejor representación de la respuesta dinámica y periodo fundamental de la estructura.

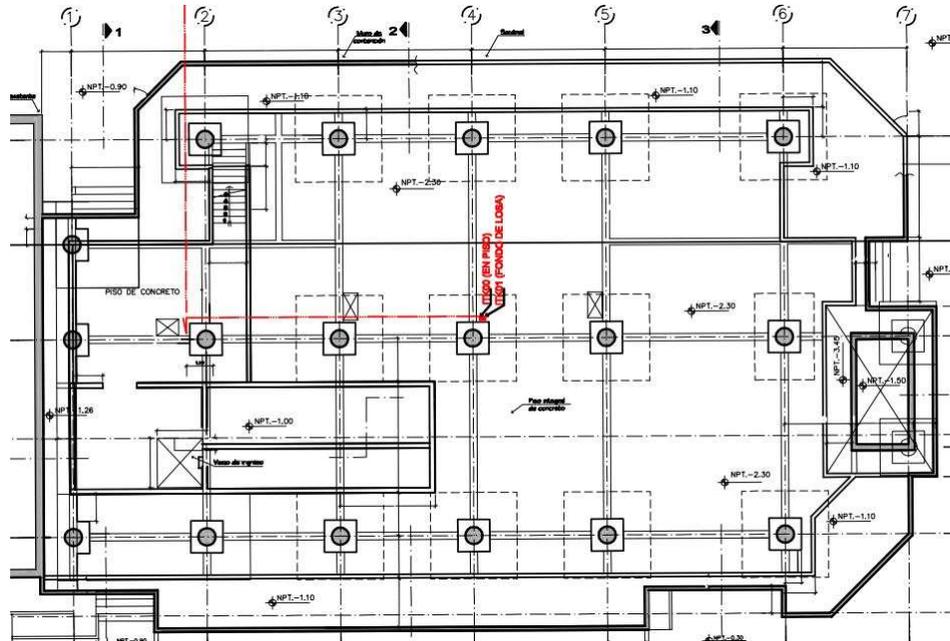


Figura 3.9 Distribución en planta de los sensores.  
Fuente: (CISMID, 2016)

La Figura 3.10 y Figura 3.11 muestran la instalación y distribución en altura de los sensores respectivamente.



Figura 3.10 Instalación de los sensores ITK-002.  
Fuente: (CISMID, 2016)

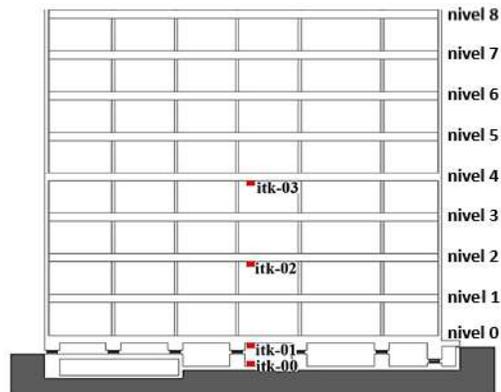


Figura 3.11 Esquema de distribución en altura de los sensores y niveles de la estructura vista cara este.  
Fuente: Adaptado de (CISMID, 2016)

El alineamiento de los ejes locales norte-sur y este-oeste de los sensores, es paralelo a los ejes geográficos cardinales del sistema de coordenadas UTM, tal disposición se muestra en la Figura 3.12.

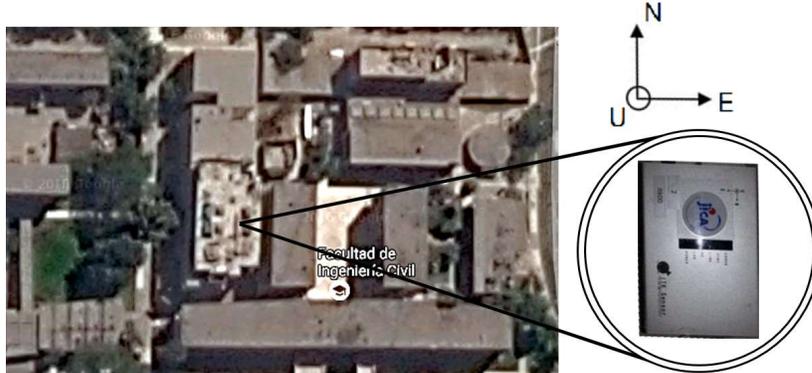


Figura 3.12 Alineamiento de ejes de sensores con los puntos cardinales del sistema de coordenadas UTM. (Vista satelital Google Earth).  
Fuente: (CISMID, 2016)

### 3.2.3 Sistema de adquisición de datos

La recolección y almacenamiento de registros sísmicos continuos captados por los sensores se hace en la Central Local de Monitoreo, la cual está conformada por un switch de 6 canales y una computadora portátil de sistema operativo Linux-Centos versión 6.8 con acceso a Internet que se ubica en el almacén del CIIFIC en el cuarto piso. Los sensores se unen al switch mediante un sistema de cableado estructural (cables UTP categoría 5). La comunicación entre los sensores y el servidor es por medio de datos TCP y UDP. La computadora portátil integra las señales y las guarda en su disco duro mediante el programa Aries de ALAB Ltd. El sistema guarda las señales para que puedan ser accedidas a distancia por otra computadora que pertenezca a la Red Privada Virtual (VPN) del CISMID.



Figura 3.13 Diagrama de sistema de comunicación centro de monitoreo local – CISMID.  
Fuente: Adaptado de (CISMID, 2016)

## CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO MATEMÁTICO

### 4.1 MODELAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

Para el modelamiento y análisis de la estructura en estudio se utilizó el Software de elementos finitos SAP 2000 en su versión 22 tomando en cuenta el comportamiento inelástico de los materiales y la no linealidad geométrica de los elementos.



Figura 4.1 Modelo matemático 3D del CIIFIC.  
Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.1 Propiedades de los materiales

Para el comportamiento dinámico del acero de refuerzo se ha considerado el modelo de histéresis bilineal tanto a tracción como a compresión. En tanto al esfuerzo de fluencia se ha utilizado un valor de  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$  según los planos estructurales. No se ha considerado ningún tipo de degradación de resistencia.

El comportamiento del concreto armado ha sido considerado como concreto confinado con un modelo de histéresis o de degradación de Takeda, considerando la colaboración a tracción del concreto. Para el esfuerzo de compresión  $f'_c$  se han considerado dos valores,  $350 \text{ kg/cm}^2$  (columnas 1er y 2do piso) y  $280 \text{ kg/cm}^2$  (columnas niveles superiores, vigas y losas) según los planos estructurales.

Los modelos de esfuerzo versus deformación unitaria utilizados para el acero y concreto se muestran en la Figura 4.2.

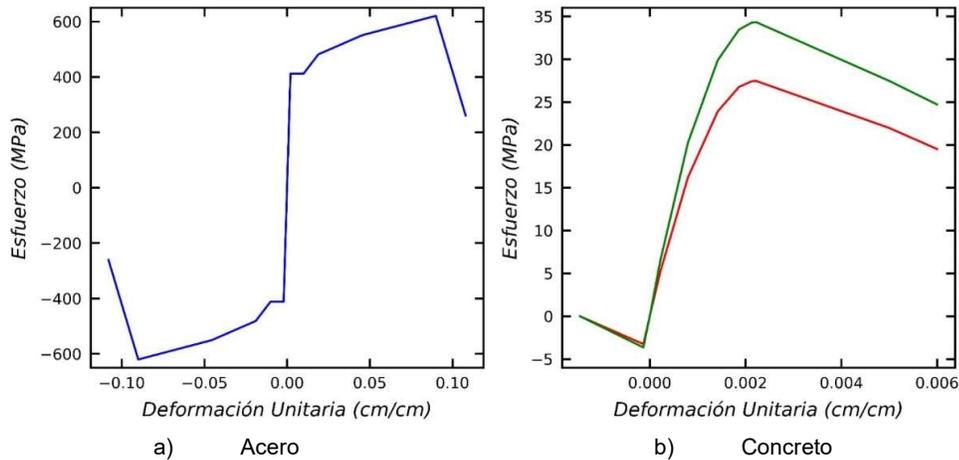


Figura 4.2 Modelos de esfuerzos vs deformación unitaria del acero y concreto.

Fuente: Adaptado de SAP 2000 versión 22

Los aisladores fueron modelados considerando el modelo de histéresis bilineal, el cual puede ser utilizado para aisladores elastoméricos con núcleo de plomo según (Higashino & Okamoto, 2006). Esta aproximación se ve justificada en los ensayos realizados a los aisladores por la empresa proveedora. La Figura 4.3 muestra uno de los 18 ensayos cíclicos de los aisladores realizados el 11 de noviembre del año 2013 para una carga axial de 1030 kN y un desplazamiento máximo de 78 mm.

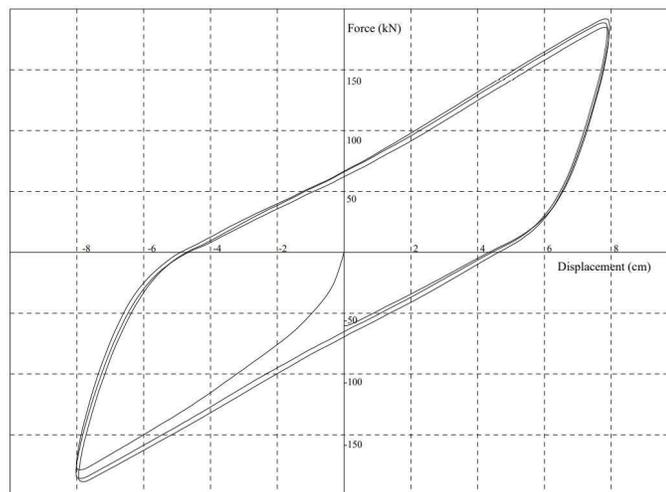


Figura 4.3 Ensayo cíclico aisladores.

Fuente: (Dynamic Isolation Systems, 2013)

Los parámetros de los aisladores empleados y descritos en los planos estructurales se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Parámetros de diseño de los aisladores.

Fluencia del Núcleo de Plomo ( $F_y$ )	71.40 kN
Rigidez Efectiva ( $K_{eff}$ )	1.643 kN/mm
Rigidez Vertical ( $K_v$ )	228.0 kN/mm
Amortiguamiento Efectivo ( $\beta_{eff}$ )	0.20

Fuente: Expediente técnico, plano E-4

#### 4.1.2 Modelo de sistema aporticado

El CIIFIC consta de un sistema aporticado el cual se conforma por vigas y columnas de concreto armado que están conectados por nudos rígidos, los cuales permiten la transferencia de momentos flectores, cortante y cargas axiales entre sus elementos, donde los espacios entre pórticos son rellenados con mampostería de bloques de ladrillos.

#### 4.1.3 Configuración del análisis dinámico no lineal

Para el cálculo de la matriz de amortiguamiento se utilizó un porcentaje de amortiguamiento constante de 5% para los dos primeros modos. El análisis tiempo historia parte desde el análisis estático no lineal por cargas gravitatorias considerando la no linealidad geométrica de los elementos mediante un análisis P-delta. El tipo de solución numérica empleada fue integración directa mediante el método de Newmark de aceleración promedio constante.

## 4.2 APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE WAVELETS

### 4.2.1 Caso de estudio: El centro

Para la aplicación de la transformada de Wavelets al filtrado de señales, se le aplicó un Análisis Dinámico no Lineal (Análisis Tiempo Historia) al modelo matemático del CIIFIC. La señal de entrada fue la componente Norte-Sur de un registro de aceleraciones horizontales del terreno correspondiente al evento sísmico El Centro, California, durante el sismo del Valle Imperial el 18 de mayo de 1940 (Chopra, 2007). Este registro tiene un muestreo  $\Delta t = 0.02$  segundos o 50 Hz y un total de 2688 puntos, además se lo amplificó escalarmente (multiplicando cada valor de aceleración por una constante) a un pico máximo de aceleración del terreno o *Peak Ground Acceleration* (o PGA por sus siglas en inglés) de 0.4 veces la aceleración de la gravedad para la obtención de una respuesta más notoria. El registro escalado se introdujo para las dos direcciones principales del modelo.

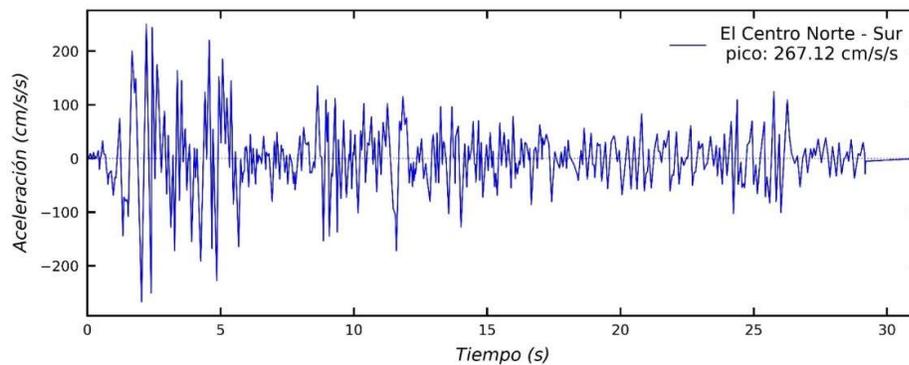


Figura 4.4 Componente Norte-Sur del sismo El Centro de 1940, no escalado.

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se analizó la respuesta de la estructura en la componente más débil (Este-Oeste) del modelo estructural. La respuesta de aceleración relativa a la base de la superestructura (nivel 0, ver Figura 3.11) de cada nivel, fue contaminada artificialmente con una onda estocástica estacionaria (ruido blanco) uniforme de media  $\mu = 0$ , desviación estándar  $\sigma^2 = 1$  y una amplitud 8 gals (1% entre pico y pico de la señal), así mismo, a estas respuestas se les realizó una extrapolación de los datos constante de 500 puntos antes y después (ver Figura 2.14), para la reducción de los efectos de borde a la hora de la aplicación de la metodología. El objetivo de esto es filtrar las respuestas alteradas y hacer la comparación tomando como base la respuesta original de aceleraciones y desplazamientos del modelo no lineal. La Figura 4.5 resume este procedimiento en un diagrama de flujo.

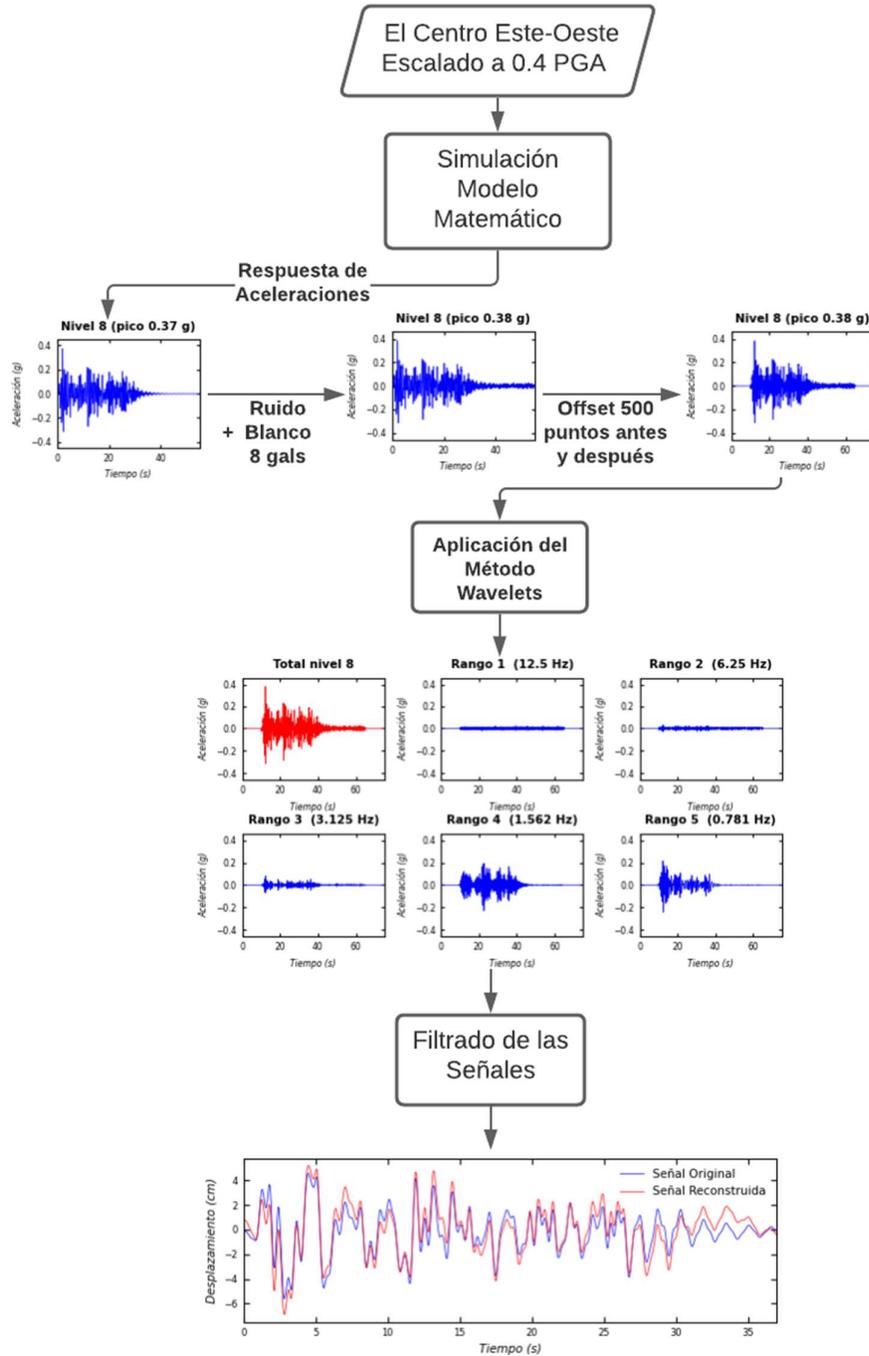


Figura 4.5 Procedimiento para el filtrado de señales aplicando la metodología de la transformada de Wavelets.  
Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.6 muestra las respuestas de aceleraciones contaminadas (con el ruido blanco) del modelo para la dirección este-oeste.

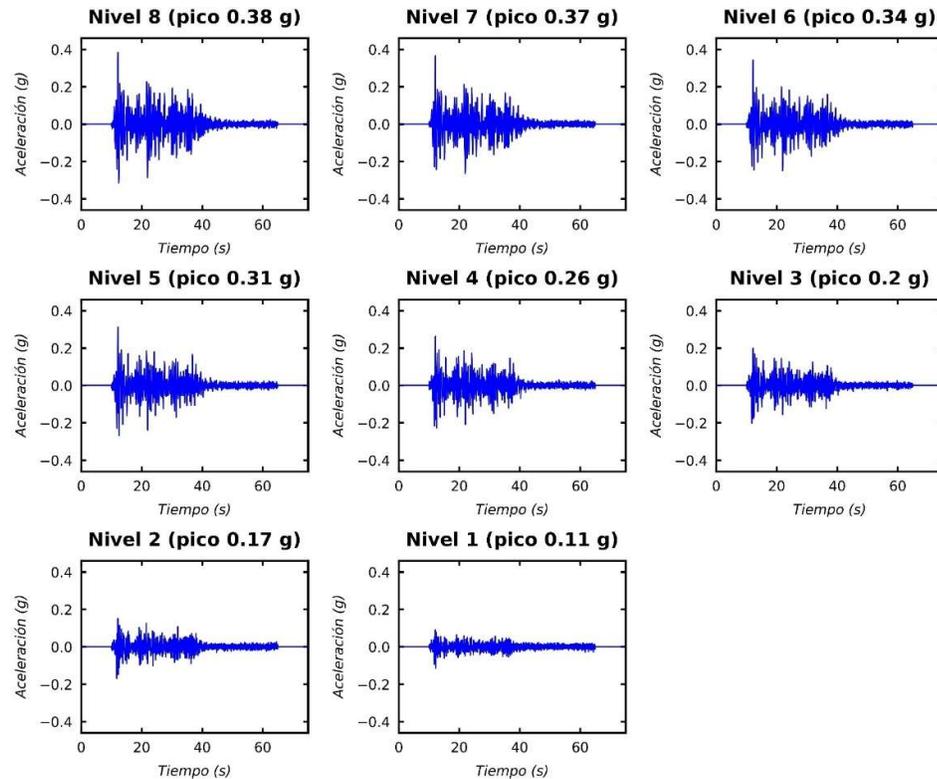


Figura 4.6 Respuesta de aceleraciones contaminadas en la componente Este-Oeste en unidades de aceleración de la gravedad.

Fuente: Elaboración propia

La cantidad de datos para cada una de estas aceleraciones artificiales son de 3751 con un  $\Delta t=0.02$ , lo que genera un total de 11 rangos como los mostrados en la Tabla 2.1. Con estos parámetros de entrada se aplicó el método de la transformada de Wavelets discreta al evento sísmico (El Centro) escalado, y a las aceleraciones alteradas de cada nivel, a través del uso de un código de programación escrito en Fortran 95 por el Dr. Miguel Diaz, basado en la teoría y algoritmos descritos por el Dr. Koichi Kusunoki en (Kusunoki, 2005b).

La Figura 4.7 muestra la señal del evento sísmico El Centro escalada (gráfica en rojo), y sus componentes  $g_i$  para los 11 rangos generados (gráficas en azul) por el programa obtenidos a partir de una función de escalamiento y wavelet madre del tipo B-spline de orden 4 (ver Figura 2.12).

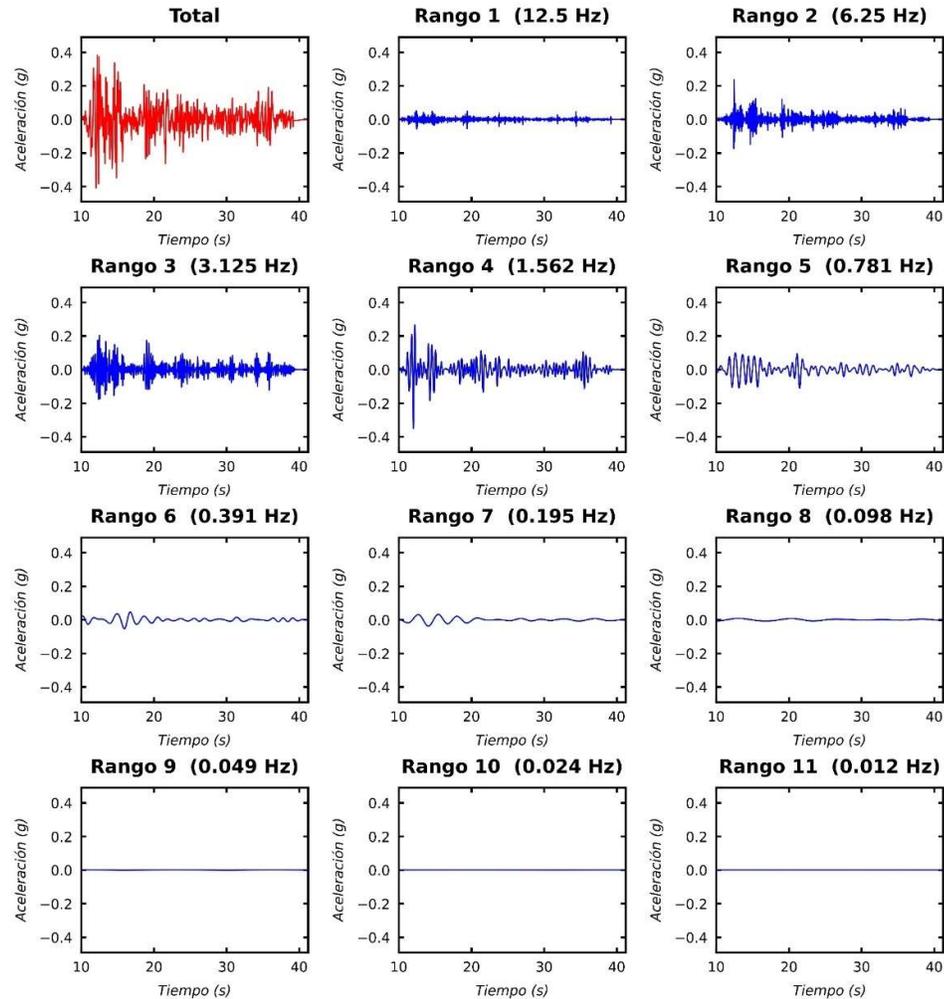


Figura 4.7 Sismo El Centro escalado y sus 11 componentes para cada rango con  $\Delta t=0.02$ .  
Fuente: Elaboración propia

De la Figura 4.7 se observa que la señal tiene componentes predominantes (mayores amplitudes) asociadas a frecuencias altas que corresponden a los rangos del 1 al 7. Este comportamiento predominante de rangos inferiores en la aceleración se da para suelos rígidos, mientras que, para suelos blandos, los componentes predominantes se asocian a rangos mayores de frecuencias bajas. Entonces la señal puede ser reconstruida omitiendo los rangos que muestran una respuesta no significativa (pequeñas amplitudes) que corresponderían a los rangos del 8 al 11, los cuales se asocian a vibraciones de bajas frecuencias.

Por otro lado, analizando la respuesta del modelo matemático, la reconstrucción de las señales a partir de sus rangos predominantes se muestra a continuación para las respuestas alteradas de los niveles 4 y 8 del modelo no lineal.

La Figura 4.8 muestra la descomposición en los rangos de las aceleraciones contaminadas del nivel 4 del modelo. Aquí se puede observar que los rangos 1 y 2 son componentes asociadas al ruido artificial con el que se contaminó la respuesta original de aceleraciones, mientras que las componentes de rangos superiores (rangos del 6 al 11) tienen un aporte no significativo por lo que estos rangos pueden ser excluidos para la reconstrucción de la señal. Por otra parte, se puede apreciar que los rangos del 3 al 5 tienen una menor contaminación y son rangos que servirían para la reconstrucción de las aceleraciones.

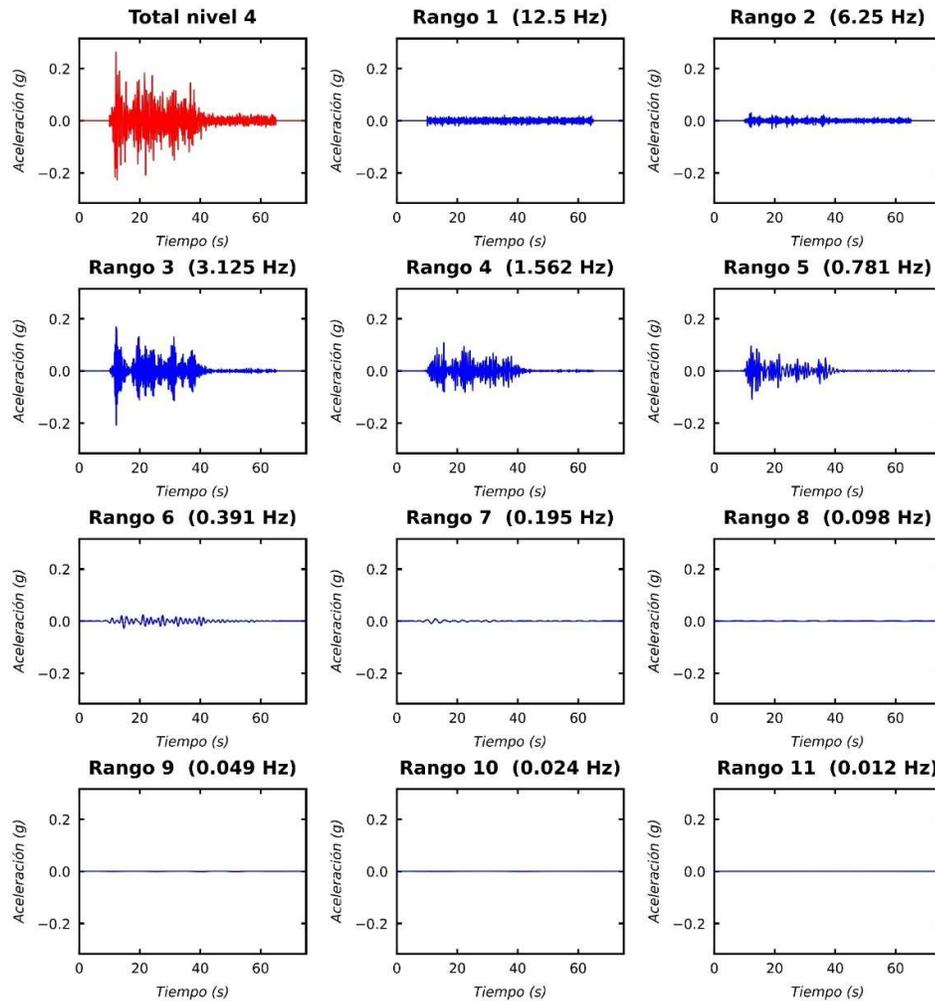


Figura 4.8 Respuesta de aceleraciones alteradas del nivel 4 y sus 11 componentes para cada rango con  $\Delta t=0.02$ .

Fuente: Elaboración propia

De la Figura 4.9 se observa que el desplazamiento del nivel 4 está fuertemente distorsionado (gráfica esquina superior izquierda). Esto es debido a que, al momento de su obtención, se incrementó en gran medida el error que se genera al aplicar la doble integración numérica de su respectiva aceleración por la contaminación artificial que se introdujo en dicha señal. Además, se puede observar que los rangos 1 y 2 no tienen contribución alguna en la señal (son componentes asociadas al ruido) mientras que los rangos 8, 9, 10 y 11 son componentes que la distorsionan.

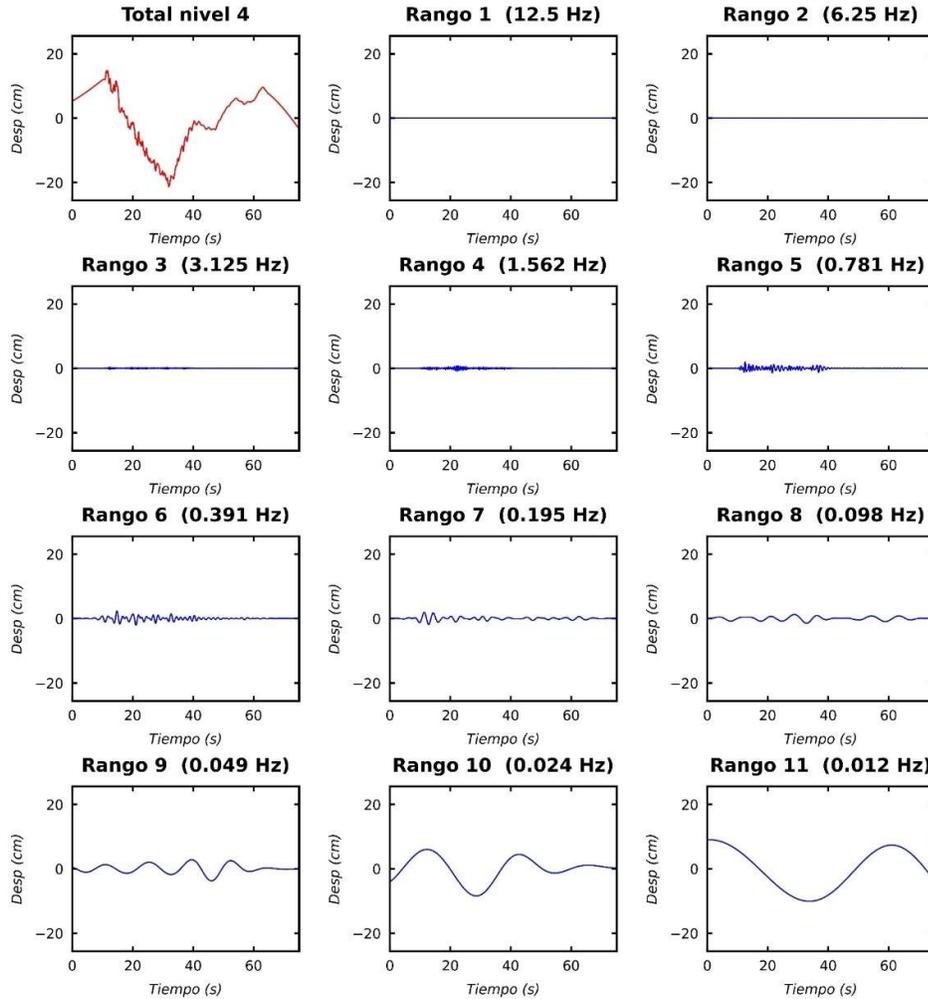


Figura 4.9 Respuesta de desplazamientos alteradas del nivel 4 y sus 11 componentes para cada rango con  $\Delta t=0.02$ .  
Fuente: Elaboración propia

Para tener una tercera y cuarta perspectiva de que rangos deberían utilizarse en la reconstrucción de las señales, se han realizado dos tipos de análisis adicionales. En una de ellas se grafica la aceleración versus el desplazamiento de

cada una de las 11 componentes para obtener gráficas similares a lo que serían ciclos de histéresis (Figura 4.10), en la otra, se grafican los espectros de Fourier de estas (Figura 4.11). La gráfica de la esquina superior izquierda de la Figura 4.10, muestra la aceleración versus el desplazamiento previo a su descomposición (o reconstruida con todos los rangos), las siguientes gráficas muestran la relación para cada componente por individual. Con esto se puede observar que hay componentes cuyos ciclos tienen pendientes muy grandes, lo cual, estructuralmente hablando, carece de sentido ya que significaría la respuesta de una estructura de cuerpo rígido. En el otro extremo se tienen componentes con pendientes cercanas a cero, interpretándose como la respuesta de una estructura infinitamente flexible. A partir de este análisis nuevamente se pueden descartar las componentes de los rangos 1, 2, 8, 9, 10, 11 y 12.

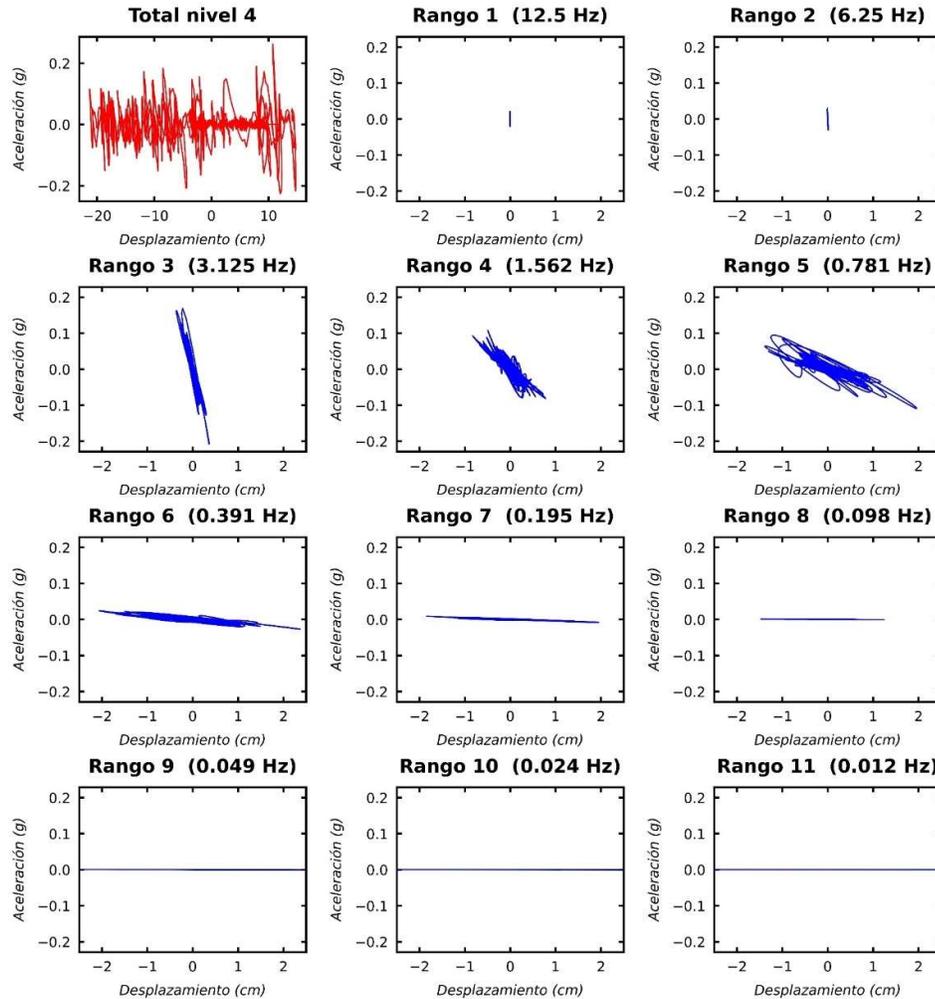


Figura 4.10 Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) total y de las 11 componentes del nivel 4.

Fuente: Elaboración propia

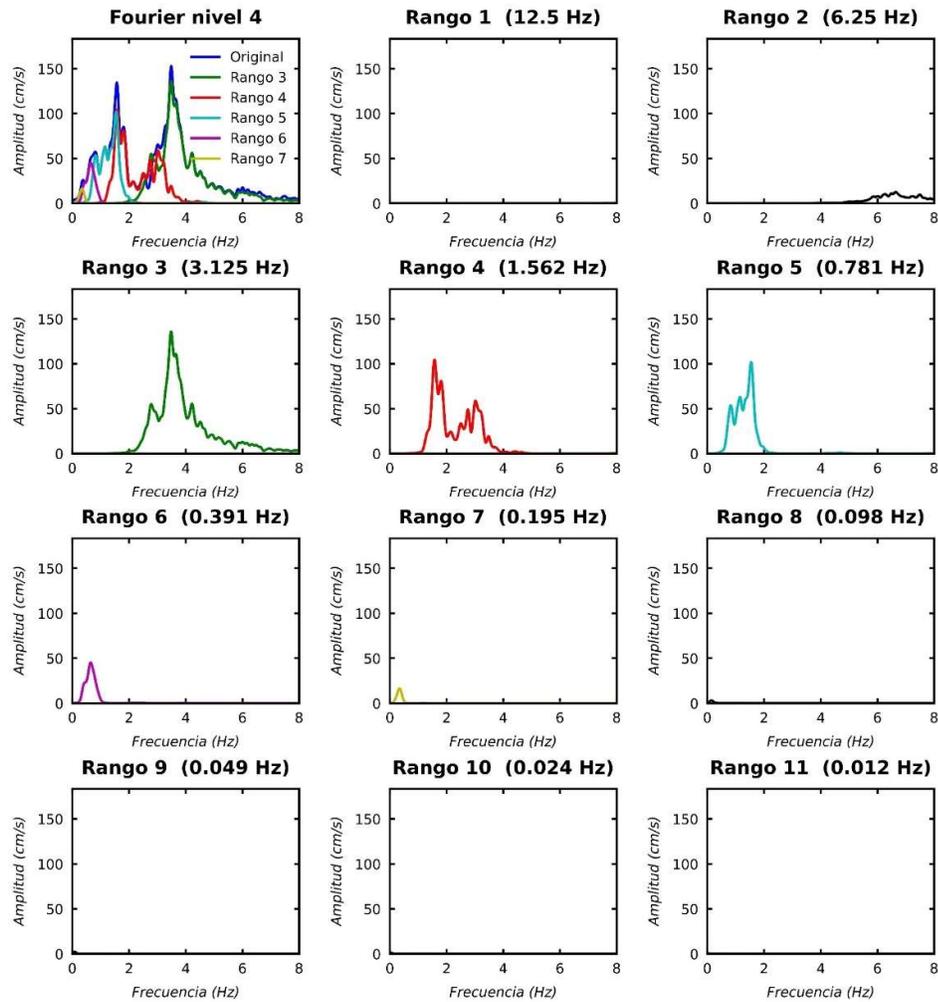


Figura 4.11 Espectros de Fourier normalizados respecto al tiempo de la respuesta original y alterada para las 11 componentes de aceleración del nivel 4.

Fuente: Elaboración propia

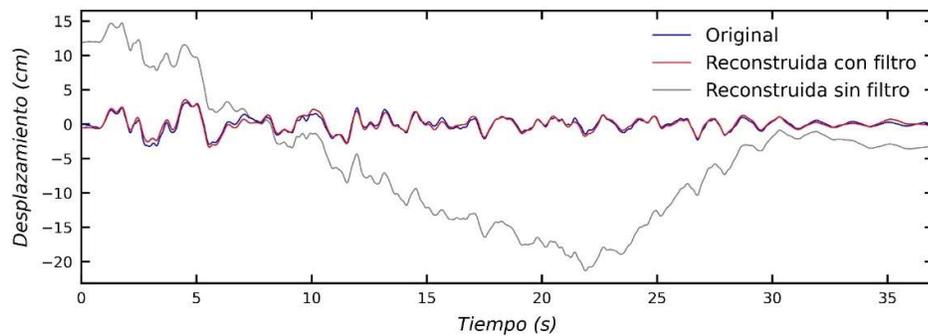


Figura 4.12 Respuesta de desplazamiento original (modelo), respuesta reconstruida con filtro (rango 3+4+5+6+7) y respuesta reconstruida con todos los rangos (sin filtro) para el nivel 4.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.11 muestra los espectros de Fourier de la respuesta de aceleraciones (normalizados respecto al tiempo) original del modelo, y de las 11 componentes respectivas a la respuesta contaminada del nivel 4. En la primera de las gráficas, se ha introducido los espectros de las componentes de aquellos rangos que tienen un intervalo de frecuencias similares y/o contenidos al intervalo de frecuencias de la respuesta original (espectro en azul). Por lo que a partir de las observaciones en las gráficas de la transformada de Wavelets de las aceleraciones, desplazamientos, ciclos de histéresis y espectros de Fourier (Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10 y Figura 4.11 respectivamente), las componentes determinadas para la reconstrucción de la señal (filtrado) en los desplazamientos, son las respectivas a los rangos 3, 4, 5, 6 y 7, cuyo resultado se muestra en la Figura 4.12. El procedimiento seguido para la obtención de estos resultados se resume en el diagrama de flujo de la Figura 4.13.

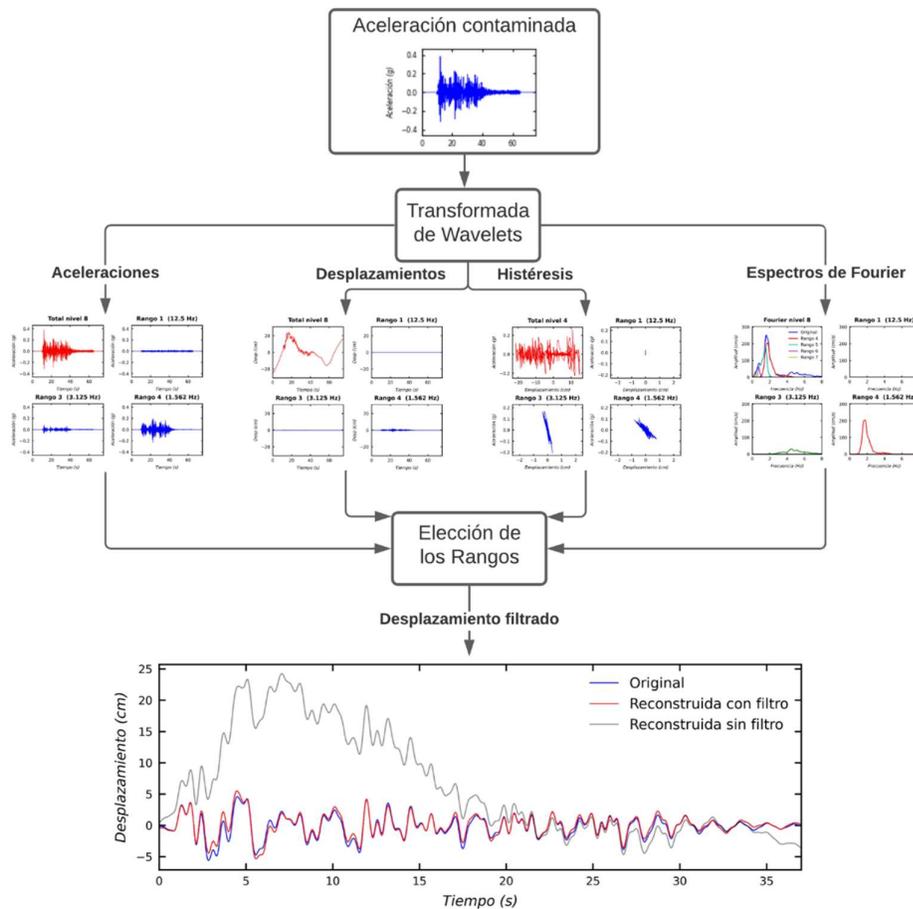


Figura 4.13 Diagrama de flujo del procedimiento para la obtención de señales de desplazamiento filtradas mediante la metodología de la transformada de Wavelets.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestran los resultados obtenidos a partir del mismo procedimiento descrito en el diagrama de flujo de la figura anterior para la respuesta contaminada del nivel 8 del modelo matemático.

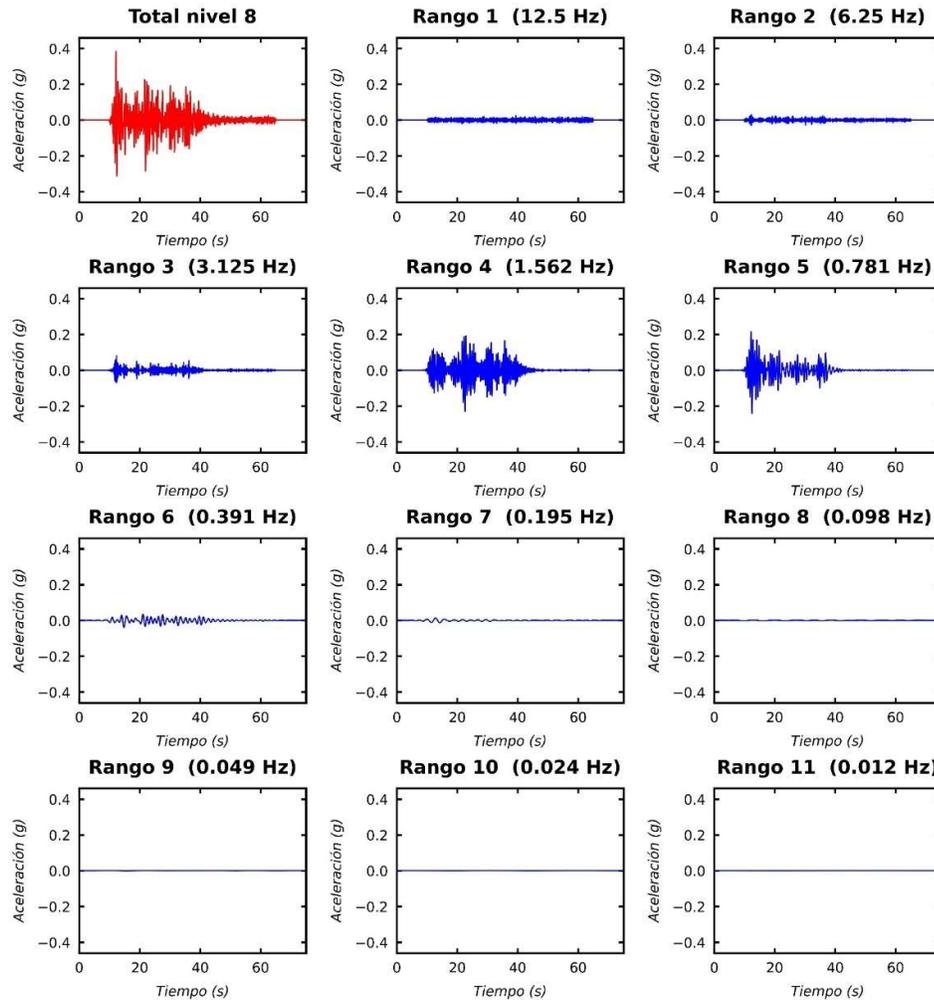


Figura 4.14 Respuesta de aceleraciones alteradas del nivel 8 y sus 11 componentes para cada rango con  $\Delta t=0.02$ .

Fuente: Elaboración propia

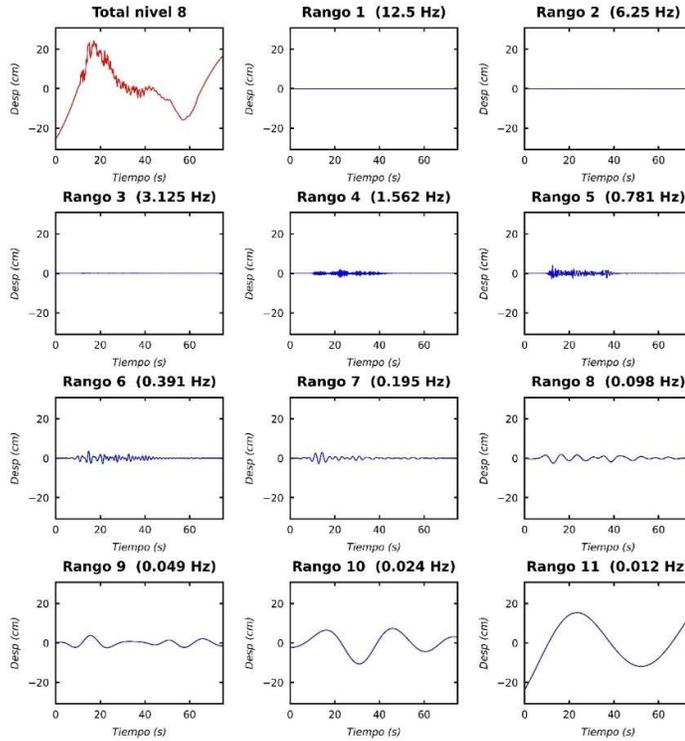


Figura 4.15 Respuesta de desplazamientos alterados Nivel 8 y sus 11 componentes para cada rango con  $\Delta t=0.02$ .

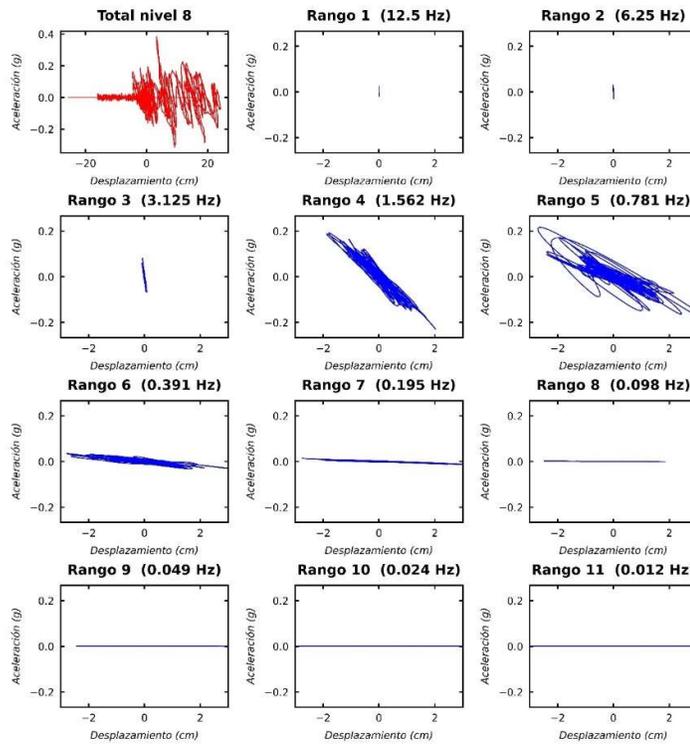


Figura 4.16 Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) total y de las 11 componentes del nivel 8.

Fuente: Elaboración propia

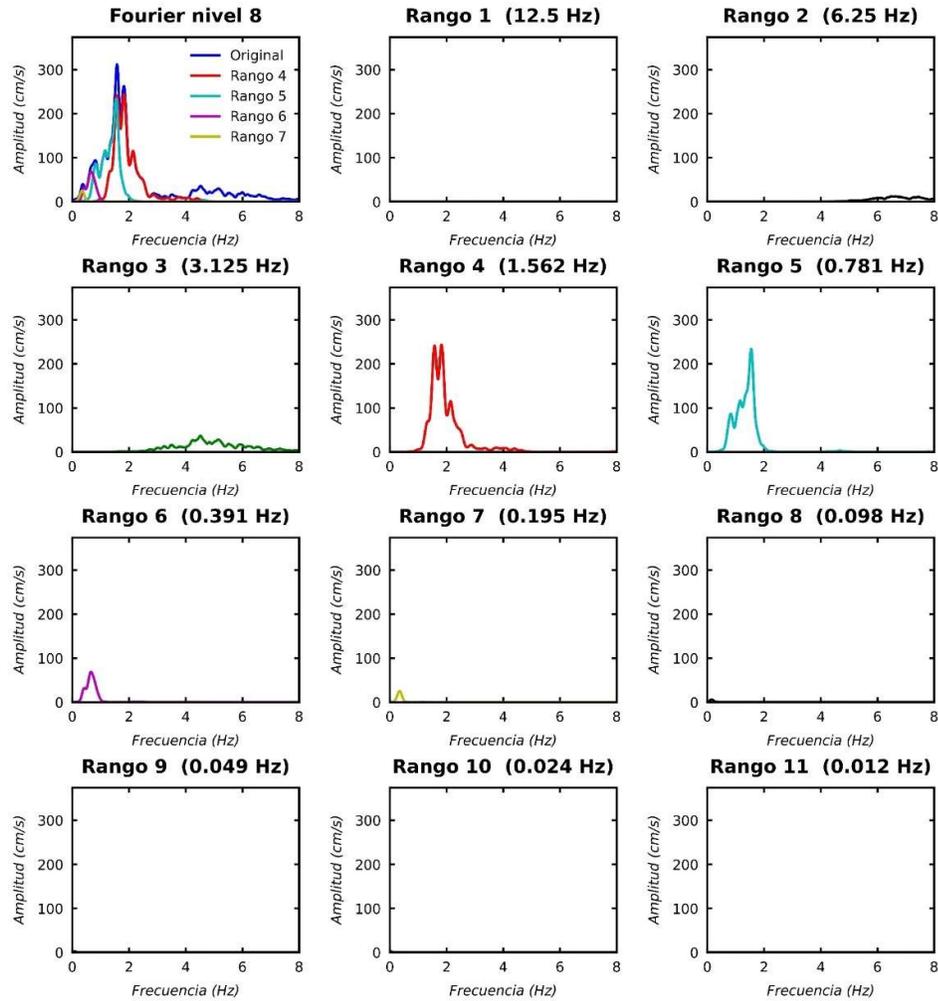


Figura 4.17 Espectros de Fourier normalizados respecto al tiempo de la respuesta original y alterada para las 11 componentes del nivel 8.

Fuente: Elaboración propia

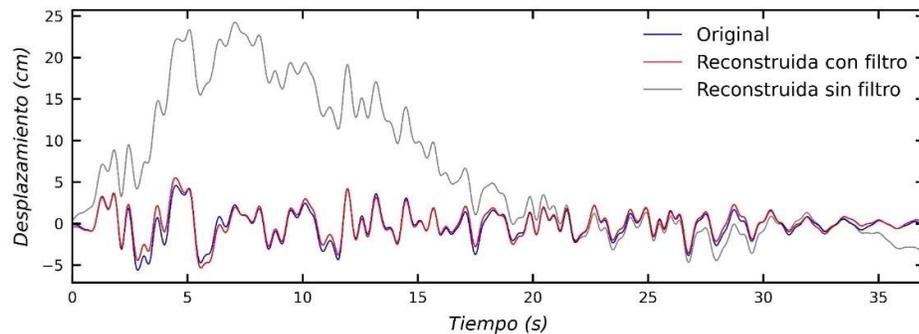


Figura 4.18 Respuesta de desplazamiento original (modelo), respuesta reconstruida con filtro (rango 4+5+6+7) y respuesta reconstruida con todos los rangos (sin filtro) para el nivel 8.

Fuente: Elaboración propia

### 4.2.2 Calibración del modelo

Para la calibración del modelo, se ha hecho una simulación tiempo historia al modelo matemático del CIIFIC, tomando como señal de entrada el registro de aceleraciones horizontales del terreno correspondiente al evento sísmico captado por el sensor itk-00 (ver Figura 3.11) el 11 de diciembre del 2019 con valores de PGA de 15.64 y 9.54 gals en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente. El registro cuenta con un total de 7980 puntos con un muestreo de  $\Delta t = 0.01$  seg o 100 Hz, lo que genera un total de 12 rangos (ver Tabla 2.1). Las aceleraciones registradas, sus espectros de Respuesta de Pseudo Aceleraciones, Pseudo desplazamiento y sus espectros de Fourier se muestran en la Figura 4.19.

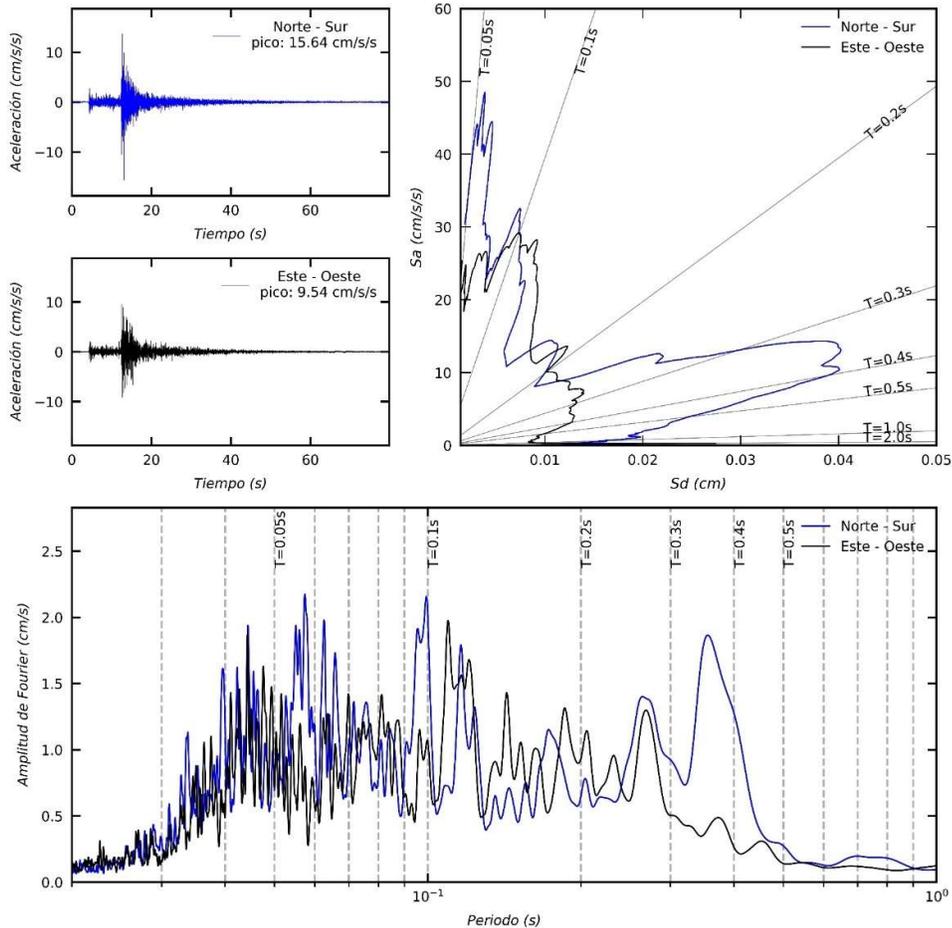


Figura 4.19 Registro de aceleraciones, espectros de respuesta  $S_a$  vs  $S_d$  para un factor de amortiguamiento del 5% y espectros de Fourier normalizados respecto al tiempo, del terreno (sensor itk-00) para ambas direcciones principales.

Fuente: Elaboración propia

En el análisis se aplicó la transformada de Wavelets a las aceleraciones de las dos direcciones principales de los sensores itk-01, 02 y 03 correspondientes a los niveles 0, 2 y 4 del modelo (ver Figura 3.11). Como resultado se obtuvieron 12 componentes de aceleración en cada dirección, de las cuales se generaron los ciclos de histéresis y espectros de Fourier para un análisis tanto en el dominio del tiempo como en el de frecuencias. Con esto se determinaron los rangos partícipes en la reconstrucción de las aceleraciones de los sensores para su filtrado.

Los registros filtrados se compararon con sus respectivas respuestas del modelo para ver la similitud existente entre la respuesta real de los sensores y la teórica del modelo para cada nivel en análisis y así evaluar nivel de calibración del modelo. Este procedimiento se resume en el diagrama de flujo de la Figura 4.20

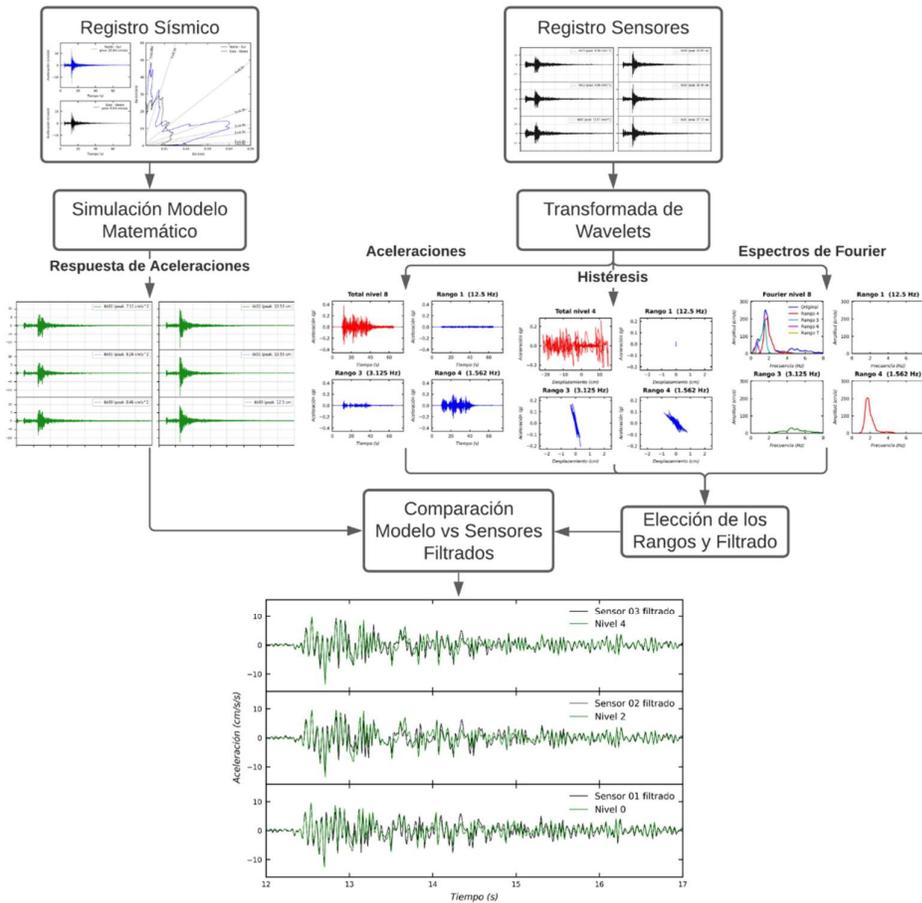


Figura 4.20 Diagrama de flujo para la calibración del modelo.  
Fuente: Elaboración propia

Debido a que el nivel de demanda sísmica utilizada para este análisis (ver Figura 4.19) no es lo suficientemente fuerte como para hacer lograr incursionar a la estructura dentro del rango no lineal, y que al momento de la elaboración de esta investigación no se cuenta con eventos sísmicos registrados que logren tal respuesta, todo el análisis y resultados mostrados a continuación se consideran válidos para el rango lineal elástico.

La respuesta lineal es evidenciada a través de las gráficas de la Figura 4.21 y Figura 4.22, que muestran la relación existente entre la fuerza cortante y el desplazamiento de entre piso (ciclos de histéresis), para cada nivel incluyendo el nivel 0 correspondiente a los aisladores (ver Figura 3.11), en ambas direcciones principales Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente. En estas graficas se aprecia que los aisladores en ves mostrar un modelo de histéresis bilineal (según como se los ha modelado y describe en la Sección 4.1.1), se comportan como resortes lineales elásticos. Para fines prácticos se puede suponer lo mismo para cada nivel de entrepiso.

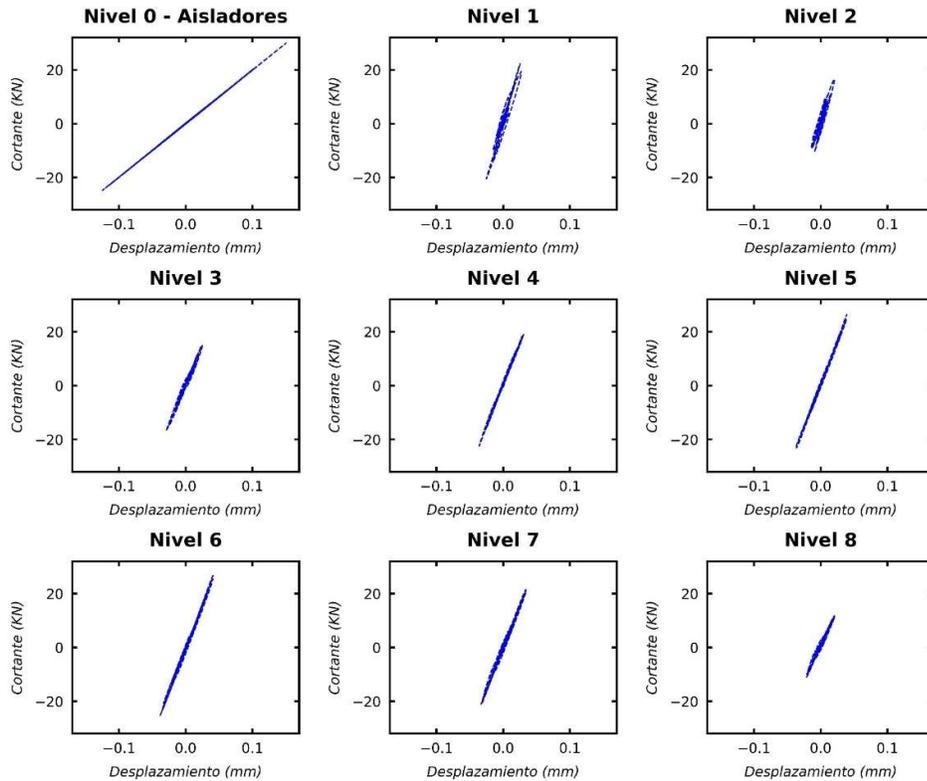


Figura 4.21 Cortante vs desplazamiento de entre piso en la dirección Norte-Sur para cada nivel.

Fuente: Elaboración propia

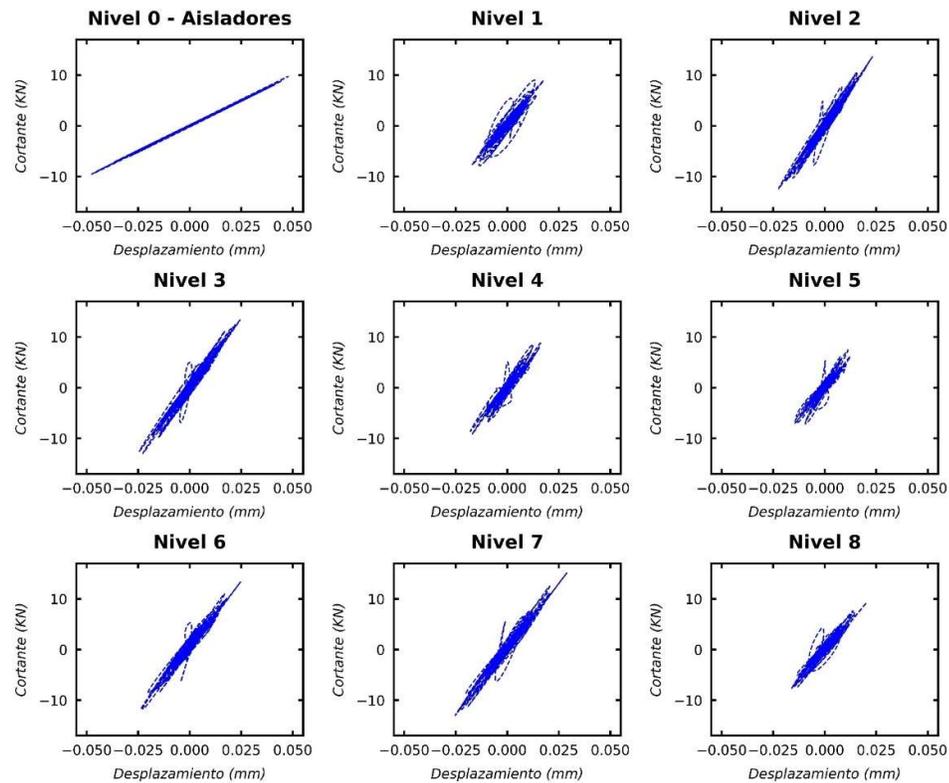


Figura 4.22 Cortante vs desplazamiento de entre piso en la dirección Este-Oeste para cada nivel.

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que este comportamiento lineal elástico se manifiesta principalmente por la acción que generan los aisladores sobre la superestructura de la edificación, ya que la demanda impartida por el registro sísmico no es lo suficientemente significativa como para lograr que tanto la estructura como los aisladores incursionen dentro del rango no lineal, lo que hace que la demanda sísmica recibida en cada nivel de esta sea significativamente menor. A continuación, se desarrolla el procedimiento del diagrama de flujo de la Figura 4.20 para determinar la aproximación que existe entre los registros de aceleraciones de los sensores itk-01, 02 y 03, luego de aplicarles la transformada de Wavelets para su filtrado, y las respuestas del modelo en los niveles donde se encuentran instalados (niveles 0, 2 y 4 respectivamente, ver Figura 3.11). Al hacer esta comparación y ver el nivel de semejanza existente entre las señales filtradas de los sensores (respuesta real) y las respuestas del modelo (respuesta teórica) tanto en amplitudes como en forma, se podrá decir si el modelo se encuentra lo suficientemente calibrado para el fin de esta investigación.

La Figura 4.23 muestra las aceleraciones del sensor 03 (nivel 4) relativas al terreno para la dirección Norte-Sur y el resultado de su descomposición por aplicación de la transformada de Wavelets en el dominio del tiempo para los 8 primeros rangos. La Figura 4.24 muestra la relación de aceleraciones versus desplazamientos (ciclos de histéresis) para este mismo sensor y dirección en cada descomposición o rangos, siendo la primera gráfica en rojo (esquina superior izquierda) la composición del total de rangos generados (sin aplicar el filtro) producto de la transformada de Wavelets (o que es lo mismo decir, de la señal original del sensor 03).

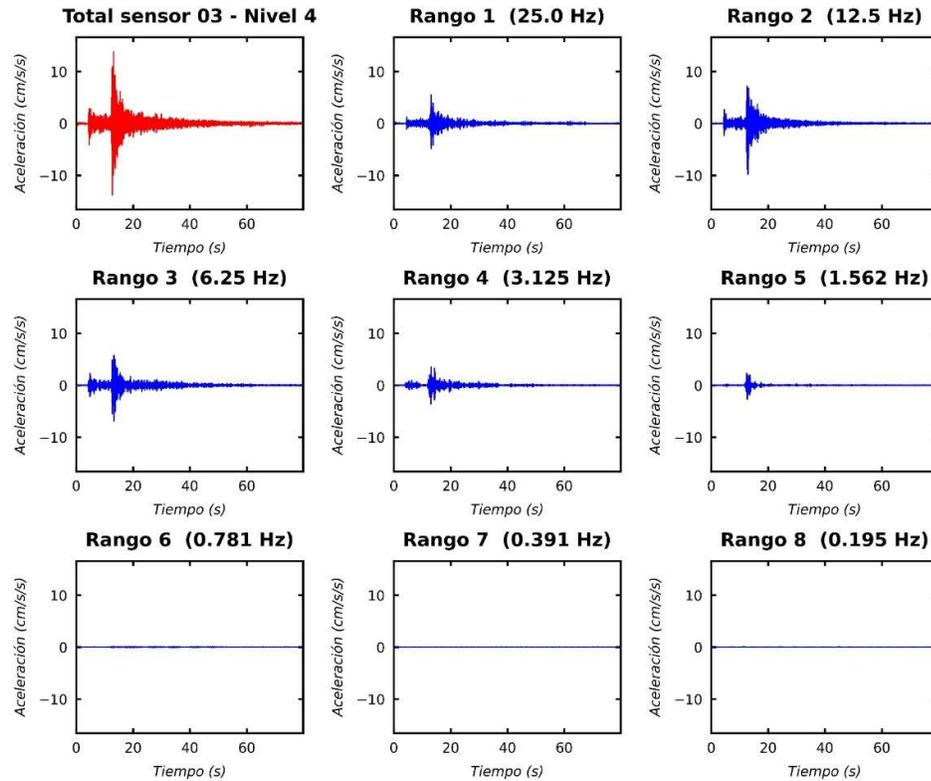


Figura 4.23 Registro de aceleraciones del sensor 03 – nivel 4 y sus 8 primeras componentes con  $\Delta t=0.01$  en dirección Norte - Sur.

Fuente: Elaboración propia

El resto de gráficas (color azul) en la Figura 4.24 muestran las Histéresis de cada rango por individual. Con estas gráficas se tiene una primera impresión de los rangos tentativos para la reconstrucción de la señal dada la pendiente de los ciclos, teniendo esto en cuenta, pueden ser consideradas las componentes correspondientes a los rangos 2, 3, 4, 5 y posiblemente 6 para la reconstrucción (filtrado) de la señal.

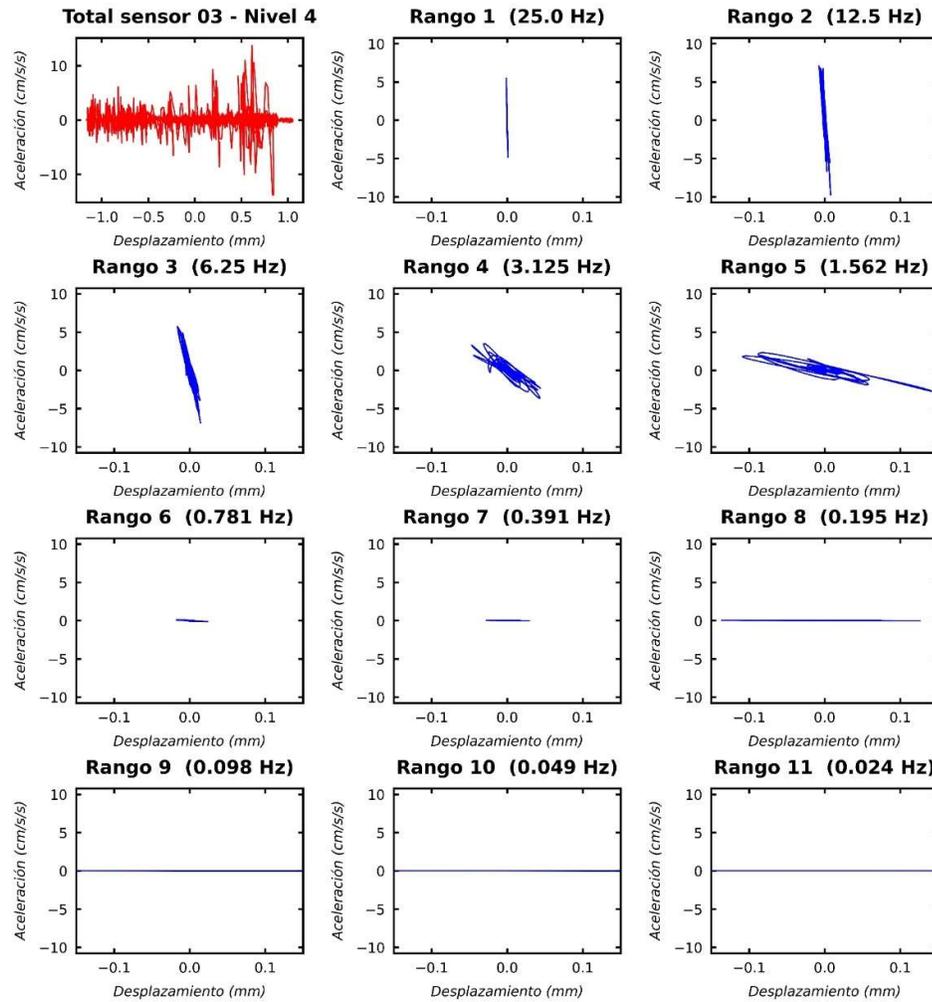


Figura 4.24 Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) total y de las 11 componentes del sensor 03 correspondiente al nivel 4 en la dirección Norte-Sur.

Fuente: Elaboración propia

La primera gráfica de la Figura 4.25 (gráfica en color azul, denominada “Original”), muestra el espectro de Fourier de la respuesta del modelo en aceleraciones del nivel 4 (itk-03), que es tomada con base de comparación, y los rangos que tienen un intervalo de frecuencias y amplitudes similares al espectro de Fourier base, las siguientes gráficas son los espectros de Fourier de los rangos de la Figura 4.23, en ellas se ven que no todos los espectros son envueltos por el espectro base (ver espectro del rango 3 Figura 4.25), sin embargo esto no quiere decir que el rango deba descartarse ya que este se encuentra dentro del intervalo de frecuencias que contribuyen a la respuesta dinámica del modelo, lo cual se aprecia en la Figura 4.23 y Figura 4.24, para decidir si el rango 3 debería descartarse o no, se debe

ver la contribución de este en su combinación con otros rangos luego de definir algunos parámetros de error de estas combinaciones o combos entre rangos.

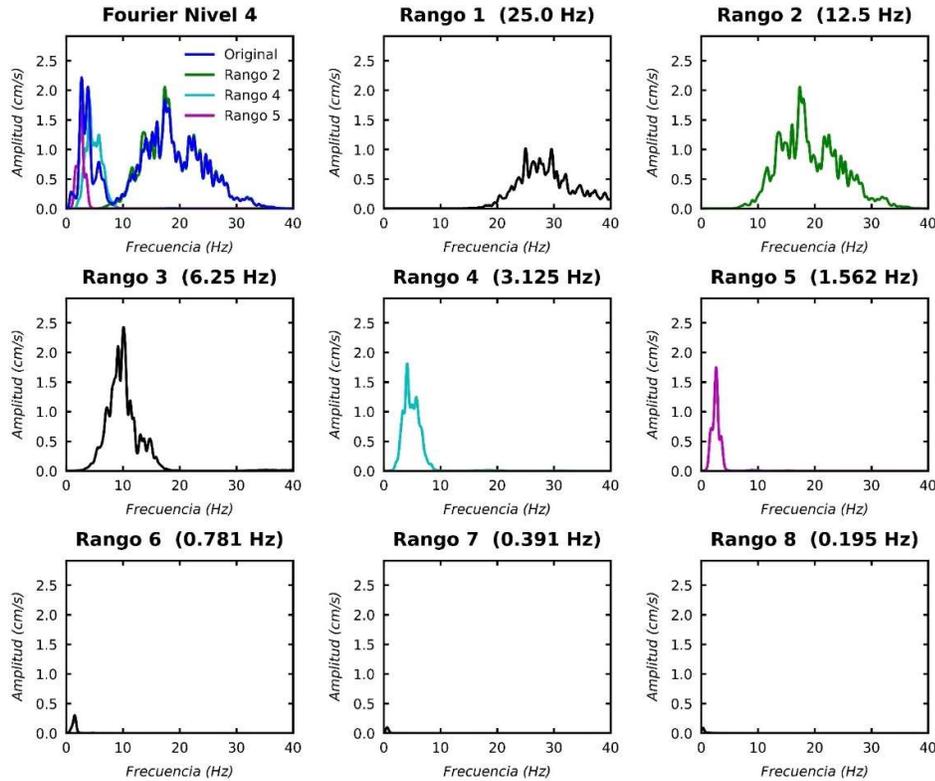


Figura 4.25 Espectros de Fourier de aceleraciones del nivel 4 del modelo y de las 8 primeras componentes del sensor 03 en dirección Norte - Sur.

Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista del dominio del tiempo (Figura 4.23 y Figura 4.24), se podría considerar tomar los rangos del 2 al 5 y posiblemente el 6, ya que estos tienen aceleraciones significativas y están contenidos en un intervalo de frecuencias que envuelven a las frecuencias respuesta del modelo matemático, además las pendientes de los ciclos de histéresis son estructuralmente consistentes, sin embargo, desde la perspectiva del dominio de la frecuencia (Figura 4.25) se ve que el rango 3 tiene un intervalo de frecuencias y amplitud de Fourier que no es envuelta por el espectro base. A continuación, la Tabla 4.2 muestra un resumen de los resultados obtenidos al probar las diferentes combinaciones o combos de rangos que inicialmente fueron considerados. Los parámetros para medir el error de la combinación de rangos fueron la diferencia porcentual entre picos máximos ( $\Delta picos (\%)$ ) y la raíz cuadrada de la esperanza del cuadrado de los errores o RMSE (por sus siglas en ingles) para las respuestas

del modelo estructural y las señales de los registros reconstruidas con las combinaciones de rangos correspondiente en la dirección Norte-Sur para todos los niveles monitoreados. De esta tabla se puede observar los combos donde se incluye al rango 3 tienen un mayor indicador de error y que en general los indicadores de error más bajos son los obtenidos a partir de la combinación de los rangos 2, 4 y 5, de esta forma se descarta el uso del rango 3 y se toma el combo de rango 2, 4 y 5 para la reconstrucción (filtrado) de las señales de aceleración en todos los niveles analizados, este resultado se muestra en la Figura 4.26

Tabla 4.2 Resultados del filtrado para diferentes combinaciones de rango en la dirección Norte-Sur de todos los niveles monitoreados.

Rangos	Sensor 03–Nivel 4		Sensor 02–Nivel 2		Sensor 01–Nivel 0	
	RMSE (gals)	$\Delta$ picos (%)	RMSE (gals)	$\Delta$ picos (%)	RMSE (gals)	$\Delta$ picos (%)
2+3+4+5+6	2.01	6.94	2.05	12.44	2.35	18.88
3+4+5+6	2.80	58.17	2.84	56.24	3.08	57.69
2+3+4+5	2.01	7.58	2.05	12.90	2.35	19.26
2+4+5+6	1.11	3.71	1.34	9.61	1.34	8.95
2+4+5	1.11	3.07	1.39	9.15	1.34	8.57
3+4+5	2.80	57.52	2.84	55.79	3.08	57.31

Fuente: Elaboración propia

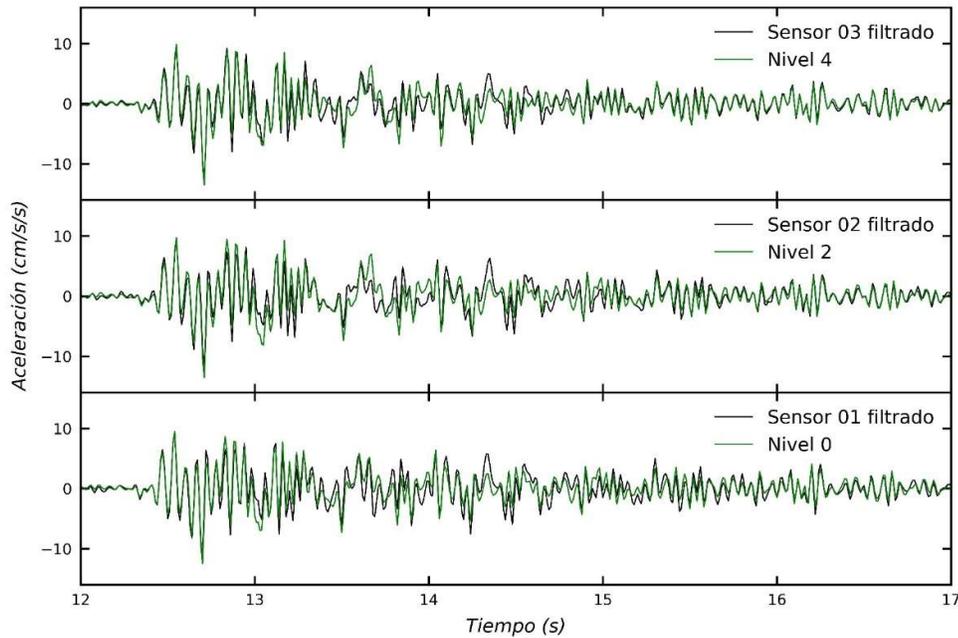


Figura 4.26 Respuesta de aceleración original (modelo) y respuesta reconstruida con filtro (rango 2+4+5) para el nivel 4 sensor itk-03 dirección Norte-Sur.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 4.26 muestra que existe una gran similitud entre el modelo matemático y la respuesta real de la estructura luego del filtrado de sus señales a través de la transformada de Wavelets en el rango lineal elástico.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al realizar el mismo análisis en la dirección Este-Oeste, llegándose a tener que en general el combo 2+4 es el que tiene los indicadores de error más bajos.

Tabla 4.3 Resultados del filtrado para diferentes combinaciones de rango en la dirección Este-Oeste de todos los niveles monitoreados.

Rangos	Sensor 03–Nivel 4		Sensor 02–Nivel 2		Sensor 01–Nivel 0	
	RMSE (gals)	$\Delta$ picos (%)	RMSE (gals)	$\Delta$ picos (%)	RMSE (gals)	$\Delta$ picos (%)
2+4	1.00	20.12	1.89	20.94	2.41	4.44
2+5	1.15	13.92	1.25	37.83	1.22	28.61
2+4+5	1.00	24.65	1.91	29.40	2.44	13.84
2+5+6	1.15	16.37	1.26	37.09	1.22	28.38
2+4+5+6	1.01	22.20	1.91	28.66	2.44	13.61

Fuente: Elaboración propia

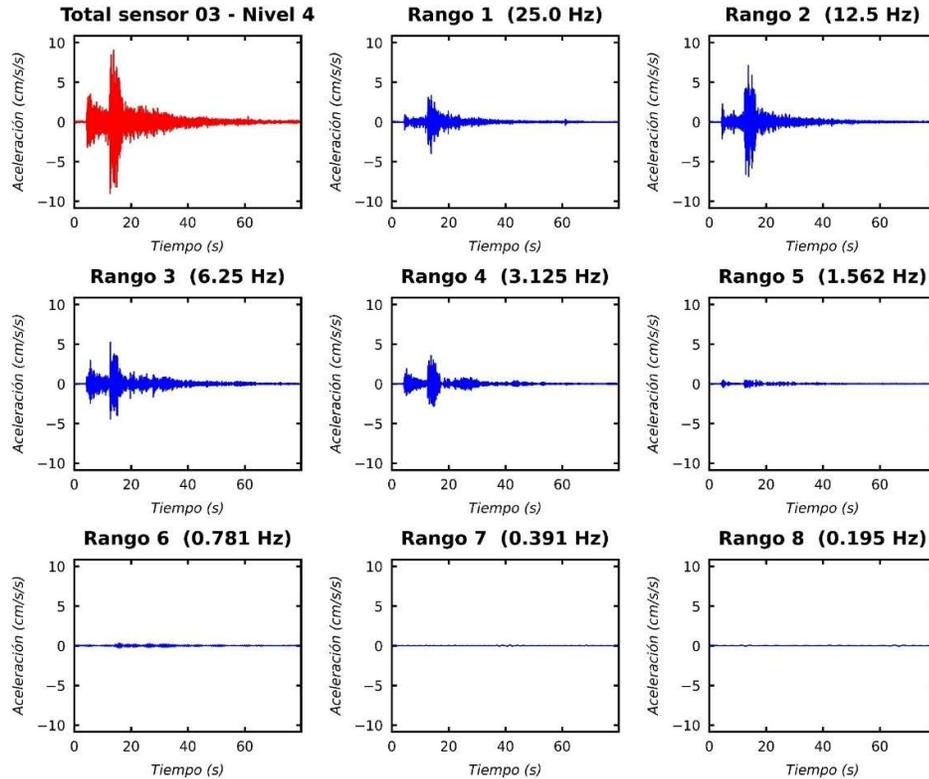


Figura 4.27 Registro de aceleraciones del sensor 03 – nivel 4 y sus 8 primeras componentes con  $\Delta t=0.01$  en dirección Este - Oeste.

Fuente: Elaboración propia

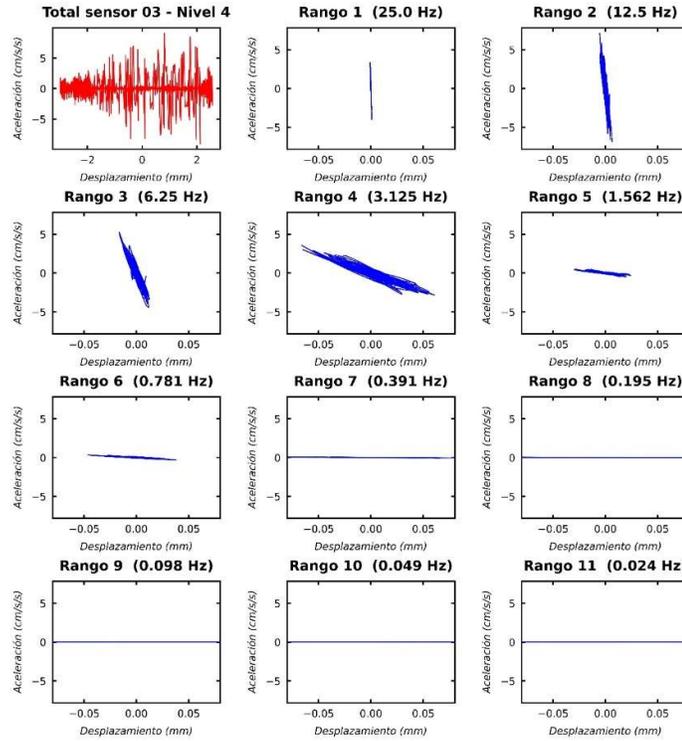


Figura 4.28 Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) total y de las 11 componentes del sensor 03 correspondiente al nivel 4 en la dirección Este-Oeste.  
Fuente: Elaboración propia

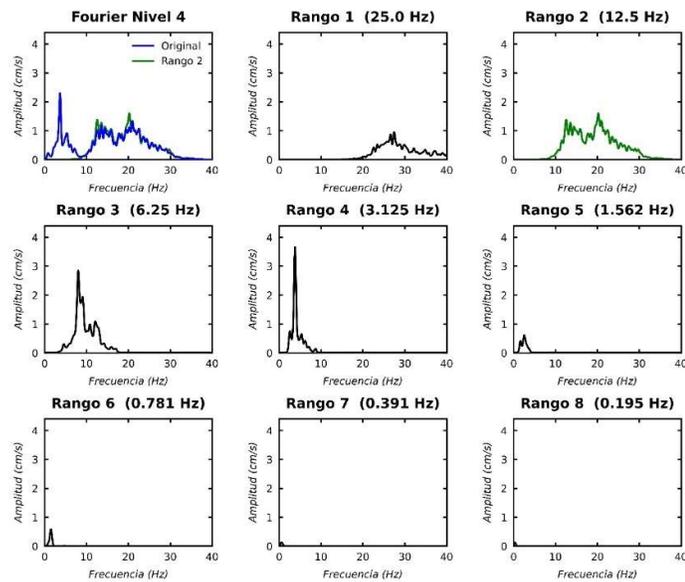


Figura 4.29 Espectros de Fourier de aceleraciones del nivel 4 del modelo y de las 8 primeras componentes del sensor 03 en dirección Este – Oeste.  
Fuente: Elaboración propia

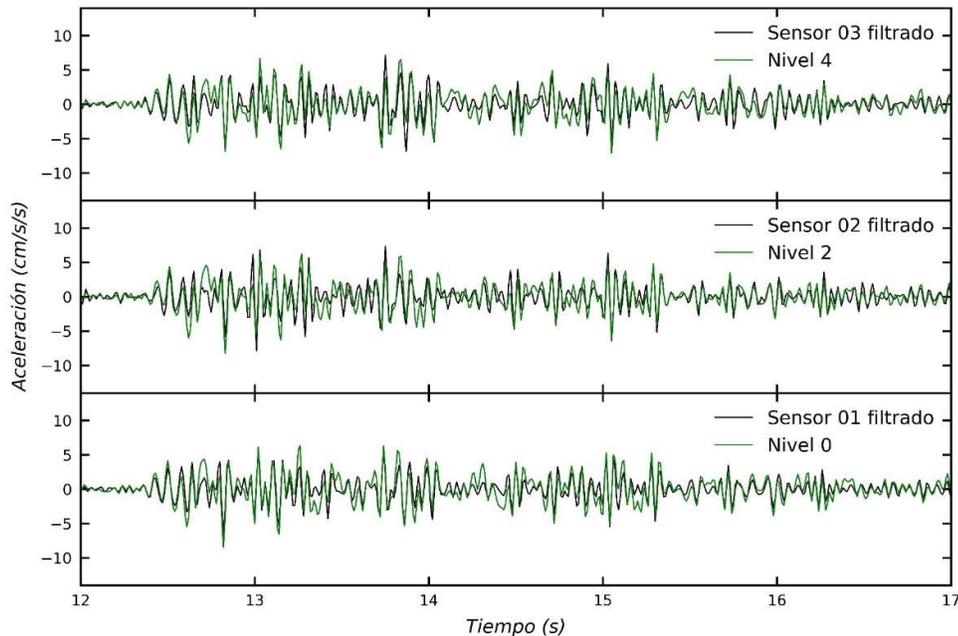


Figura 4.30 Respuesta de desplazamiento original (modelo) y respuesta reconstruida con filtro (rango 2+4) para el nivel 4 sensor itk-03 dirección Este-Oeste.

Fuente: Elaboración propia

Como puede observarse en la Figura 4.26 y Figura 4.30, existe una buena aproximación, tanto en forma como en amplitudes, entre la respuesta teórica del modelo matemático y la respuesta real de su estructura proporcionada por los sensores luego de la aplicación de la transformada de Wavelets para su filtrado, con esto se puede decir que para fines de esta investigación el modelo se encuentra correctamente calibrado, representando satisfactoriamente el comportamiento real de la componente estructural del CIIFIC en el intervalo lineal elástico de la respuesta dinámica. Por otro lado, no se hace esta misma afirmación para el caso de la respuesta dinámica en el intervalo no lineal debido a que para esto se necesitaría una demanda sísmica lo suficientemente fuerte como para activar los aisladores y hacerlo incursionar dentro de este intervalo junto con los entresijos del modelo estructural. Esto es mencionado debido a que al momento de esta investigación no se ha producido un evento de tal magnitud que pueda ser captado por los sensores.

Para los siguientes análisis se hace la suposición de que el nivel de calibración es aplicable a la respuesta dinámica del modelo matemático dentro del intervalo no lineal, lo cual (para efectos prácticos) es válido en la finalidad de esta investigación.

## CAPÍTULO V: ESTUDIO DE LA RESPUESTA SÍSMICA

### 5.1 REGISTROS SÍSMICOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos a partir de las simulaciones tiempo historia realizadas al modelo matemático, para las cuales se emplearon como demanda sísmica los registros de la Tabla 5.1. Los datos de las estaciones de origen donde fueron captados los registros sísmicos utilizados se muestran en la Tabla 5.2. Como se puede observar en la Figura 5.1, no todas las estaciones están ubicadas en la ciudad de Lima por lo que estos registros fueron escalados tomando como espectro objetivo el Espectro de Peligro Uniforme (EPU) de Lima para un periodo de retorno de 2475 años (probabilidad de excedencia del 2 % en 50 años) (Zenon, n.d.) en un suelo tipo  $S_1$ , con la finalidad de generar registros sintéticos con espectros de respuesta semejantes al espectro característico de la zona en estudio. El escalamiento se hizo mediante el uso del programa SeismoMatch 2018, el cual utiliza un algoritmo propuesto por (Hancock et al., 2006) en base a la transformada de Wavelets



Figura 5.1 Mapa de estaciones acelerográficas.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.1 Registros sísmicos.

ID Registro	Latitud	Longitud	Fecha	Magnitud	PGA (Gals)		Profundidad
					NS	EO	
Tacna 2010	-18.34°	-71.17°	05/05/2010	6.5 MI	184.0	112.0	36.0 Km
Pisco 2007	-13.67°	-76.76°	15/08/2007	7.0 MI	42.9	74.5	40.0 Km
Huaraz 1970	-9.36°	-78.87°	31/05/1970	6.6 Mb	97.8	105.1	64.0 Km
Lima Nov 1974	-12.50°	-77.98°	03/10/1974	6.0 Mb	67.0	46.3	12.8 Km
Lima Oct 1974	-12.52°	-77.59°	09/11/1974	6.6 Mb	179.0	192.5	13.0 Km
Iquique 2005	-19.61°	-69.97°	13/06/2005	7.2 MI	100.4	119.1	146.0 Km
Lima 1996	-10.70°	-78.70°	17/10/1966	6.3 MI	269.3	180.6	24.0 Km

Fuente: IGP

Tabla 5.2 Estaciones acelerográficas.

ID Registro	Estación	Nombre	Latitud	Longitud
Tacna 2010	TAC001	Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann	-18.02°	-70.25°
Pisco 2007	CSM	CISMID-FIC-UNI	-12.01°	-77.05°
Huaraz 1970	PRQ	Parque de la Reserva	-12.07°	-77.04°
Lima Nov 1974	PRQ	Parque de la Reserva	-12.07°	-77.04°
Lima Oct 1974	PRQ	Parque de la Reserva	-12.07°	-77.04°
Iquique 2005	TAC002	Alberto Giesecke Matto	-18.01°	-70.23°
Lima 1996	PRQ	Parque de la Reserva	-12.07°	-77.04°

Fuente: CISMID.

La Figura 5.2 muestra los espectros de respuesta de pseudo aceleración versus periodo del terreno de los registros sintéticos generados para las simulaciones tiempo historia correspondientes a los 7 registros utilizados. En las gráficas se puede observar cómo los registros escalados tienen la forma del EPU manteniendo el contenido de frecuencia de su registro de origen.

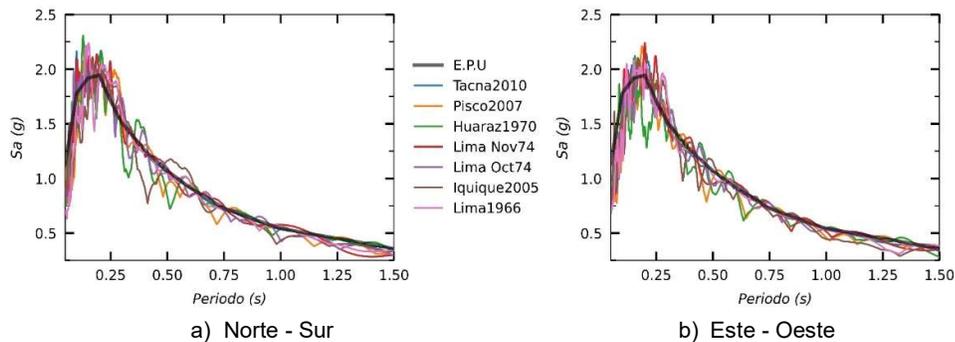


Figura 5.2 Espectro de respuesta de sismos sintéticos y espectro de peligro uniforme (EPU), con periodo de retorno de 2475 años, en la dirección a) Norte-Sur y b) Este-Oeste.

Fuente: Elaboración propia

La Figura 5.3 muestra los puntos de coordenadas de las aceleraciones de los registros sintéticos en el plano horizontal. De estas graficas se observa que las aceleraciones no tienen alguna predominancia en alguna dirección en específico, esto se debe principalmente a que para efectos prácticos se utilizó el mismo espectro de peligro uniforme para el escalamiento en cada dirección por independiente o considerando un ángulo de incidencia de los eventos sismos de 45° respecto a los ejes principales de la estructura.

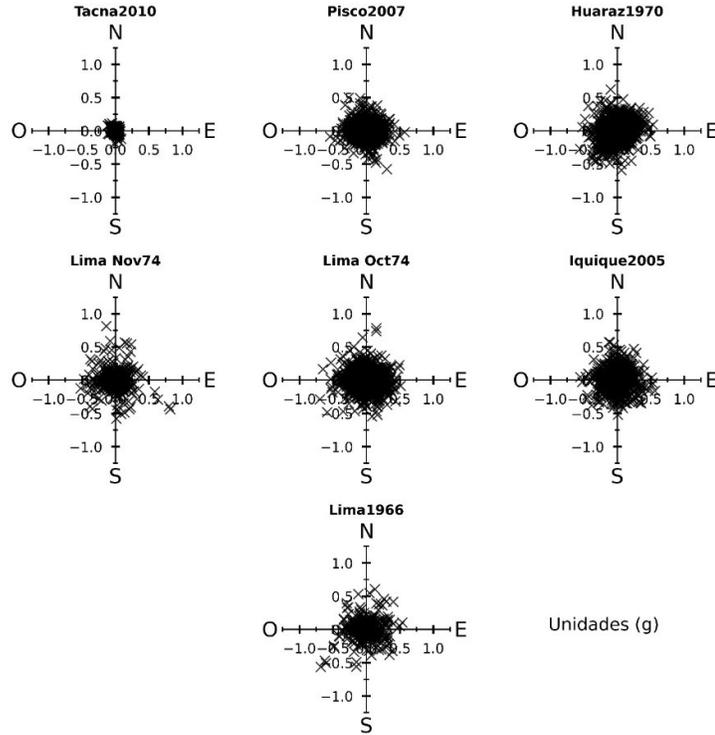


Figura 5.3 Puntos de coordenadas (aceleración en Este-Oeste y Norte-Sur) para los registros sintéticos con periodo de retorno de 2475 años.

Fuente: Elaboración propia

## 5.2 RESPUESTA SÍSMICA ELÁSTICA

En esta sección se muestra la respuesta sísmica obtenida producto de las simulaciones tiempo historia de los registros sintéticos de la Figura 5.2. En primera instancia la Tabla 5.3 y Tabla 5.4 muestran las aceleraciones máximas obtenidas para las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente para cada nivel del modelo matemático y para cada registro sintético.

Tabla 5.3 Aceleraciones máximas por niveles relativos al terreno en dirección Norte-Sur respuesta elástica.

Sismo	Tacna 2010 (g)	Pisco 2007 (g)	Huaraz 1970 (g)	Lima Nov74 (g)	Lima Oct74 (g)	Iquique 2005 (g)	Lima 1996 (g)
Nivel 0	0.881	0.561	0.721	0.772	0.629	0.561	0.604
Nivel 1	0.940	0.594	0.690	0.817	0.723	0.609	0.597
Nivel 2	0.954	0.573	0.644	0.808	0.780	0.623	0.602
Nivel 3	0.965	0.603	0.629	0.796	0.789	0.612	0.625
Nivel 4	0.980	0.627	0.637	0.815	0.796	0.581	0.645
Nivel 5	0.987	0.606	0.637	0.821	0.795	0.547	0.642
Nivel 6	0.977	0.540	0.638	0.797	0.785	0.569	0.681
Nivel 7	0.969	0.593	0.660	0.761	0.768	0.590	0.721
Nivel 8	0.963	0.635	0.680	0.741	0.764	0.603	0.737

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.4 Aceleraciones máximas por niveles relativas al terreno en dirección Este-Oeste respuesta elástica.

Sismo	Tacna 2010 (g)	Pisco 2007 (g)	Huaraz 1970 (g)	Lima Nov74 (g)	Lima Oct74 (g)	Iquique 2005 (g)	Lima 1996 (g)
Nivel 0	0.853	0.640	0.615	0.751	0.767	0.600	0.658
Nivel 1	0.933	0.677	0.613	0.830	0.802	0.608	0.765
Nivel 2	0.991	0.614	0.583	0.850	0.762	0.592	0.797
Nivel 3	1.015	0.550	0.576	0.859	0.701	0.573	0.796
Nivel 4	1.019	0.581	0.610	0.865	0.688	0.556	0.772
Nivel 5	1.026	0.553	0.619	0.850	0.712	0.548	0.756
Nivel 6	1.038	0.588	0.588	0.827	0.734	0.567	0.753
Nivel 7	1.047	0.597	0.619	0.821	0.751	0.587	0.754
Nivel 8	1.052	0.617	0.669	0.822	0.757	0.679	0.756

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 5.3 y Tabla 5.4 se tiene que las respuestas máximas de mayor amplitud (en valor absoluto) en aceleraciones son de 0.987g (nivel 5) y 1.052g (nivel 8) para las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente, correspondientes al registro sintético Tacna 2010, mientras que las respuestas máximas de menor amplitud (en valor absoluto) son de 0.54g (nivel 6), para la dirección Norte-Sur correspondiente al registro sintético Pisco 2007 y de 0.548g (nivel 5), para la dirección Este-Oeste correspondiente a Iquique 2005. A continuación,

la Tabla 5.5 y Tabla 5.6 muestran la distorsiones máximas de entrepiso  $\Delta$  (respecto a la base de la superestructura o nivel 0, ver Figura 3.11) para cada registro sintético simulado en ambas direcciones, y la Figura 5.4 muestra estos mismos resultados de forma gráfica, donde se puede apreciar que las máximas respuestas de distorsión se dan para la simulación de Iquique 2005 (Norte-Sur) y la simulación de Lima 1966 (Este-Oeste).

Tabla 5.5 Distorsiones máximas por niveles en dirección Norte-Sur respuesta elástica.

Sismo	Tacna 2010 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Pisco 2007 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Huaraz 1970 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Lima Nov74 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Lima Oct74 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Iquique 2005 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Lima 1996 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )
Nivel 1	2.700	2.774	2.726	3.100	2.579	3.390	3.100
Nivel 2	2.013	2.101	1.853	2.018	1.906	2.646	1.987
Nivel 3	2.289	2.277	2.012	2.251	2.010	3.001	2.147
Nivel 4	1.953	2.035	1.686	2.164	1.673	2.615	1.995
Nivel 5	1.545	1.910	1.553	1.901	1.384	2.224	1.715
Nivel 6	1.191	1.633	1.400	1.538	1.338	1.750	1.371
Nivel 7	0.870	1.323	1.069	1.060	1.053	1.237	0.983
Nivel 8	0.562	0.763	0.644	0.621	0.643	0.779	0.602

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5.6 Distorsiones máximas por niveles en dirección Este-Oeste respuesta elástica.

Sismo	Tacna 2010 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Pisco 2007 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Huaraz 1970 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Lima Nov74 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Lima Oct74 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Iquique 2005 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Lima 1996 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )
Nivel 1	3.054	3.146	2.670	3.006	3.436	3.741	3.944
Nivel 2	2.412	2.406	2.335	2.355	3.017	2.699	2.927
Nivel 3	2.340	2.444	2.318	2.362	3.373	2.626	2.935
Nivel 4	2.184	2.379	2.394	2.222	3.352	2.587	2.763
Nivel 5	1.876	2.136	2.230	2.011	3.129	2.450	2.490
Nivel 6	1.687	1.789	2.028	2.085	2.638	2.156	2.140
Nivel 7	1.307	1.391	1.587	1.670	1.970	1.683	1.664
Nivel 8	0.831	0.973	1.056	1.063	1.338	1.112	1.086

Fuente: Elaboración propia.

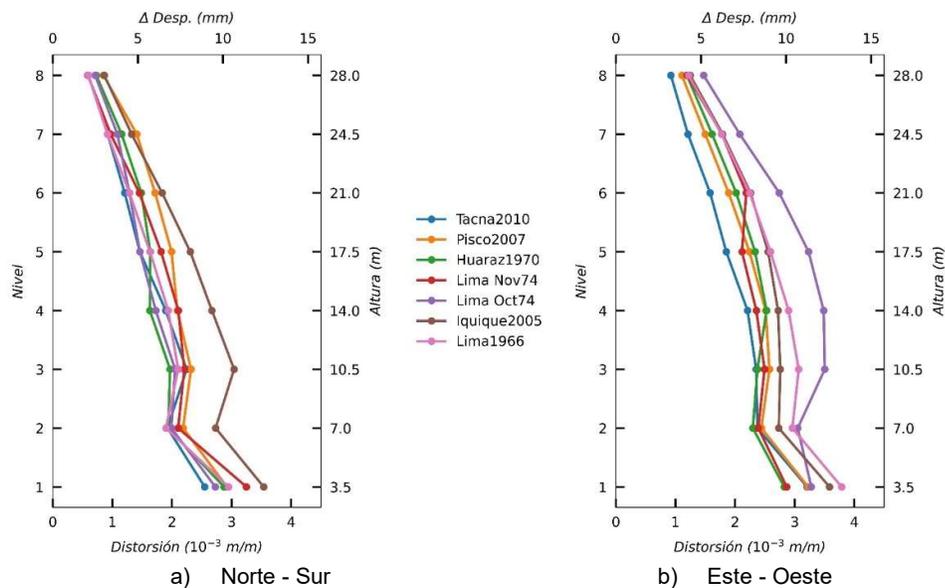


Figura 5.4 Distorsiones máximas de entrepiso a) Norte-Sur y b) Este-Oeste para la respuesta elástica.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, la Tabla 5.7 muestra las distorsiones máximas del nivel 0 correspondientes a los aisladores en la base (nivel del terreno natural) para cada registro sintético simulado.

Tabla 5.7 Distorsiones máximas del nivel 0 (aisladores) respuesta elástica.

Sismo	Norte-Sur ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Este-Oeste ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )
Tacna 2010	338.13	368.44
Pisco 2007	307.38	378.69
Huaraz 1970	354.85	234.98
Lima Nov74	486.96	404.93
Lima Oct74	298.90	380.72
Iquique 2005	440.28	433.68
Lima 1996	438.77	445.28

Fuente: Elaboración propia

A partir de las respuestas de desplazamientos relativos al terreno natural, se han determinado las órbitas de los niveles 1 y 8, las cuales se muestran en la Figura 5.5, provenientes de las simulaciones de los registros sintéticos. En las gráficas se observa el desarrollo de las posiciones de puntos aproximados al centro de masas de los niveles para cada paso de tiempo desde una perspectiva en planta. Las gráficas muestran que los desplazamientos máximos se encuentran en el orden de los 20 cm, y dado a que la edificación se encuentra separada de las estructuras vecinas a una distancia mínima de 100 cm, no existe riesgo de colisión para ninguno de los análisis tiempo historia realizados.

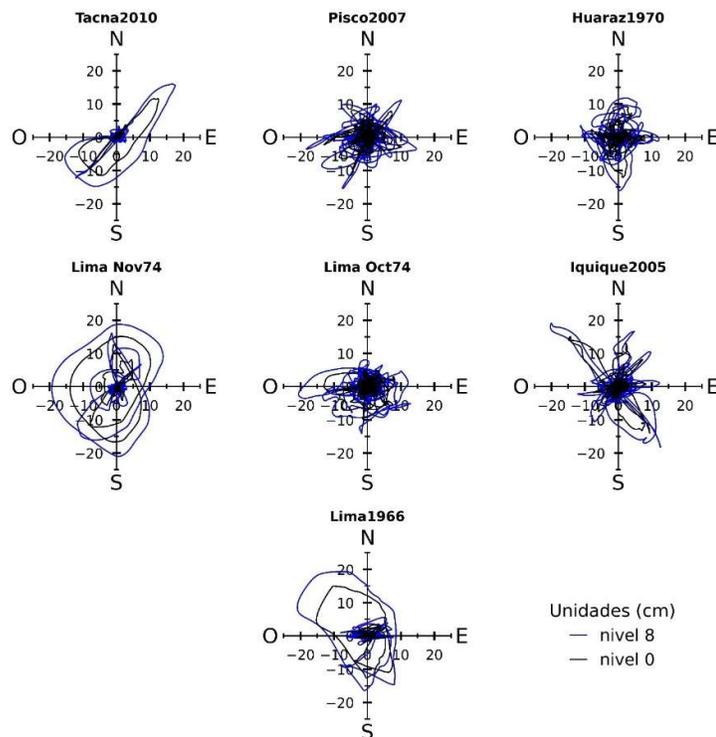


Figura 5.5 Órbitas de las respuestas en desplazamientos de los Niveles 1 y 8 para cada sismo sintético simulado.

Fuente: Elaboración propia

El ANEXO 2 muestra el detalle de la demanda sísmica de cada registro sintético (aceleraciones, espectros de respuesta y espectros de Fourier), juntamente con las gráficas de las respuestas dinámicas del modelo para cada uno de estos registros simulados (aceleraciones y desplazamientos respecto al terreno, ciclos de histéresis y curvas de capacidad por nivel), donde se puede observar la incursión de los aisladores en el rango no lineal (forma bilineal de los ciclos de histéresis) mientras que para los entrepisos de la estructura, se puede decir que la respuesta se mantiene aproximadamente lineal elástica. Según la Tabla 5.5 y

Tabla 5.6 la máxima distorsión de las distorsiones máximas de entrepiso para cada nivel y sismo sintético analizado es en valor absoluto igual a 0.004 (redondeado a 3 cifras significativas), este valor de distorsión está por debajo de 1.25 veces el límite establecido para análisis dinámicos tiempo – historia por la norma sismorresistente E030 (NT E030, 2018) del Reglamento Nacional de edificaciones (RNE) específicamente para el concreto armado y albañilería que se muestra en la Tabla 5.8, así mismo este valor también se encuentra por debajo de todos los límites de desempeño definidos por el *Applied Technology Council* (ATC por sus siglas en inglés) en su norma para edificaciones de concreto *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building* (de ahora en adelante abreviado como ATC-40), estos límites se muestran en la Tabla 5.9 (ATC, 1996).

Tabla 5.8 Límites de distorsión de entrepisos por material E030.

Material Predominante	$\Delta d_i/h_{ei}$
Concreto Armado	0.007
Acero	0.010
Albañilería	0.005
Madera	0.010
Edificios de concreto armado con muros de ductilidad limitada	0.005

Fuente: Adaptado de (NT E030, 2018).

Tabla 5.9 Límites de deformación lateral ATC-40.

Límite de Distorsión de Entrepiso	Nivel de Desempeño			
	Ocupación Inmediata	Control de Daños	Seguridad de la Vida	Estabilidad Estructural
Distorsión Total Máxima	0.01	0.01 - 0.02	0.02	$0.33V_i/P_i$ *
Distorsión Inelástica Máxima	0.005	0.005 - 0.015	Sin límite	Sin límite

\* $V_i$ : Fuerza cortante lateral total calculada para el piso  $i$ .\* $P_i$ : Carga de gravedad total para el piso  $i$ .

Fuente: Adaptado de (ATC, 1996)

Tomando como referencia estos criterios límites de distorsiones permisibles, se puede decir que el CIIFIC no presenta daño estructural para ningún caso de análisis o para eventos sísmicos de características similares definidos como escenarios sísmicos catastróficos.

### 5.3 RESPUESTA SÍSMICA INELÁSTICA

Como se puede observar en la Sección 5.2, a pesar de haber sometido al modelo a siete tipos de demandas diferentes donde cada una representa un escenario sísmico catastrófico correspondiente al sismo esperado en Lima (hablando en términos probabilísticos) a la actualidad de esta investigación, en ningún caso la superestructura logró incursionar dentro del rango no lineal inelástico, por lo que en esta sección se trató de alcanzar ese objetivo solo para fines demostrativos.

Para esto se utilizaron dos sismos, Iquique 2005 y Pisco 2007, los cuales fueron escalados mediante multiplicación escalar de todo el registro para que tengan un PGA máximo de una vez la aceleración de la gravedad ( $1g$ ), de esta manera se forzó al modelo a dar una respuesta no lineal inelástica. Las demandas sísmicas escaladas a  $1g$  descritas se muestran en el ANEXO 2. A continuación, la Tabla 5.10 y Tabla 5.11 muestran las aceleraciones y distorsiones máximas respectivamente obtenidas en las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste para cada nivel del modelo matemático.

Tabla 5.10 Aceleraciones máximas por niveles relativas al terreno para la respuesta inelástica.

Sismo	Norte-Sur		Este-Oeste	
	Pisco 2007 ( $g$ )	Iquique 2005 ( $g$ )	Pisco 2007 ( $g$ )	Iquique 2005 ( $g$ )
Nivel 0	0.994	1.133	0.973	1.006
Nivel 1	1.032	1.133	1.056	1.096
Nivel 2	1.028	1.123	1.047	1.104
Nivel 3	1.010	1.171	0.996	1.063
Nivel 4	1.024	1.147	0.947	1.005
Nivel 5	1.066	1.120	0.965	0.994
Nivel 6	1.069	1.105	1.030	0.988
Nivel 7	1.028	1.103	1.051	1.091
Nivel 8	0.991	1.120	1.030	1.157

Tabla 5.11 Distorsiones máximas por niveles para la respuesta inelástica.

Sismo	Norte-Sur		Este-Oeste	
	Pisco 2007 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Iquique 2005 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Pisco 2007 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Iquique 2005 ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )
Nivel 1	14.475	9.724	15.274	5.032
Nivel 2	8.911	6.474	12.121	3.564
Nivel 3	9.047	6.379	11.017	3.539
Nivel 4	6.756	5.327	9.487	3.127
Nivel 5	5.351	4.507	7.711	2.490
Nivel 6	4.098	3.483	5.651	2.216
Nivel 7	2.740	2.415	3.518	1.775
Nivel 8	1.631	1.409	2.023	1.250

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 5.10 se tiene que la respuesta máxima de mayor amplitud (en valor absoluto) en aceleraciones es de 1.171 g (nivel 3) y 1.157 g (nivel 8) para las direcciones Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente, correspondientes a Iquique 2005, mientras que las respuestas máximas de menor amplitud (en valor absoluto) son de 0.991 g (nivel 8), para la dirección Norte-Sur y de 0.947 g (nivel 4), para la dirección Este-Oeste ambas correspondientes a Psico 2007. La Tabla 5.11 muestra las distorsiones máximas de entrepiso (respecto a la base de la superestructura o nivel 0, ver Figura 3.11) y la Figura 5.6 muestra estos mismos resultados de forma gráfica, donde se puede apreciar que las máximas respuestas de distorsión se dan para la simulación de Pisco 2007 en el nivel 1 para ambas direcciones siendo estas mayores al límite establecido por (NT E030, 2018) para el concreto armado y albañilería.

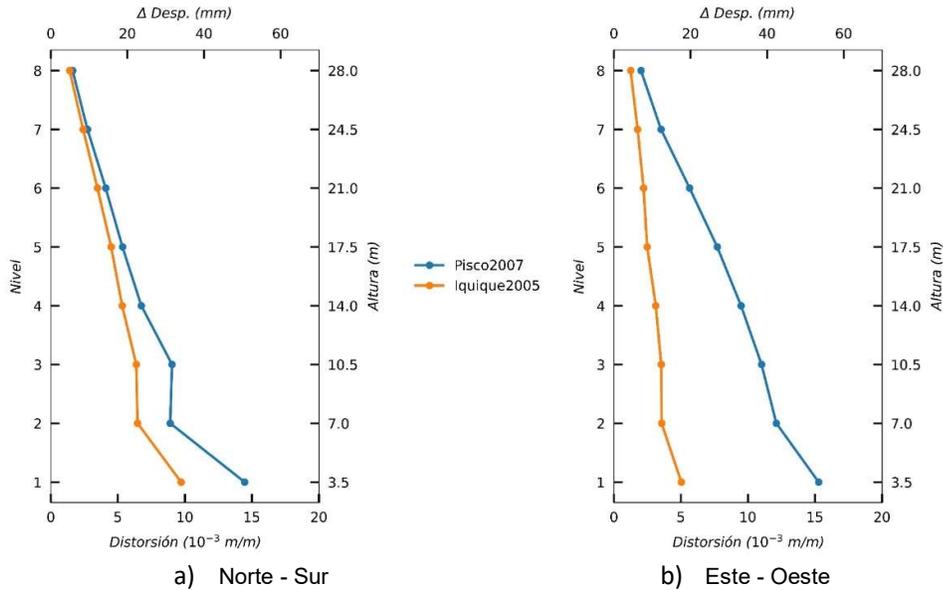


Figura 5.6 Distorsiones máximas de entrepiso a) Norte-Sur y b) Este-Oeste para la respuesta inelástica.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, la Tabla 5.12 muestra las distorsiones máximas del nivel 0 correspondientes a los aisladores en la base (nivel del terreno natural) para los dos registros sintéticos simulados.

Tabla 5.12 Distorsiones máximas del nivel 0 (aisladores) respuesta inelástica.

Sismo	Norte-Sur ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )	Este-Oeste ( $10^{-3} \frac{m}{m}$ )
Pisco 2007	1265.21	948.98
Iquique 2005	926.37	554.20

Fuente: Elaboración propia

Las gráficas de las respuestas de aceleraciones y desplazamientos, así como los ciclos de histéresis y curvas de capacidad de cada nivel y de los aisladores sísmicos se muestran en el ANEXO 2 para los apartados de respuesta sísmica inelástica. En estas gráficas se puede observar que las respuestas de desplazamientos se tienen un desplazamiento residual en todos los niveles y en ambas direcciones principales (un desfase de la línea 0) que es más notorio para Pisco 2007, así mismo los ciclos de histéresis dejan de ser lineales y pasan a tener la forma típica de un comportamiento inelástico de los materiales.

Con estos resultados irreales o ilusorios (llamados así debido a que las demandas sintéticas impartidas son excesivas y no corresponden a ningún escenario sísmico esperado) se verifica que el modelo logra incursionar dentro del rango inelástico tanto para la subestructura como para cada nivel de la superestructura.

A continuación, la Figura 5.7 y Figura 5.8 muestran de manera resumida las respuestas de desplazamientos del modelo en términos de orbitas en planta para los dos sismos analizados.

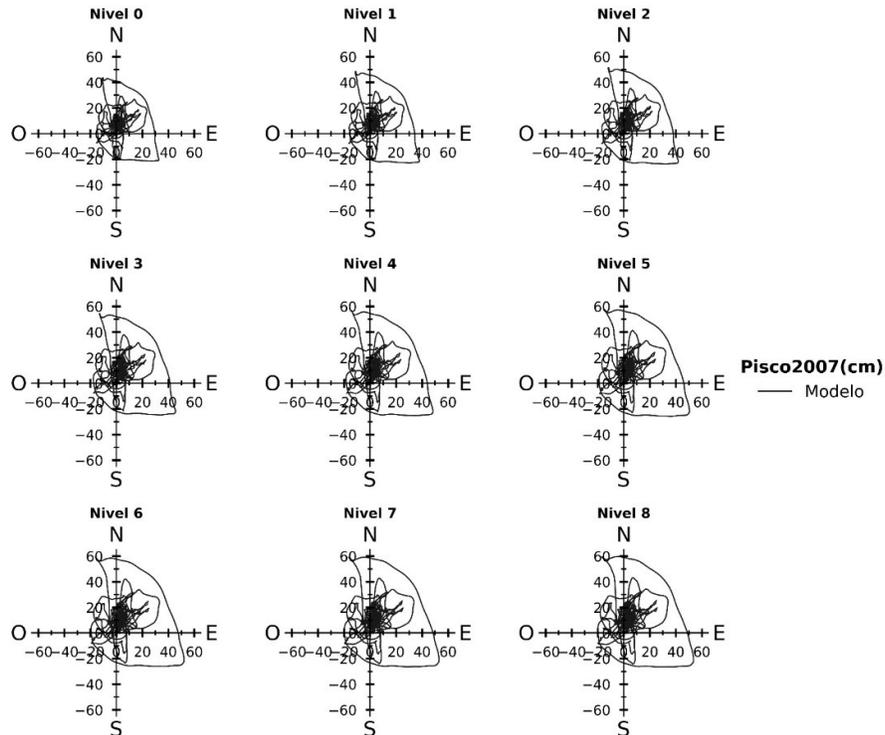


Figura 5.7 Orbitas de la respuesta del modelo para Pisco 2007 escalado a 1 g de PGA.

Fuente: Elaboración propia

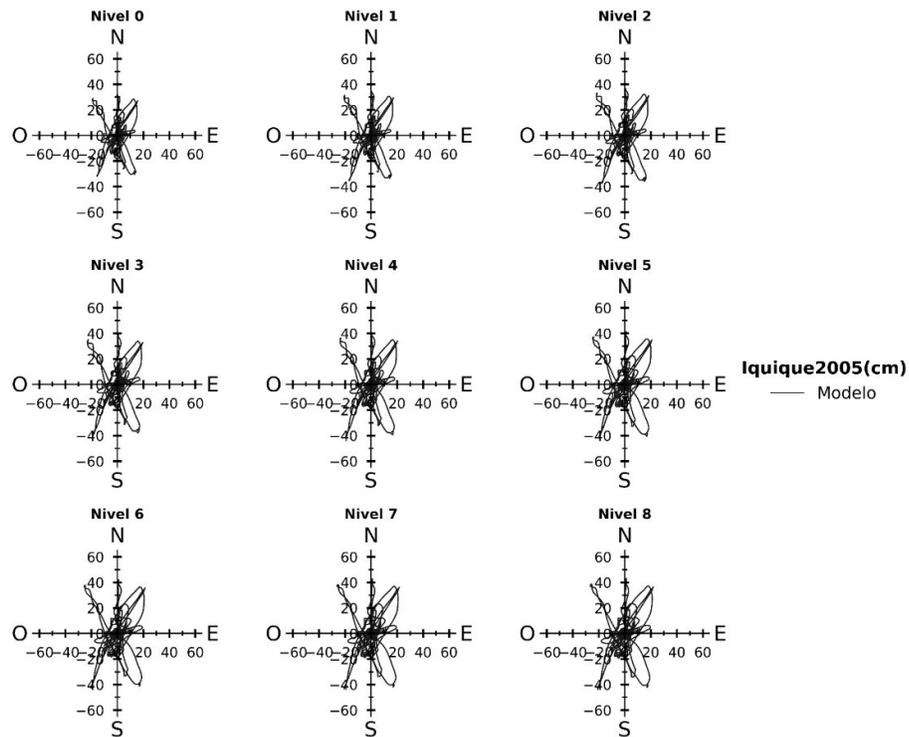


Figura 5.8 Orbits de la respuesta del modelo para Iquique 2005 escalado a 1 g de PGA.

Fuente: Elaboración propia

Cabe recalcar que esta sección es solo para fines demostrativos de la respuesta inelástica del modelo y para ver cómo la transformada de Wavelets trabaja en respuestas dentro de rango no lineal elástico. Dicha respuesta no debe ser tomada como referencia para una respuesta real de la estructura.

## CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 PARÁMETROS DINÁMICOS PARTICIPATIVOS (PDP)

En esta sección se muestran los resultados obtenidos producto de la determinación de los parámetros dinámicos participativos de la estructura, entendiéndose a estos como los rangos establecidos para la reconstrucción y filtrado de las respuestas al aplicar la transformada de Wavelets a la respuesta de aceleraciones generadas a partir de las simulaciones tiempo historia del modelo matemático, correspondientes a los diferentes registros sísmicos sintéticos empleados, tanto para la respuesta lineal como no lineal.

El procedimiento seguido es similar al que se realizó en la Sección 4.2.1. Una vez obtenidas las respuestas de aceleraciones, producto del análisis tiempo historia de los registros sintéticos, estas son contaminadas con una onda estocástica estacionaria (ruido blanco) de distribución uniforme con media  $\mu = 0$ , desviación estándar  $\sigma^2 = 1$  y amplitud igual al 1% de la diferencia máxima entre los picos positivo y negativo, para luego efectuar una extrapolación constante de 500 puntos al inicio y final de las aceleraciones (ver Figura 2.14), esto último nuevamente para mitigar los efectos de borde. Una vez establecida esta contaminación artificial de las respuestas, se procede a la aplicación de la transformada de Wavelet para generar descomposiciones tanto en el dominio del tiempo como el de la frecuencia, con las cuales se grafican los rangos para cada nivel de las aceleraciones, desplazamientos, ciclos de histéresis y espectros de Fourier. Con estas gráficas y la definición de los parámetros de error, raíz cuadrada de la esperanza del cuadrado de los errores ( $RMSE(gals)$ , parámetro de error de forma) y diferencia porcentual entre picos máximos ( $\Delta picos (\%)$ , parámetro de error de amplitudes máximas), se determinan aquellas combinaciones de rangos que generen mejores aproximaciones, a nivel de desplazamientos, entre la respuesta original del modelo antes de ser contaminada (la cual ahora toma el supuesto de ser la respuesta real de la estructura predicha por el modelo matemático) y la respuesta obtenida luego del proceso de filtrado producto de la reconstrucción de los desplazamientos con dichos rangos. Finalmente, los parámetros dinámicos participativos de la estructura serán los correspondientes a la combinación de rangos que logre una mejor aproximación de la respuesta filtrada a la original del modelo matemático.

A continuación, el diagrama de flujo de la Figura 6.1 esquematiza el procedimiento descrito líneas arriba para la obtención de estos parámetros frente a movimientos fuertes del terreno.

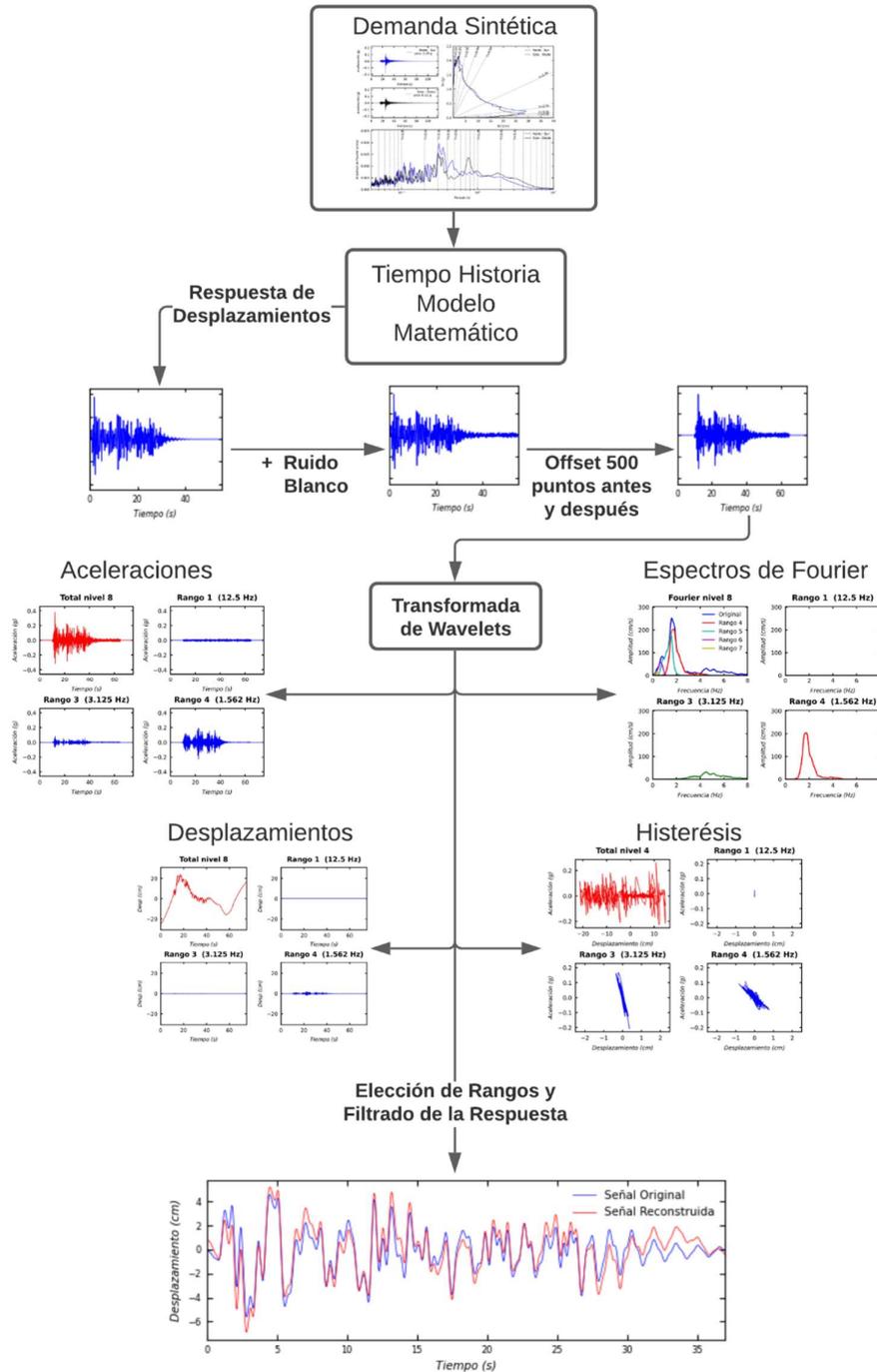


Figura 6.1 Diagrama de flujo para la obtención de los parámetros dinámicos participativos de la estructura frente movimientos sísmicos fuertes del terreno.

Fuente: Elaboración propia

### 6.1.1 Parámetros de la respuesta elástica

A continuación, se muestran los resultados obtenidos correspondientes a las simulaciones tiempo historia empleadas con los registros sintéticos generados a partir del Espectro de Peligro Uniforme con periodo de retorno de 2475 años vistos en la Sección 5.2. Las siguientes tablas muestran las 4 mejores combinaciones obtenidas correspondientes al nivel 8 de la estructura para cada uno de los registros sintéticos empleados.

Tabla 6.1 Parámetros dinámicos participativos Tacna 2010.

Rangos	Norte - Sur			Este - Oeste		
	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )
2+3+4+5+6+7	0.690	1.561	1.126	1.006	2.866	1.936
3+4+5+6+7	0.690	1.568	1.129	1.006	2.895	1.950
2+3+4+5+6	2.453	9.698	6.075	2.692	11.913	7.302
3+4+5+6	2.453	9.710	6.081	2.692	11.941	7.317

Tabla 6.2 Parámetros dinámicos participativos Pisco 2007.

Rangos	Norte - Sur			Este - Oeste		
	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )
2+3+4+5+6+7	0.781	0.747	0.764	1.147	0.226	0.686
3+4+5+6+7	0.781	0.750	0.766	1.147	0.231	0.689
2+3+4+5+6	1.646	2.521	2.083	2.563	12.053	7.308
3+4+5+6	1.646	2.524	2.085	2.563	12.048	7.305

Tabla 6.3 Parámetros dinámicos participativos Huaraz 1970.

Rangos	Norte - Sur			Este - Oeste		
	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )
2+3+4+5+6+7	1.259	0.432	0.845	1.082	0.674	0.878
3+4+5+6+7	1.259	0.469	0.864	1.083	0.651	0.867
2+3+4+5+6	2.686	7.806	5.246	2.270	4.116	3.193
3+4+5+6	2.686	7.842	5.264	2.270	4.121	3.195

Tabla 6.4 Parámetros dinámicos participativos Lima noviembre 1974.

Rangos	Norte - Sur			Este - Oeste		
	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )
2+3+4+5+6+7	1.536	2.475	2.006	0.938	1.170	1.054
3+4+5+6+7	1.537	2.467	2.002	0.938	1.172	1.055
2+3+4+5+6	4.808	13.600	9.204	3.704	14.355	9.030
3+4+5+6	4.808	13.592	9.200	3.704	14.357	9.031

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.5 Parámetros dinámicos participativos Lima octubre 1974.

Rangos	Norte - Sur			Este - Oeste		
	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )
2+3+4+5+6+7	1.235	0.962	1.099	1.942	5.687	3.815
3+4+5+6+7	1.235	0.999	1.117	1.942	5.649	3.796
2+3+4+5+6	2.133	8.603	5.368	2.570	11.615	7.092
3+4+5+6	2.133	8.640	5.386	2.570	11.577	7.073

Tabla 6.6 Parámetros dinámicos participativos Iquique 2005.

Rangos	Norte - Sur			Este - Oeste		
	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )
2+3+4+5+6+7	1.267	3.147	2.207	0.951	3.320	2.136
3+4+5+6+7	1.267	3.155	2.211	0.951	3.334	2.143
2+3+4+5+6	3.398	9.241	6.320	2.328	7.226	4.777
3+4+5+6	3.398	9.233	6.315	2.328	7.240	4.784

Tabla 6.7 Parámetros dinámicos participativos Lima 1966.

Rangos	Norte - Sur			Este - Oeste		
	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )	<i>RMSE</i> ( <i>cm</i> )	$\Delta$ <i>picos</i> ( <i>cm</i> )	<i>prom</i> ( <i>cm</i> )
2+3+4+5+6+7	1.143	2.884	2.016	0.845	2.458	1.658
3+4+5+6+7	1.143	2.889	2.013	0.845	2.470	1.651
2+3+4+5+6	3.471	14.099	8.785	1.360	4.849	3.105
3+4+5+6	3.471	14.093	8.782	1.360	4.836	3.098

Fuente: Elaboración propia

A partir de las tablas anteriores se pueden concluir dos aspectos importantes, en primera instancia y de forma general, los PDP de la estructura son los mismos para los 7 casos analizados, siendo los correspondientes a los rangos 2, 3, 4, 5, 6 y 7 no solo para el nivel 8 del modelo, sino también para el resto de los niveles, esto se puede observar en las tablas del ANEXO 2. Respecto al segundo aspecto, el tipo de escalamiento utilizado (ver Sección 2.1.12) para la generación de los registros sintéticos, permite mantener el contenido de frecuencias del evento original y darles forma tal que se asemejen a un sismo característico del suelo de Lima bajo la demanda del EPU de 2475 años de periodo de retorno, dicho esto se puede concluir que por ser los PDP iguales en los 7 casos analizados y en todos los niveles de la estructura por lo que estos parámetros serían dependientes de las propiedades dinámicas y geométricas de la estructura. Dicho estos dos apartados, las siguientes graficas muestran (de forma resumida en términos de orbitas en planta) las respuestas de desplazamiento obtenidas producto del filtrados con los PDP determinados.

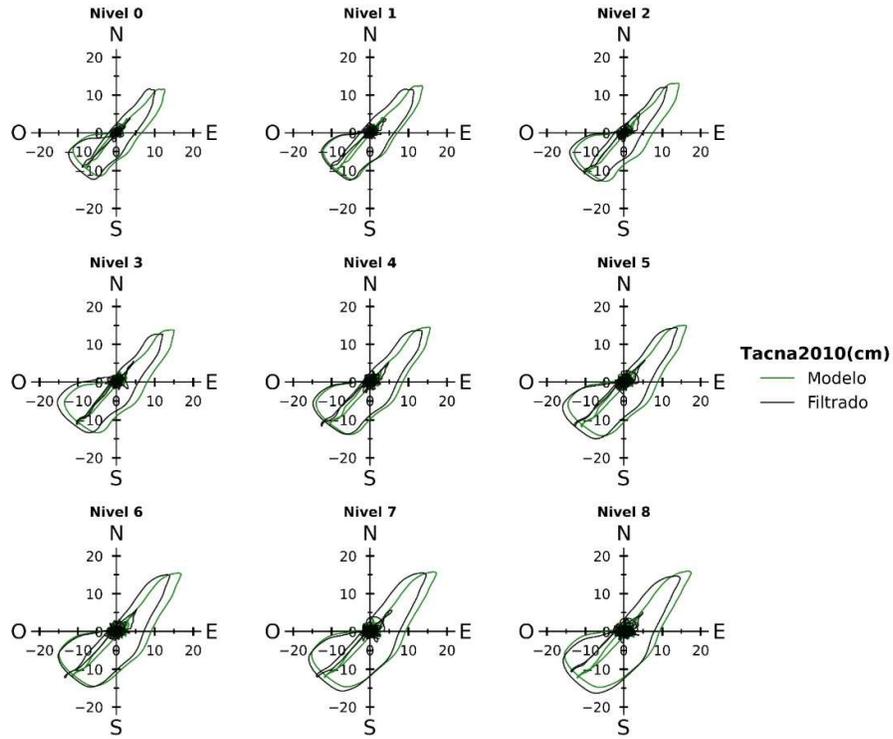


Figura 6.2 Orbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Tacna 2010.

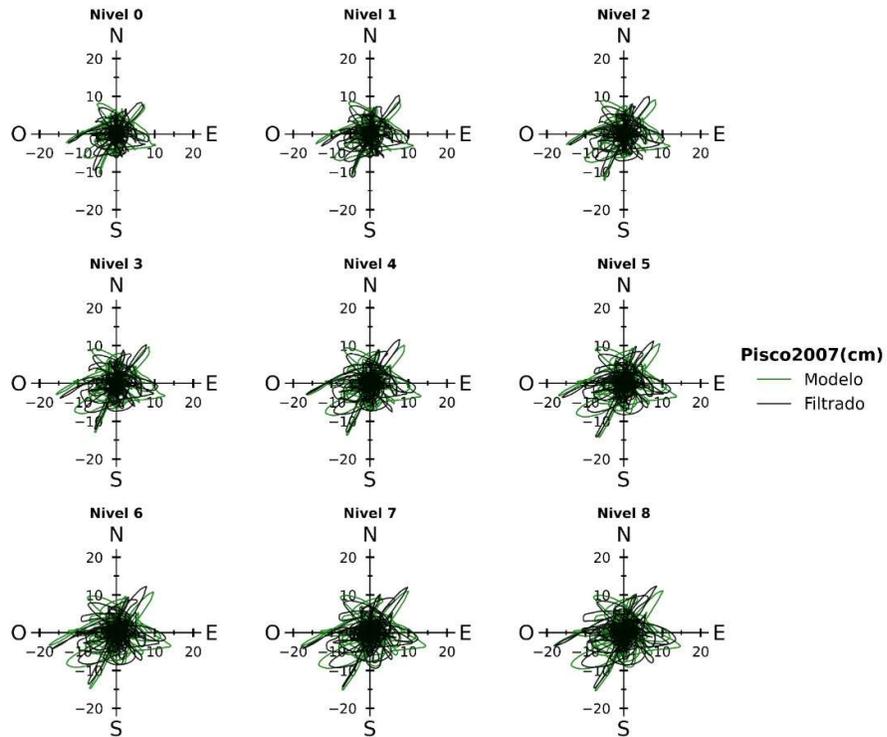


Figura 6.3 Orbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Pisco 2007.

Fuente: Elaboración propia

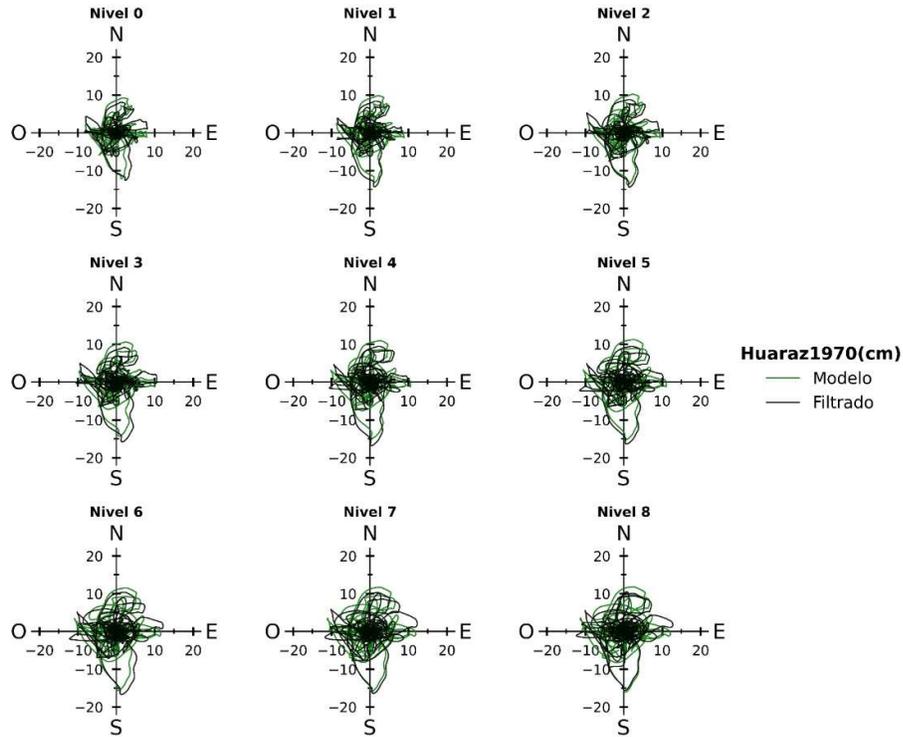


Figura 6.4 Orbits de la respuesta del modelo y filtrada para Huaraz 1970.

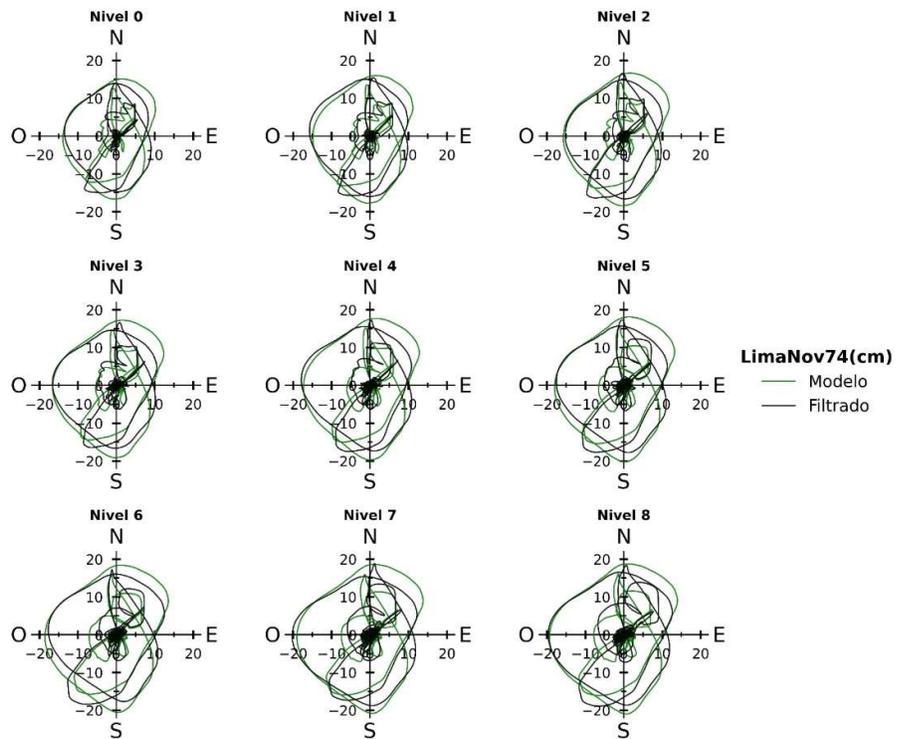


Figura 6.5 Orbits de la respuesta del modelo y filtrada para Lima noviembre 1974.

Fuente: Elaboración propia

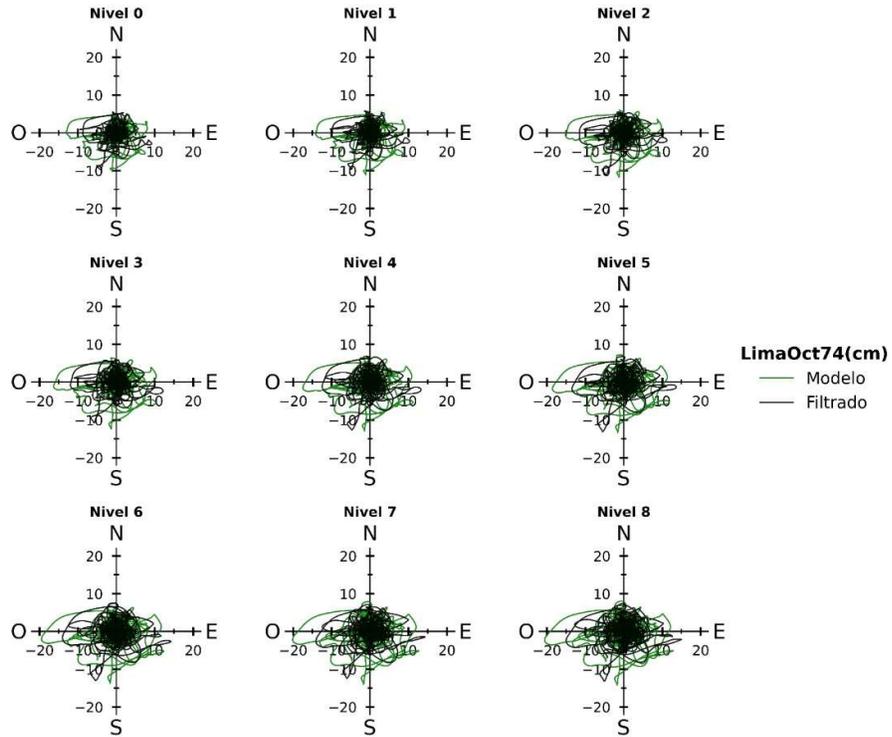


Figura 6.6 Orbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Lima octubre 1974.

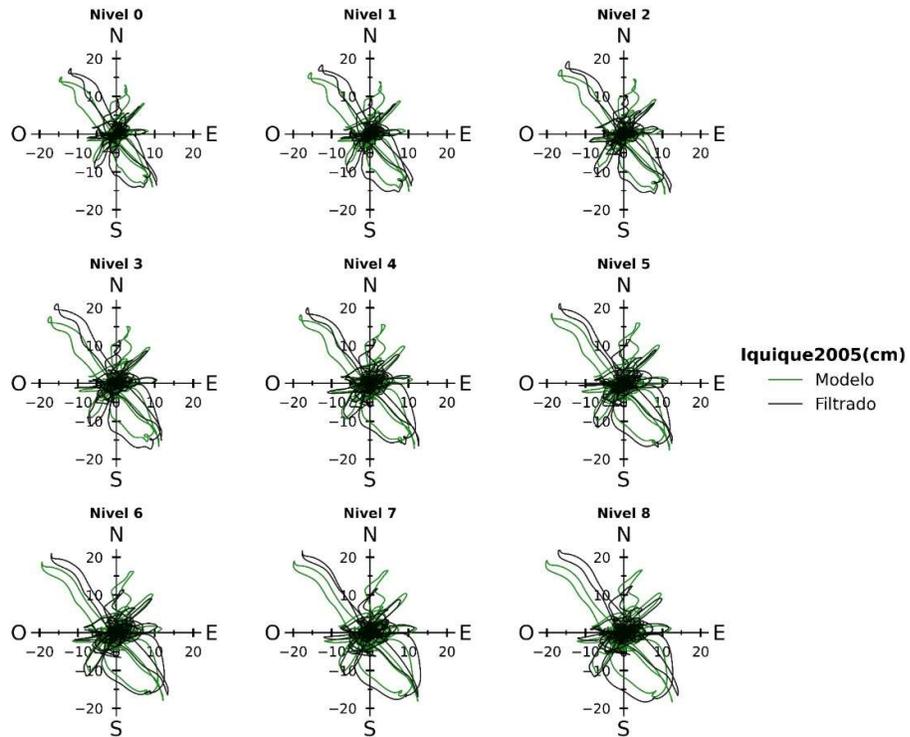


Figura 6.7 Orbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Iquique 2005.

Fuente: Elaboración propia

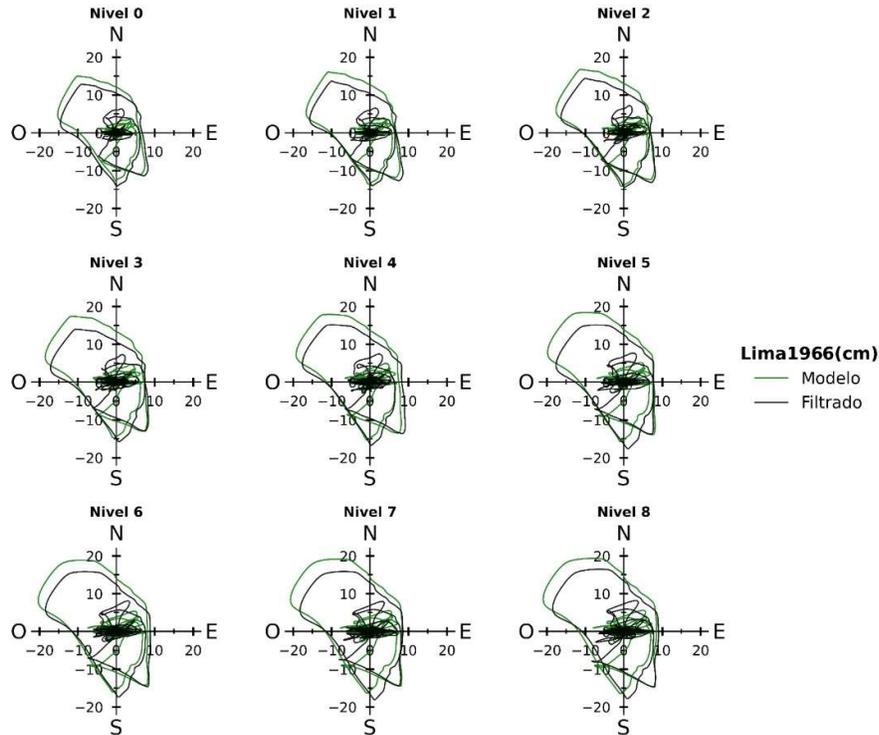


Figura 6.8 Orbitas de la respuesta del modelo y filtrada para Lima 1966.  
Fuente: Elaboración propia

En las 7 graficas anteriores se observa que existe una gran similitud en los desplazamientos, tanto en forma como en amplitudes, entre las respuestas del modelo y las respuestas filtradas utilizando los PDP establecidos, esto se puede ver a mayor detalle en las gráficas de las respuestas de desplazamientos por nivel y por direcciones principales de forma individual en el ANEXO 2 en el apartado de respuesta sísmica elástica.

### 6.1.2 Parámetros de la respuesta inelástica

Dado que el método de la transformada de wavelets descompone una señal en componentes asociadas a distintos rangos de frecuencias y que una respuesta inelástica se ve reflejado en un desplazamiento residual o deformación permanente de los elementos estructurales, esta metodología interpreta la deformación residual como una componente de bajas frecuencias asociados a rangos altos, rangos que contiene el mayor efecto de error al momento del cálculo de los desplazamientos a partir de la doble integración de las aceleraciones, si se eliminan estos rangos asociados a bajas frecuencias (cosa que sucede si se realiza el filtrado como el descrito en la Sección 6.1) se eliminarían los desplazamientos residuales de manera similar a lo que se haría al eliminar las

líneas de tendencias mediante el filtrado por línea base (ver Sección 2.3.1). Dicho esto, el uso de la transformada de wavelets como metodología para la obtención de desplazamientos a partir del cálculo de la doble integración de las aceleraciones, no es apropiado para respuestas que incurrieren dentro del rango no lineal inelástico ya que los desplazamientos residuales se ven eliminados durante el proceso de filtrado. A continuación, la Figura 6.9 muestra los rangos producto de la descomposición de las respuestas de desplazamientos del nivel 1 del modelo estructural en la dirección Norte-Sur para Pisco 2007 escalado a 1g de PGA, en estas graficas se observa que los rangos superiores (9, 10 y 11) son los que contienen la componente residual del comportamiento inelástico y a la vez son los que mayor error introducen en la respuesta.

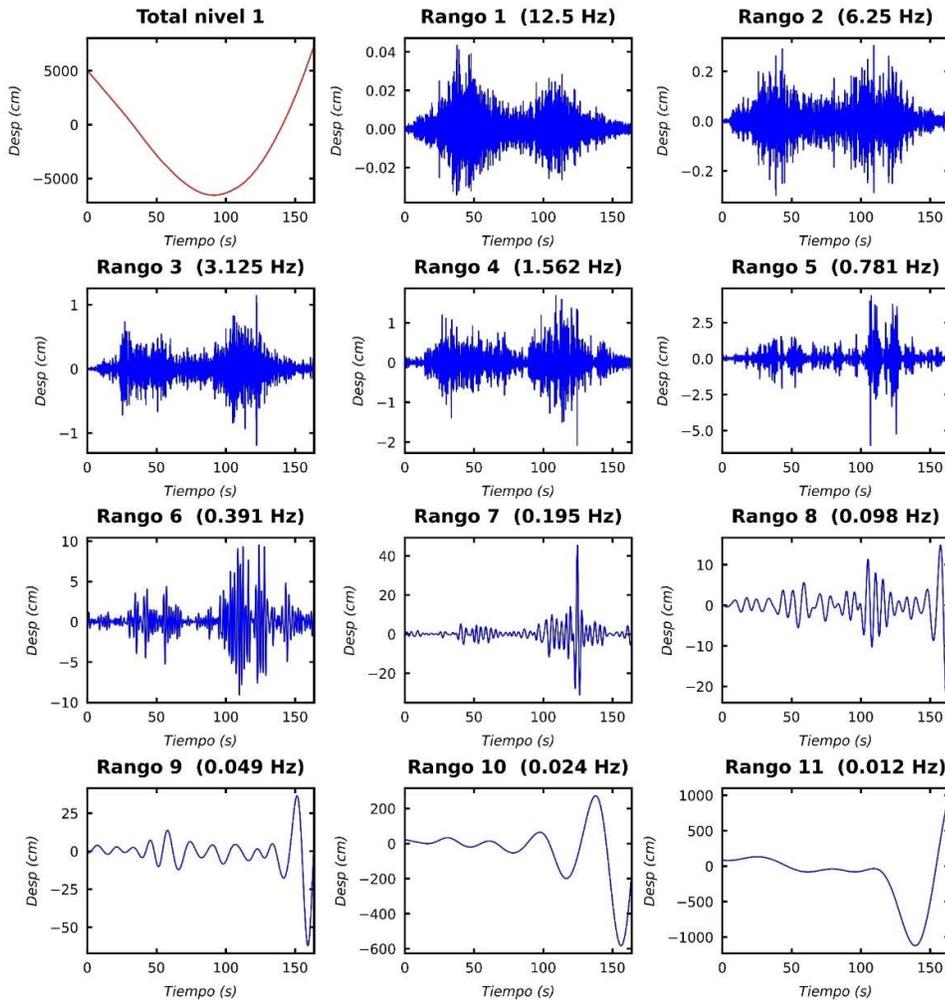


Figura 6.9 Componentes del desplazamiento residual para la respuesta inelástica correspondiente a Pisco 2007 escalado a 1g de PGA en la dirección Norte-Sur.

Fuente: Elaboración propia

En base a lo mencionado líneas arriba, no se podrían definir los PDP (una combinación de rangos) para respuestas del tipo no lineal inelásticas. Sin embargo, se escogió la misma combinación de rangos para la respuesta elástica definidos en la Sección 6.1.1 (rangos 2, 3, 4, 5, 6 y 7) para el filtrado de las aceleraciones y obtención de las respuestas de desplazamientos a manera demostrativa, estos desplazamientos se muestran en el ANEXO 2 en el apartado de respuesta sísmica inelástica y en ellos se puede apreciar como los desplazamientos residuales son eliminados.

## 6.2 CASO APLICATIVO

En esta sección se hizo uso de los PDP establecidos en la Sección 6.1.1 para el filtrado y obtención de las respuestas de desplazamientos en los niveles 0, 2 y 4 de la estructura correspondientes a los registros de aceleración captados por los sensores itk-01, itk-02 e itk-03 respectivamente (ver Figura 3.11). El registro utilizado corresponde al evento sísmico ocurrido el 22 de junio del 2021 a las 21:47:09 horas UTC-5 (hora local peruana) y cuenta con un  $\Delta t = 0.01$  segundos. La Figura 6.10 muestra los registros de aceleraciones captados por el sensor itk-00 al nivel del terreno en la subestructura, así mismo se muestran sus correspondientes espectros de respuesta y espectros de Fourier.

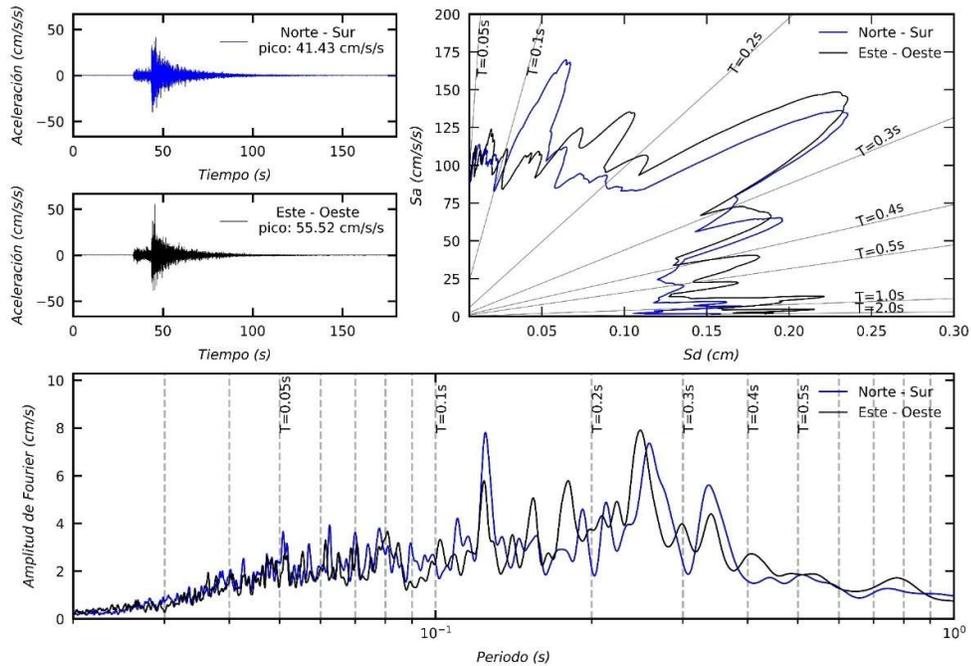


Figura 6.10 Aceleraciones, espectros de respuesta y espectros de Fourier itk-00 del 22/06/2021.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, la Figura 6.11 muestra los registros de aceleración captados por los sensores en los niveles instrumentados de la superestructura (niveles 0, 2 y 4 correspondiente a los sensores itk-01, itk-02 e itk-03 respectivamente).

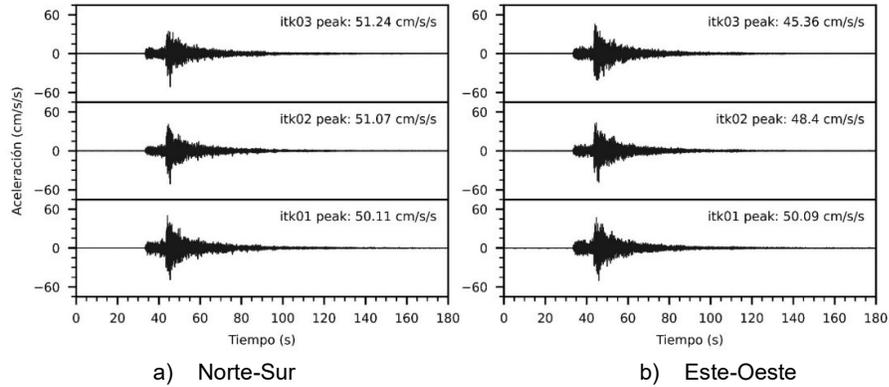


Figura 6.11 Registros de aceleración de los niveles instrumentados.

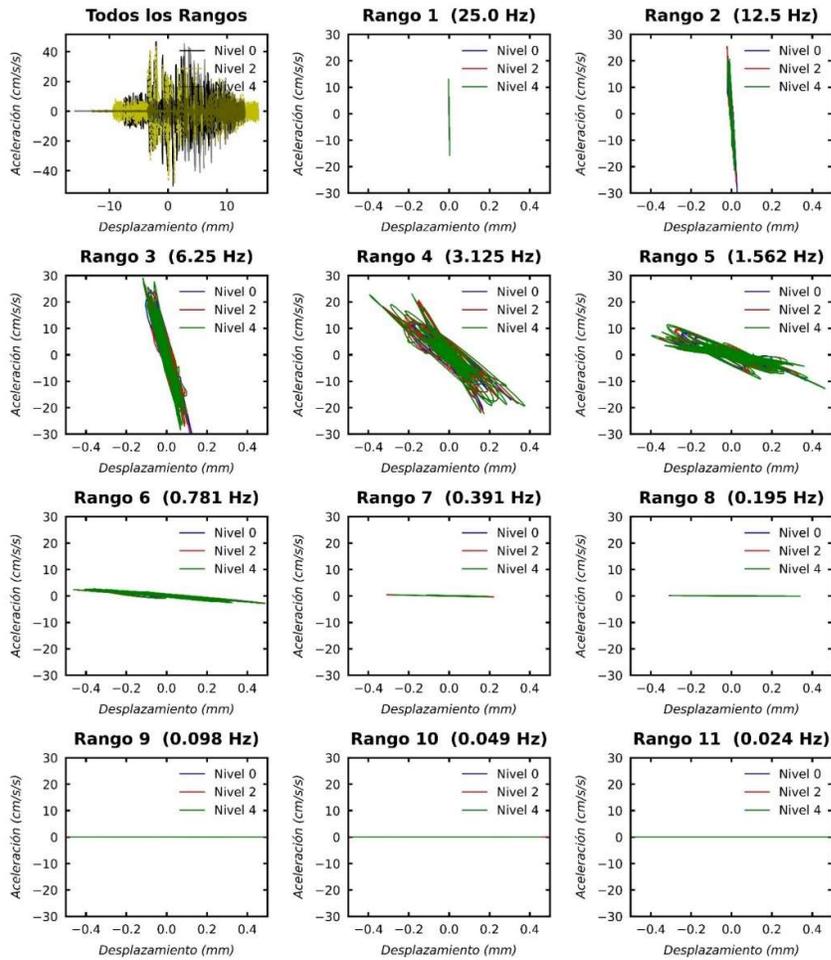


Figura 6.12 Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) rangos 1 al 11 de los niveles instrumentados de la estructura para la dirección Norte-Sur con  $\Delta t=0.01$ .

Fuente: Elaboración propia

La Figura 6.12 y Figura 6.13 muestran las 11 componentes o rangos representados mediante las respuestas de aceleraciones versus las de desplazamiento (denominados ciclos de histéresis) para cada nivel instrumentado de la edificación y para cada una de las direcciones principales Norte-Sur y Este-Oeste respectivamente. Estas descomposiciones fueron obtenidas a partir de la aplicación de la transformada de wavelets a los registros de aceleración tomando en cuenta un muestreo de  $\Delta t = 0.01$  segundos. Debe notarse que cada rango tiene asociado una frecuencia central diferente a lo que se obtuviera haciendo el análisis para registros con un muestreo de  $\Delta t = 0.02$  segundos (ver Tabla 2.1).

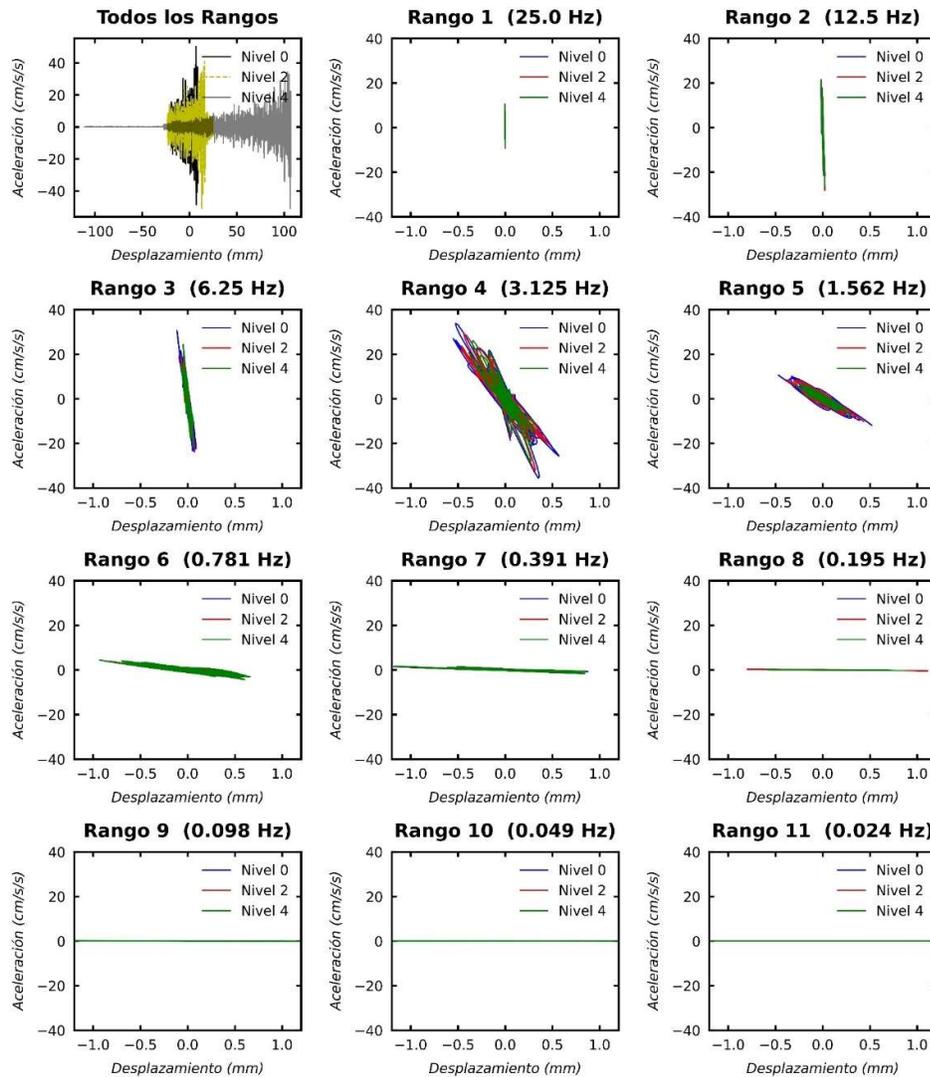


Figura 6.13 Aceleración vs desplazamiento (ciclos de histéresis) rangos 1 al 11 de los niveles instrumentados de la estructura. para la dirección Este-Oeste con  $\Delta t=0.01$ .

Fuente: Elaboración propia

Con lo mencionado anteriormente es importante añadir algunas acotaciones importantes. El procedimiento seguido en la Sección 6.1 para la determinación de los PDP se realizó para señales sintéticas con un muestreo de  $\Delta t = 0.02$  segundos, esto con motivo de reducir el tiempo de cómputo al momento de ejecutar los análisis dinámicos no lineales (análisis Tiempo-Historia) de cada uno de los sismos escalados en el modelo matemático de la estructura, como resultado se establecieron los rangos 2, 3, 4, 5, 6 y 7 como los PDP de la estructura, cada uno asociado a una frecuencia central como se muestra en la Tabla 2.1 para  $\Delta t = 0.02$ , las frecuencias respectivas a cada rango son 6.250, 3.125, 1.526, 0.781, 0.391 y 0.195 Hz. Sin embargo, los registros de aceleración empleados en esta sección tienen un muestreo de  $\Delta t = 0.01$  segundos por lo que las frecuencias centrales asociadas a rangos con una misma numeración son diferentes y dependen del muestreo de la señal base, dicho esto los PDP para el caso de análisis con  $\Delta t = 0.01$  deberían ser aquellos rangos asociados a las mismas frecuencias centrales para el caso de análisis con  $\Delta t = 0.02$  segundos, teniéndose como resultado a los rangos 3, 4, 5, 6, 7 y 8 (ver Tabla 2.1) los cuales son los utilizados para el filtrado de los registros y la obtención de la respuesta sísmica de desplazamientos de los correspondientes niveles de la estructura. A continuación, la Figura 6.14 muestra las respuestas sísmicas, respecto a la base o nivel del terreno, filtradas obtenidas para ambas direcciones principales.

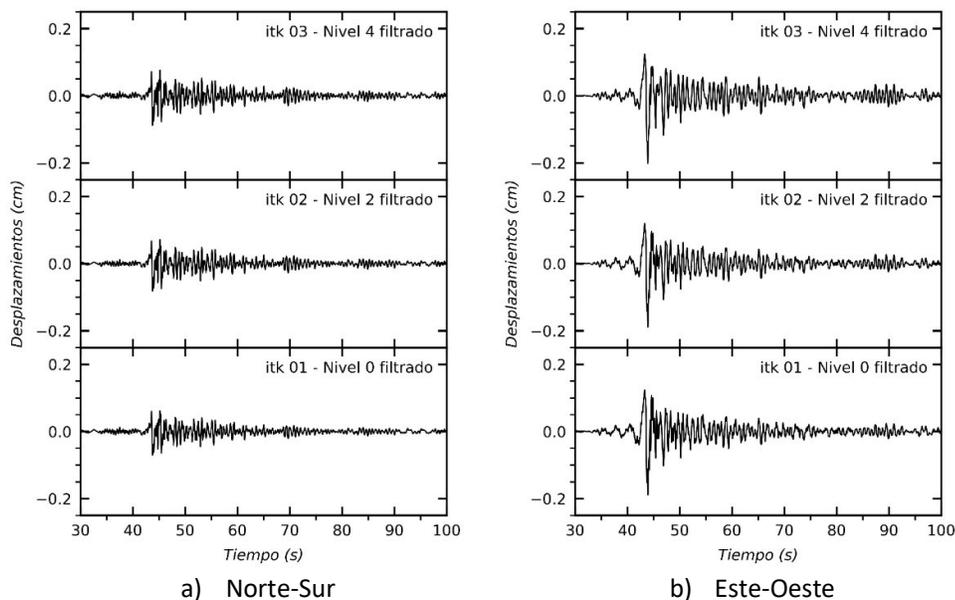


Figura 6.14 Respuestas sísmicas de desplazamientos, relativos a la base, filtrados a partir de los PDP de la estructura para un  $\Delta t = 0.01$ .

Fuente: Elaboración propia

Cabe mencionar que para la calibración del modelo estructural en el rango lineal elástico se utilizó el registro detallado en la Sección 4.2.2 y no el registro mostrado en esta sección, a pesar de ser de mayor intensidad, debido a que al momento de la calibración del modelo no se contaba con un registro más intenso que el utilizado, no obstante, se garantiza que el resultado no variaría dado que a escala del sistema estructural la respuesta sería similar.

### 6.3 PROPUESTA METODOLÓGICA

En esta sección se hace una propuesta de metodología para la obtención de la respuesta sísmica del CIIFIC, y edificaciones monitoreadas mediante sensores de aceleración, así como la determinación y localización del daño estructural frente a movimientos sísmicos fuertes mediante el uso de la transformada de Wavelets. Para aplicar la propuesta se deben cumplir ciertos requisitos y tener en cuenta algunos aspectos importantes detallados a continuación.

Primeramente y como requisito indispensable, la estructura debe contar con un sistema de monitoreo mediante sensores de aceleración. Para respuestas traslacionales se necesitan como mínimo un sensor por nivel y estos deben estar ubicados en aproximadamente en los centros de masas de los niveles a analizarse. Para respuestas rotacionales se necesitan como mínimo dos sensores de preferencia ubicados en extremos opuestos del mismo nivel y colineales al centro de masas.

Si se desea determinar la magnitud del daño para un nivel en específico, se necesitan como mínimo dos niveles instrumentados, el nivel en análisis y uno anterior, para así determinar la respuesta relativa entre ellos y obtener las distorsiones del entrepiso.

Para la localización del daño, la forma más confiable es mediante la instrumentación de cada uno de los niveles de la estructura, alternativamente se podrían instrumentar solo algunos niveles estratégicos y luego determinar la respuesta de los demás niveles mediante algún método de interpolación y/o extrapolación acorde a las características de la estructura.

Para la localización del daño en un entrepiso específico, esta metodología propone la instrumentación de todos los niveles de la estructura, aunque no es la forma más económica es la más confiable y precisa.

La decisión de confirmar la presencia de daño estructural y determinación de su magnitud se debe establecer bajo algún criterio ingenieril como por ejemplo los límites de distorsiones de entrepiso definidos por la E030 y ATC-40 en la Tabla 5.8 y Tabla 5.9, respectivamente.

Dichos estos apartados se muestra el desarrollo de la metodología, la cual consta de principalmente de cinco pasos.

- Paso 1, creación de un modelo matemático representativo de la estructural bajo estudio.
- Paso 2, determinación de los PDP mediante el procedimiento mostrado en la Sección 6.1.
- Paso 3, adquisición de los registros de aceleración en cada nivel mediante el sistema de observación de la respuesta empleado.
- Paso 4, Determinación de las respuestas sísmicas de desplazamientos en cada nivel mediante el filtrado de los registros de aceleración por medio del uso de la transformada de Wavelets tomando con rangos los PDP establecidos en el paso 2.
- Paso 5, cálculo de las distorsiones de entrepiso para la determinación de la magnitud y localización del daño estructural.
- Paso 6, toma de decisión de evacuación o continuidad operativa de la estructura.

A continuación, la Figura 6.15 muestra un diagrama de flujo con el desarrollo de la metodología propuesta.



Figura 6.15 Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Fuente: Elaboración propia

## CONCLUSIONES

Para una primera aplicación de la transformada de Wavelets se reprodujo la respuesta sísmica del CIIFIC mediante su modelo matemático no lineal al ser sometido a un sismo histórico internacional, estas respuestas artificiales fueron contaminadas con un ruido blanco para su posterior filtrado mediante el método de la transformada de Wavelets la cual descompuso las señales en componentes o rangos asociados a intervalos de frecuencias o a frecuencias centrales. De estos rangos se descartaron aquellos que introducían una componente de error en las respuestas de desplazamientos y se tomaron aquellos rangos que contribuían a la respuesta natural del sistema estructural para la reconstrucción (filtrado) de la señal. Se compararon estas respuestas filtradas con las respuestas originales obtenidas del modelo obteniéndose resultados similares.

Con la selección adecuada de rangos para la reconstrucción o filtrado de las señales, se corrigen en gran medida los desplazamientos de manera similar a lo que haría una corrección por línea base, además que también elimina el ruido como lo haría un filtrado pasa banda en el espectro de frecuencias con la transformada de Fourier, lo cual demuestra que la transformada de Wavelets tiene una ventaja significativa ante estos dos métodos ya que en la descomposición de las señales se pueden identificar de forma visual aquellas componentes que la distorsionan o no tienen un aporte significativo a la respuesta dinámica de la estructura.

Se comprobó que el modelo se encuentra calibrado al comparar las respuestas teóricas del modelo con las respuestas reales registradas por los sensores en los diferentes niveles instrumentados luego de su filtrado mediante la metodología de la transformada de Wavelets. Como resultado se obtuvo una aceptable similitud entre las respuestas teóricas y las originales de todos los niveles instrumentados para ambas direcciones principales. Al momento de la elaboración de esta investigación no se cuenta con eventos sísmicos registrados lo suficientemente fuertes como para hacer incursionar a la estructura dentro del rango no lineal por lo que este análisis se considera válido para respuestas de la estructura dentro del rango lineal elástico.

Se obtuvieron las respuestas del modelo mediante un análisis dinámico no lineal a partir de la simulación de siete sismos históricos peruanos escalados al espectro de peligro uniforme de la ciudad de Lima para un periodo de retorno de 2475 años

o una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años. Las respuestas de los aisladores elastoméricos incursionaron dentro del rango no lineal teniendo un comportamiento bilineal mientras que las respuestas de los niveles de la superestructura se mantuvieron lineal siendo las distorsiones de entre piso menores a 0.4%, de manera referencial este valor está por debajo de los límites establecidos por la (NT E030, 2018) y la (ATC, 1996), además el máximo desplazamiento lateral determinado se encuentra en el orden de los 20cm por lo que no existe riesgo de colisión con las estructuras aledañas, con esto se puede concluir que la respuesta del CIIFIC se mantendrá lineal y sin presencia de daños estructurales frente a movimientos sísmicos fuertes.

Durante los análisis aplicados a la estructura se obtuvieron dos tipos de comportamientos dinámicos, uno enteramente elástico tanto para aisladores como para los niveles de la superestructura (durante el análisis para el proceso de calibración) y el otro fue un comportamiento mixto donde los aisladores tuvieron un comportamiento no lineal mientras que los niveles de la superestructura se mantuvieron lineales (durante la determinación de los PDP). Para cada uno de estos dos comportamientos los rangos empleados o PDP hallados fueron distintos lo cual refuerza la hipótesis de que dependen de las propiedades dinámicas de la estructura. Este comportamiento dual del CIIFIC se debe a la rigidez lateral de los aisladores ya que estos solo se activan cuando la demanda sísmica es lo suficientemente fuerte y en caso contrario actúa como una estructura tradicional empotrada en la base.

La transformada de Wavelets interpreta a la deformación residual como una componente de bajas frecuencias asociados a rangos altos, rangos que contienen el mayor efecto de error al momento del cálculo de los desplazamientos a partir de la doble integración de las aceleraciones. Al eliminar estas componentes de error también son eliminados los desplazamientos residuales por lo que el uso de la transformada de Wavelets como metodología para la obtención de desplazamientos a partir del cálculo de la doble integración de las aceleraciones, no es apropiado para respuestas que incursionen dentro del rango no lineal inelástico; sin embargo, es posible calcular niveles de distorsión en base a máximas respuestas.

Con los PDP hallados mediante el análisis Wavelets se filtró la respuesta dinámica del CIIFC proveniente de los registros de aceleración de sus sensores para un

determinando evento sísmico llegándose a obtener desplazamientos laterales razonables de acuerdo con el nivel de demanda sísmica y al sistema de aislamiento de la estructura del CIIFIC.

Cuando se requiera determinar la localización y nivel de un eventual daño estructural mediante el uso de la metodología propuesta, es necesario tener cada nivel de la estructura monitoreada instrumentada, mientras que para la determinación de la respuesta en un nivel en específico solo se necesita instrumentar el nivel de interés y uno anterior.

La metodología aplicada, basada en la transformada de Wavelets para la reconstrucción de la respuesta sísmica de la edificación a partir de la respuesta observada por los acelerómetros, determina los Parámetros Dinámicos Participativos (PDP) con una buena aproximación. Esto se verificó en los siete casos de análisis y para cada uno de los niveles de la edificación objeto de estudio.

## RECOMENDACIONES

Para realizar la calibración del modelo matemático se recomienda el uso de registros sísmicos de mayor amplitud cuya demanda logre activar los aisladores elastoméricos haciéndolos incursionar dentro del rango no lineal con ciclos de histéresis bilineales, además de una mayor instrumentación, es decir una mayor cantidad de sensores en los niveles de la estructura.

Calcular los PDP para diferentes modelos estructurales con propiedades dinámicas marcadamente diferenciadas para establecer un estándar de PDP para cada tipo de estructura.

Ampliar los criterios de selección de los rangos que serán definidos como los PDP de las estructuras y condiciones de sitio.

Para la metodología propuesta se recomienda diseñar o implementar otros límites de distorsión más realistas para diferentes niveles de demanda sísmica y tipología estructural con los que se pueda tomar una mejor decisión de ocurrencia de daño y si en caso sea necesario la evacuación de la estructura monitoreada.

Para aplicar completamente la metodología propuesta en caso de no tener todos los niveles instrumentados, se recomienda usar alguna técnica para inferir la respuesta en los niveles no instrumentados, estas técnicas deberían ser acorde a las propiedades dinámicas de la estructura como por ejemplo proporcionales a sus modos de vibración predominantes.

Se recomienda experimentos utilizando especímenes con aislamiento y hacerlos incursionar dentro del rango no lineal.

Se recomienda compensar la falta de registros sísmicos con la construcción y análisis de modelos experimentales.

Si bien es cierto en este estudio se plantea límites de distorsiones establecidos en la norma para la determinación del daño de la edificación, estos valores son referenciales. La aplicación de esta metodología puede complementarse con evaluaciones de otros parámetros (energía disipada, amortiguamiento equivalente, índices de daño, etc.) que determinan la incursión de la respuesta en el rango inelástico para la determinación del nivel de daño.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Applied Technology Council. (1960). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings* (ATC-40).
- Bendat, J. S., & Piersol, A. G. (2010). *Random Data*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118032428>.
- Boroschek, R., Aguilar, A., & León, P. (2014). *Structural Health Monitoring Using Strong and Weak Earthquake Motions*. NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.4231/D3SQ8QJ2C>.
- Camacho, A. (2011). *Vulnerabilidad Sísmica Estructural de los Edificios Principales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería*. [Tesis de título profesional]. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Carcelén, C., Morán, D., & Amador, L. (2020). El terremoto de 1746 y su impacto en la salud en la ciudad de Lima. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 37(1), 164–168. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2020.371.4547>.
- Chopra, A. (2007). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (Third edition). Prentice Hall.
- Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. (2016). *Instalación de Sensores Sísmicos ITK-002 para el Monitoreo en Salud Estructural del Centro de Información e Investigación de la FIC-UNI*.
- Cooley, J. W., Lewis, P. A. W., & Welch, P. D. (1969). The Fast Fourier Transform and Its Applications. *IEEE Transactions on Education*, 12(1), 27–34. <https://doi.org/10.1109/TE.1969.4320436>.
- Daubechies, I. (1992). *Ten Lectures on Wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9781611970104>.
- Diaz, M., Gibu, P., Estacio, L., & Proano, R. (2014). Implementation of Building Monitoring Network in Peru Under SATREPS Project. *Journal of Disaster Research*, 9(6), 1001–1007. <https://doi.org/10.20965/jdr.2014.p1001>.
- Dynamic Isolation Systems. (2013). *Prototype Isolator Test Report*.
- Gao, H., Lin, J., Zhao, Z., Zeng, R., Wang, X., Xin, Y., Wang, D., & Zhou, X. (2019). Research on vibration sensor based on giant magnetoresistance effect. *Review of Scientific Instruments*, 90(10). <https://doi.org/10.1063/1.5111076>.
- Hancock, J., Watson-Lamprey, J., Abrahamson, N. A., Bommer\*, J. J., Markatis, A., MacCoyh, E., & Mendis, R. (2006). An Improved Method of Matching Response Spectra of Recorded Earthquake Ground Motion Using Wavelets. *Journal of Earthquake Engineering*, 10(sup001), 67–89. <https://doi.org/10.1080/13632460609350629>.
- Hayashi, K., Saito, T., Horioka, T., & Sato, E. (2019). Implementation of real-time seismic diagnostic system on emergency management center buildings: system

- introduction and operational status on municipal government office buildings. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 9(4), 529–541. <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00349-4>.
- Higashino, M., & Okamoto, S. (2006). *Response Control and Seismic Isolation of Buildings*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203018866>.
- Kamen, E., & Heck, B. (2008). *Fundamentos de señales y sistemas usando la Web y Matlab* (Tercera edición). Pearson Educación.
- Kankanamge, Y., Hu, Y., & Shao, X. (2020). Application of wavelet transform in structural health monitoring. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19(2), 515–532. <https://doi.org/10.1007/s11803-020-0576-8>.
- Kashima, T. (2016). *View Wave Manual* (Versión 2.2.0) [User's Guide]. <https://smo.kenken.go.jp/~kashima/viewwave/>.
- Kusunoki, K. (2005a). *Calculation of Displacements from Recorded Acceleration with the Wavelet Transform Method*.
- Kusunoki, K. (2005b). *Wavelet Transform Method-Theory and software coding*.
- Kusunoki, K. (2017). Response Evaluation of a Base-Isolated Building with Measured Accelerations During Tohoku Earthquake. [Paper N° 548] (January 9<sup>th</sup> to 13<sup>th</sup>). 16th World Conference on Earthquake. Santiago, Chile.
- Lee, G., Gommers, R., Waselewski, F., Wohlfahrt, K., & O'Leary, A. (2019). PyWavelets: A Python package for wavelet analysis. *Journal of Open Source Software*, 4(36), 1237. <https://doi.org/10.21105/joss.01237>.
- Mathworks. (2017). *Wavelets: A New Tool for Signal Analysis*. (Version 1) [Toolbox User's Guide]. <https://www.mathworks.com/products/wavelet.html>.
- Mukherjee, S., & Gupta, V. K. (2002a). Wavelet-based characterization of design ground motions. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(5), 1173–1190. <https://doi.org/10.1002/eqe.155>.
- Mukherjee, S., & Gupta, V. K. (2002b). Wavelet-based generation of spectrum-compatible time-histories. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9–12), 799–804. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00101-X](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00101-X).
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma Técnica E030: Diseño Sismorresistente*. Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *Norma Técnica E031: Aislamiento Sísmico*. Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2003). *Norma Técnica E030: Diseño Sismorresistente*. Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Orellana, G., & Parra, J. (2017). *Evaluación de Desempeño Sísmico de un Edificio Esencial Aporticado de Hormigón Armado Según la Norma Ecuatoriana de Construcción*. [Tesis de título profesional]. Universidad de Cuenca.

- Pan, C., Zhang, R., Luo, H., & Shen, H. (2016). Baseline correction of vibration acceleration signals with inconsistent initial velocity and displacement. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(10), 168781401667553. <https://doi.org/10.1177/1687814016675534>.
- Parzen, E. (1961). Mathematical Considerations in the Estimation of Spectra. *Technometrics*, 3(2), 167. <https://doi.org/10.2307/1266111>.
- Patel, S. S., Chourasia, A. P., Panigrahi, S. K., Parashar, J., Parvez, N., & Kumar, M. (2016). Damage Identification of RC Structures Using Wavelet Transformation. *Procedia Engineering*, 144, 336–342. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.05.141>
- Pinho, R. (2007). Nonlinear Dynamic Analysis of Structures Subjected to Seismic Action. In *Advanced Earthquake Engineering Analysis* (pp. 63–89). Springer Vienna. [https://doi.org/10.1007/978-3-211-74214-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-211-74214-3_5).
- Pulido, N., Aguilar, Z., Tavera, H., Chlieh, M., Calderón, D., Sekiguchi, T., Nakai, S., & Yamazaki, F. (2015). Scenario Source Models and Strong Ground Motion for Future Mega-earthquakes: Application to Lima, Central Peru. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(1), 368–386. <https://doi.org/10.1785/0120140098>.
- Shibata, A. (2010). *Dynamic Analysis of Earthquake Resistant Structures*. Tohoku University CO-OP.
- Takanami, T., & Kitagawa, G. (2003). *Methods and Applications of Signal Processing in Seismic Network Operations* (Vol. 98). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/BFb0117693>.
- Universidad Nacional de Ingeniería. (2017, marzo). *Red Acelerográfica*. <http://www.red-acelerografica-peru.uni.edu.pe/es/page/metodology/>
- Zenon, A. (2022, noviembre). *Espectro de peligro uniforme*. <http://ppsh.sencico.gob.pe>.

## ANEXOS

Anexo 1: Registros sísmicos.....	116
Anexo 2: Demanda y respuesta sísmica.....	126
Anexo 3: Expediente técnico.....	165

## ANEXO 1

### Registros Sísmicos de Acelerómetros

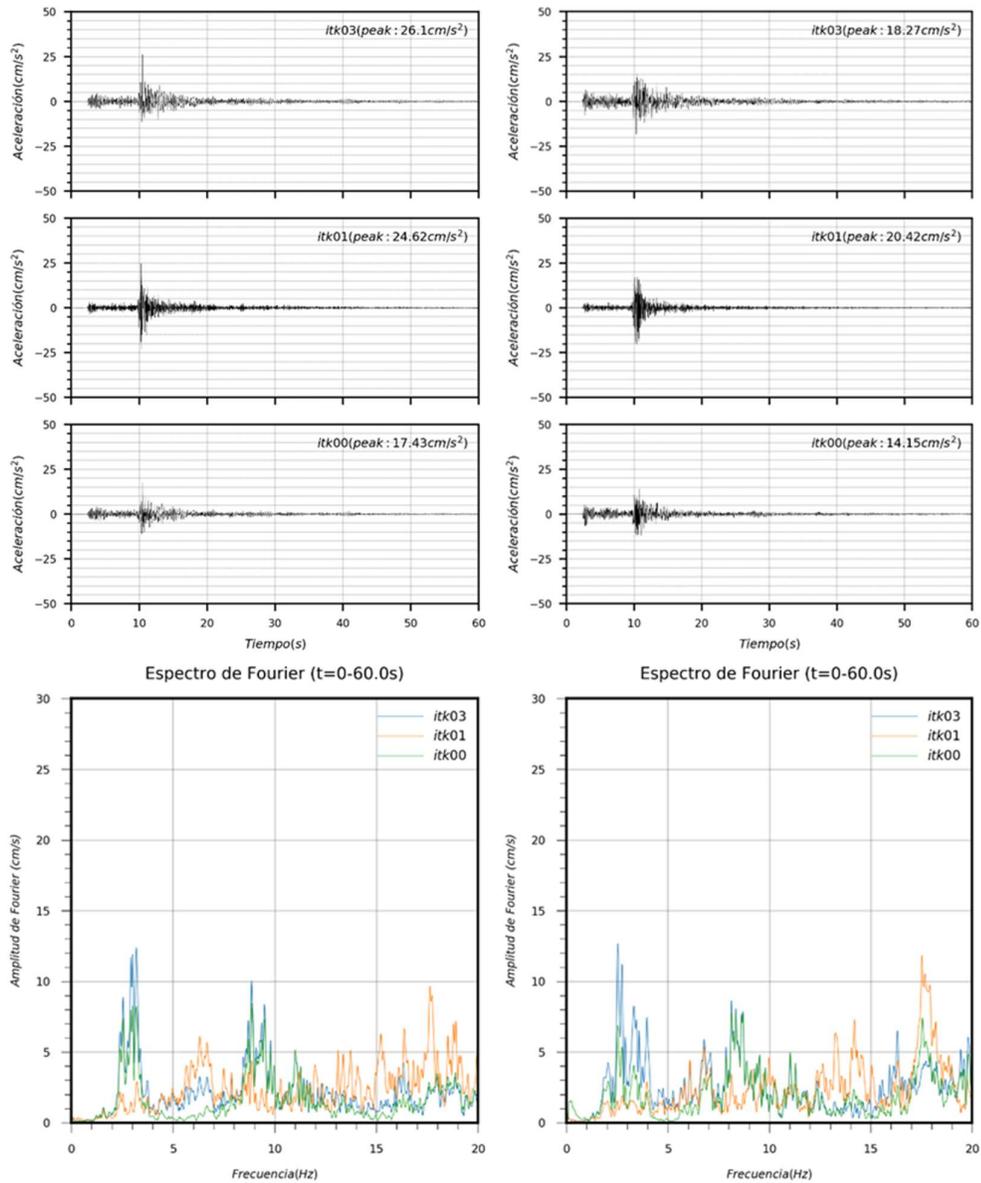


Figura A.1.1 Registros de aceleración espectro del Fourier del CIIFIC, Fecha 27/10/2016  
Fuente: Elaboración propia

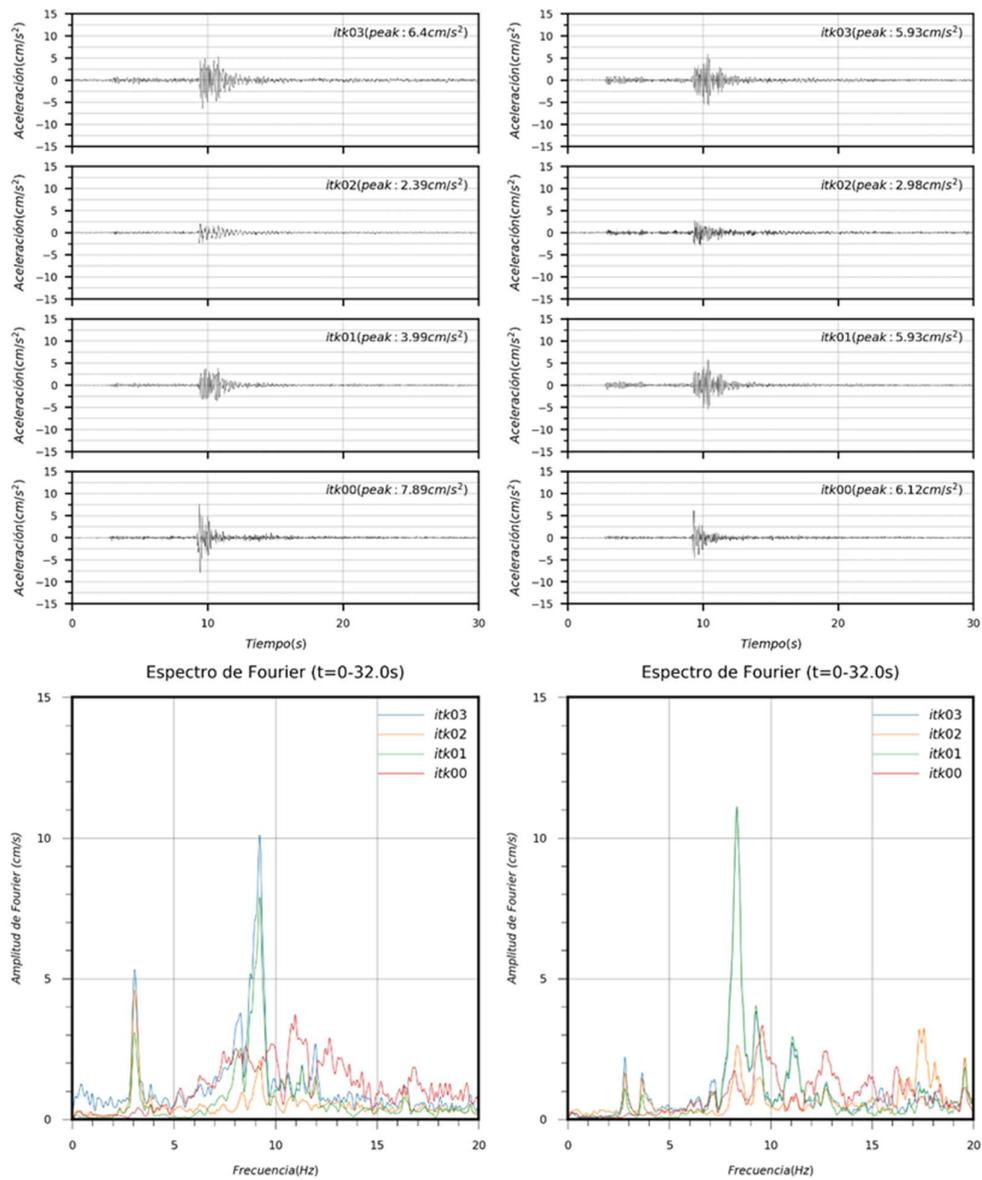


Figura A.1.2 Registros de aceleración espectro del Fourier del CIIFC, Fecha 04/11/2016  
Fuente: Elaboración propia

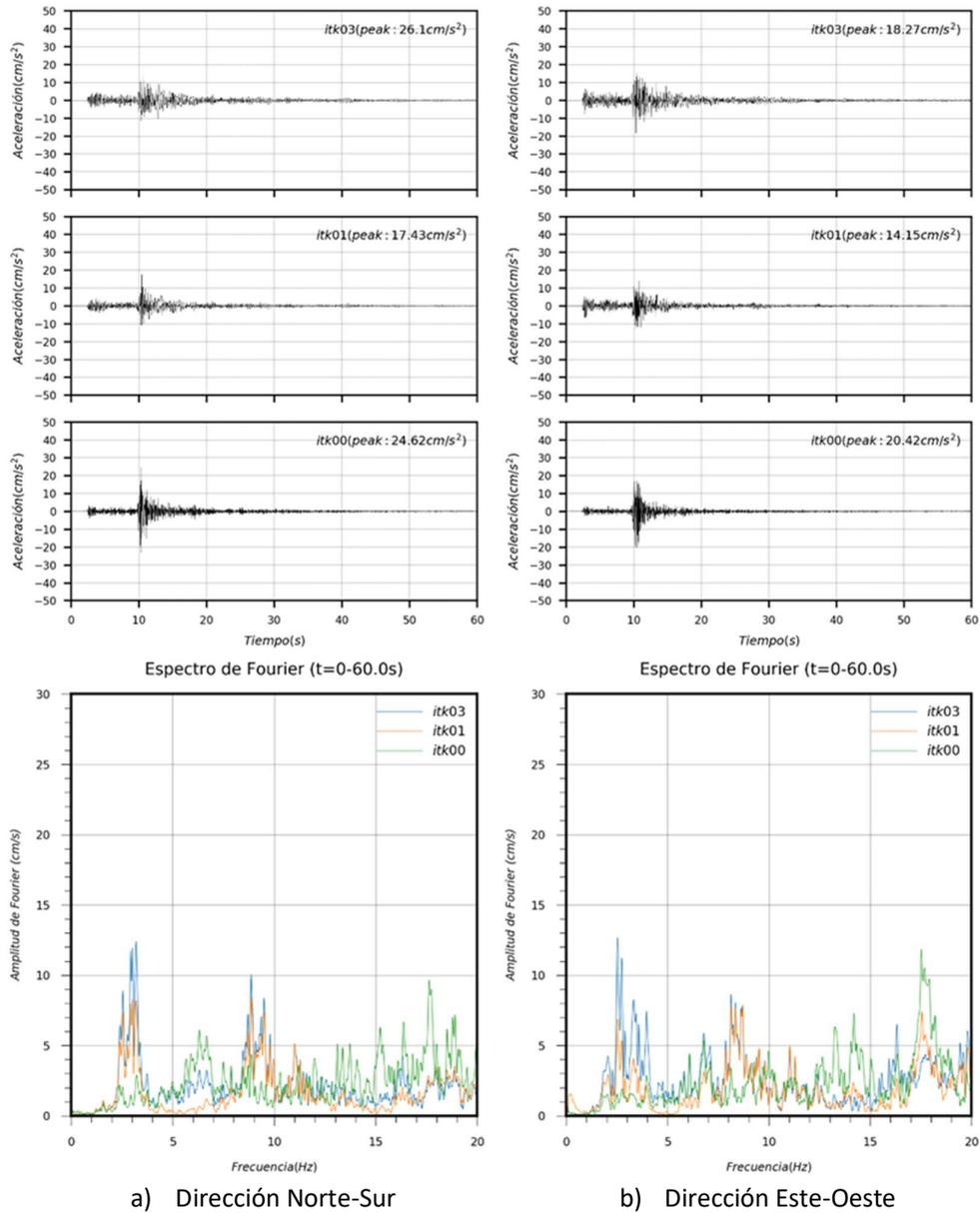


Figura A.1.3 Registros de aceleración espectro del Fourier del CIIFIC, Fecha 27/11/2016  
 Fuente: Elaboración propia

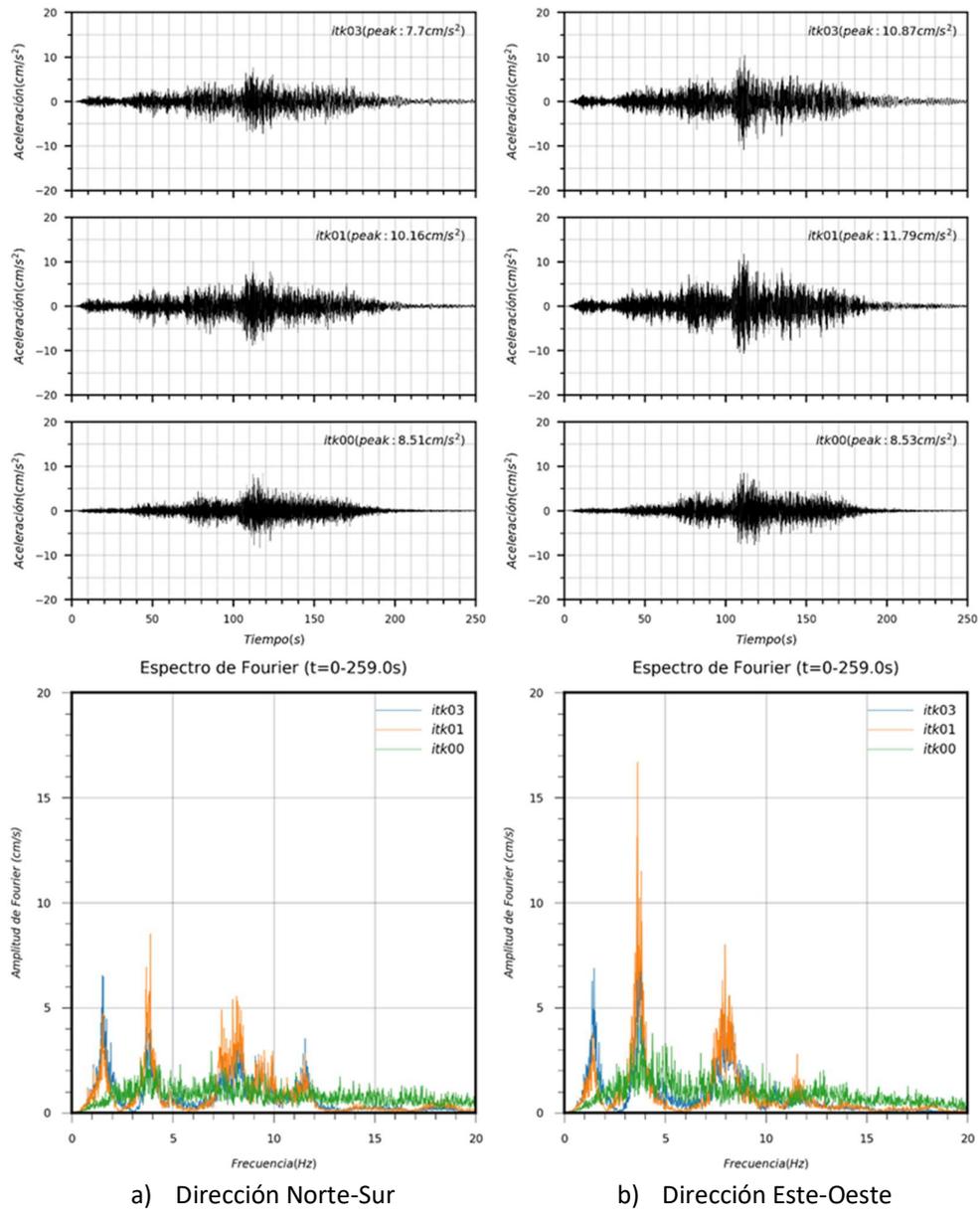
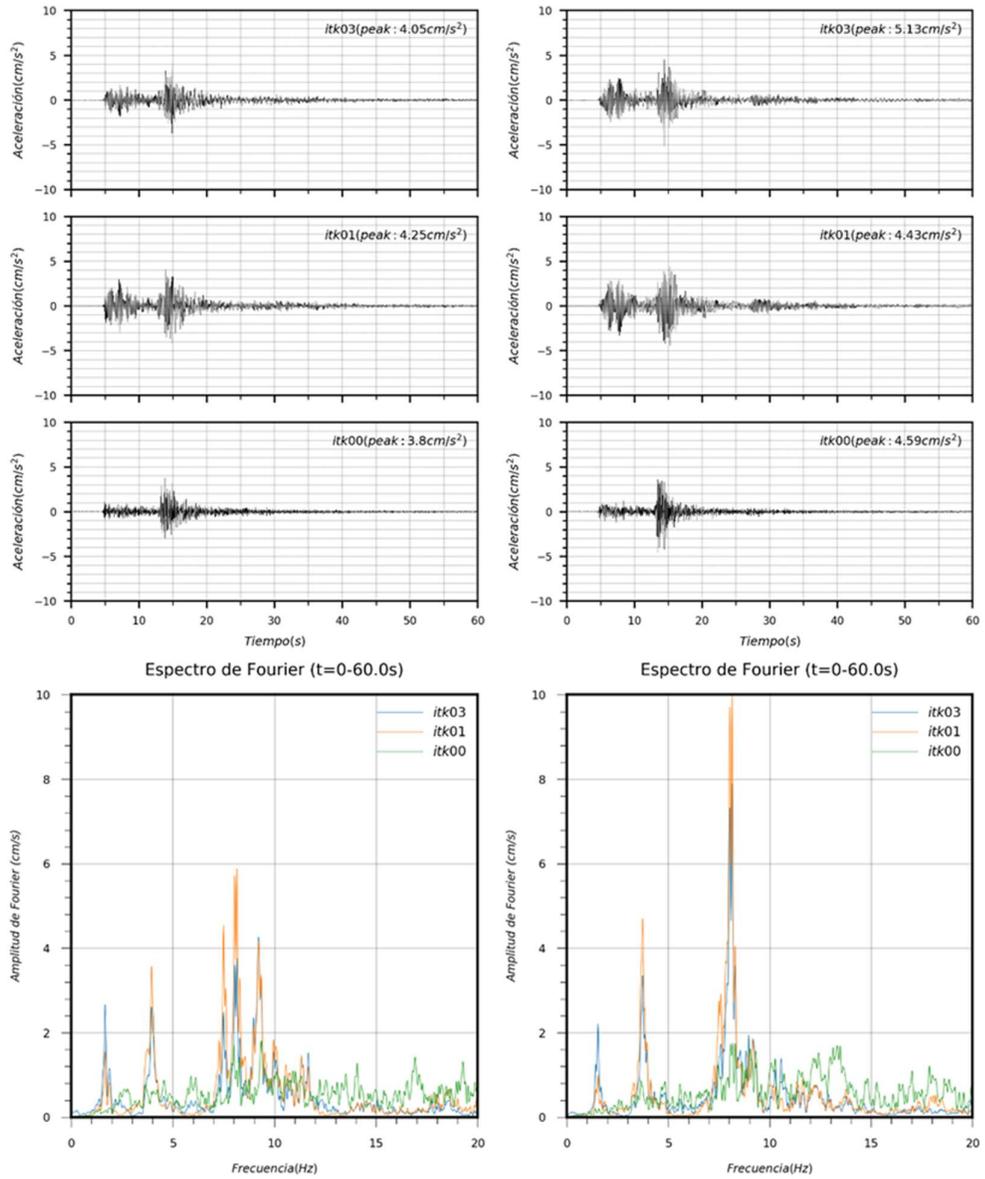


Figura A.1.4 Registros de aceleración espectro del Fourier del CIIFIC, Fecha 26/05/2019

Fuente: Elaboración propia

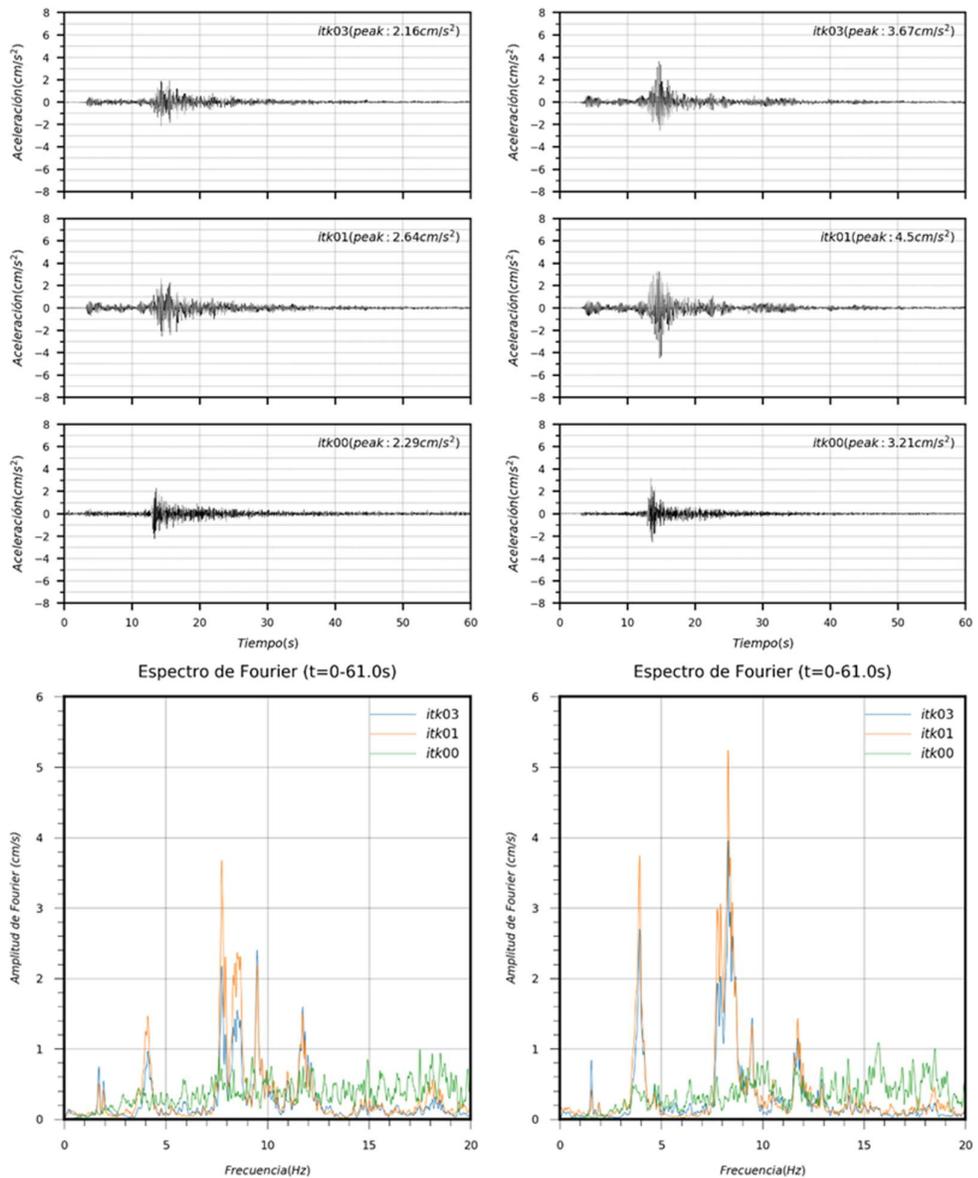


a) Dirección Norte-Sur

b) Dirección Este-Oeste

Figura A.1.5 Registros de aceleración espectro del Fourier del CIIFIC, Fecha 28/05/2019

Fuente: Elaboración propia



a) Dirección Norte-Sur

b) Dirección Este-Oeste

Figura A.1.6 Registros de aceleración espectro del Fourier del CIIFIC, Fecha 20/06/2019

Fuente: Elaboración propia

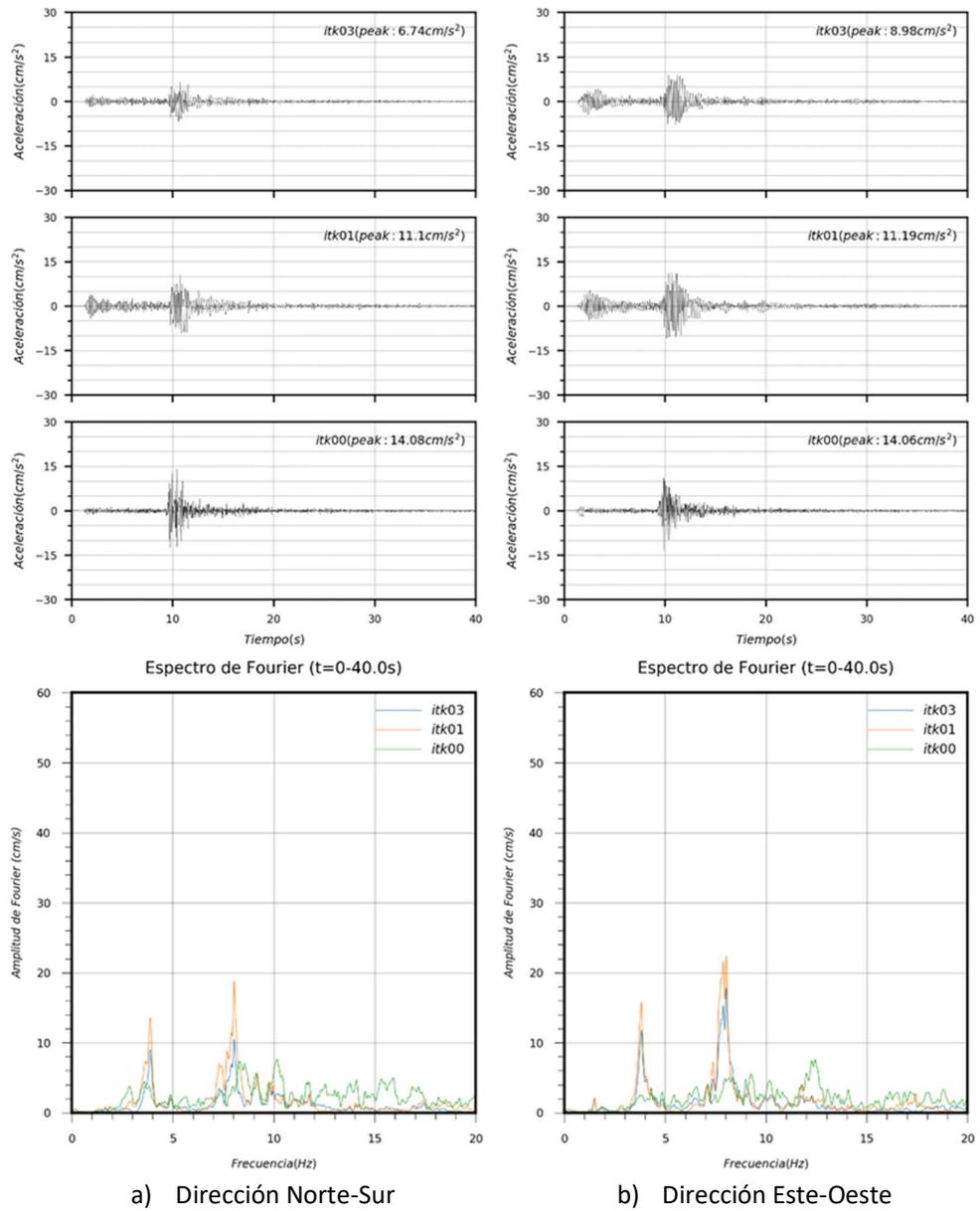


Figura A.1.7 Registros de aceleración espectro del Fourier del CIIFIC, Fecha 25/10/2019  
Fuente: Elaboración propia

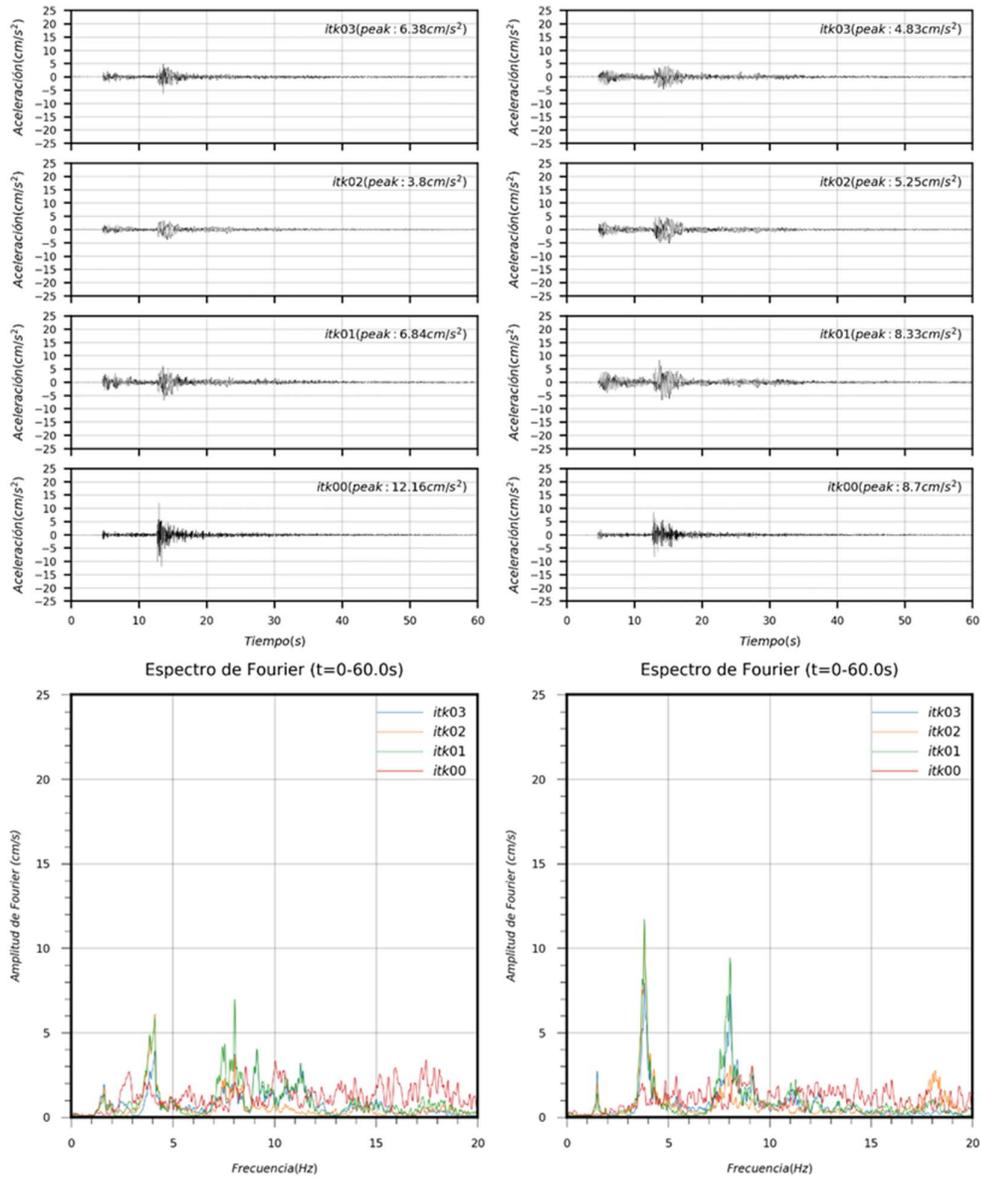


Figura A.1.8 Registros de aceleración espectro del Fourier del CIIFC, Fecha 12/11/2019  
Fuente: Elaboración propia

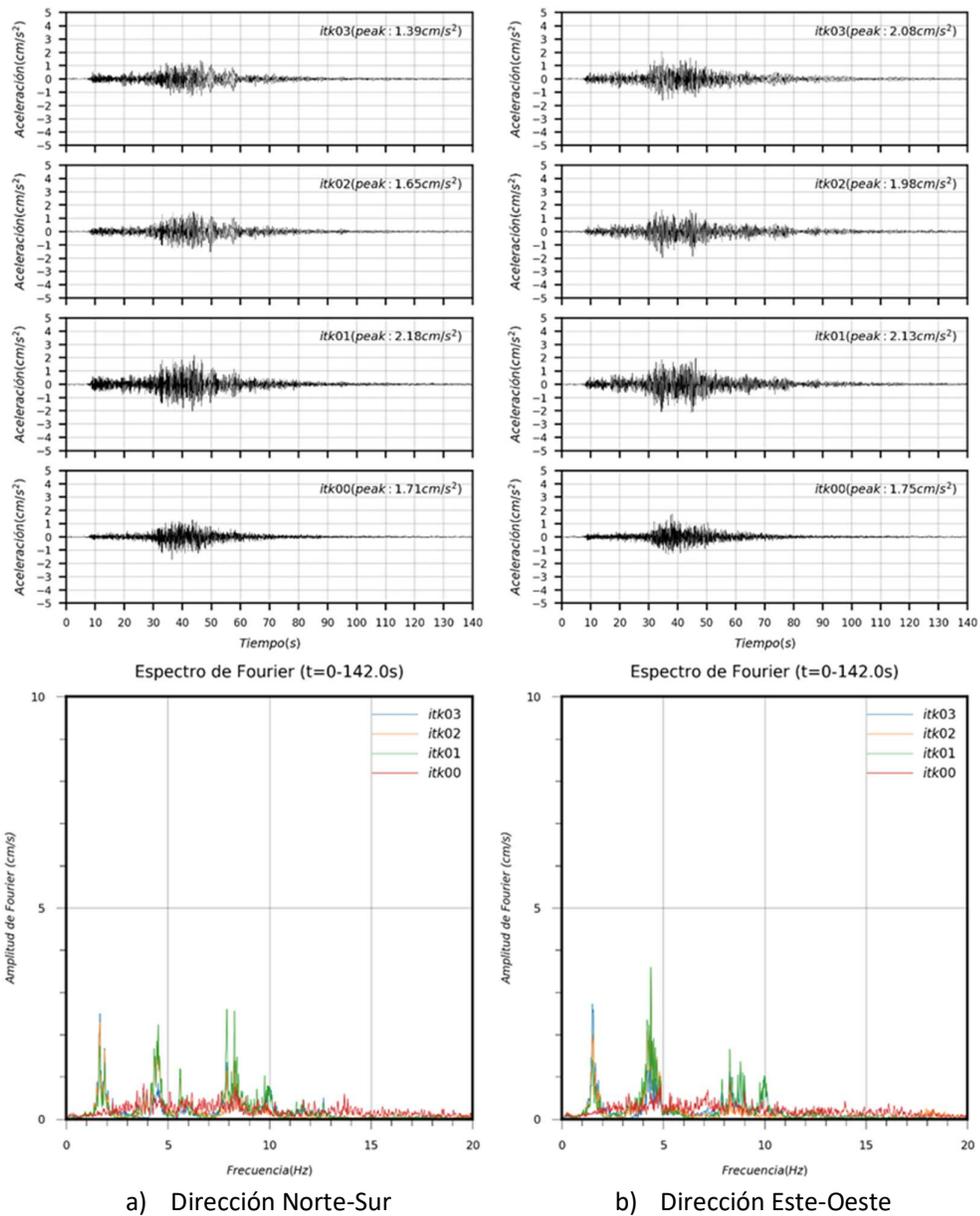


Figura A.1.9 Registros de aceleración espectro del Fourier del CIIFIC, Fecha 04/12/2019  
Fuente: Elaboración propia

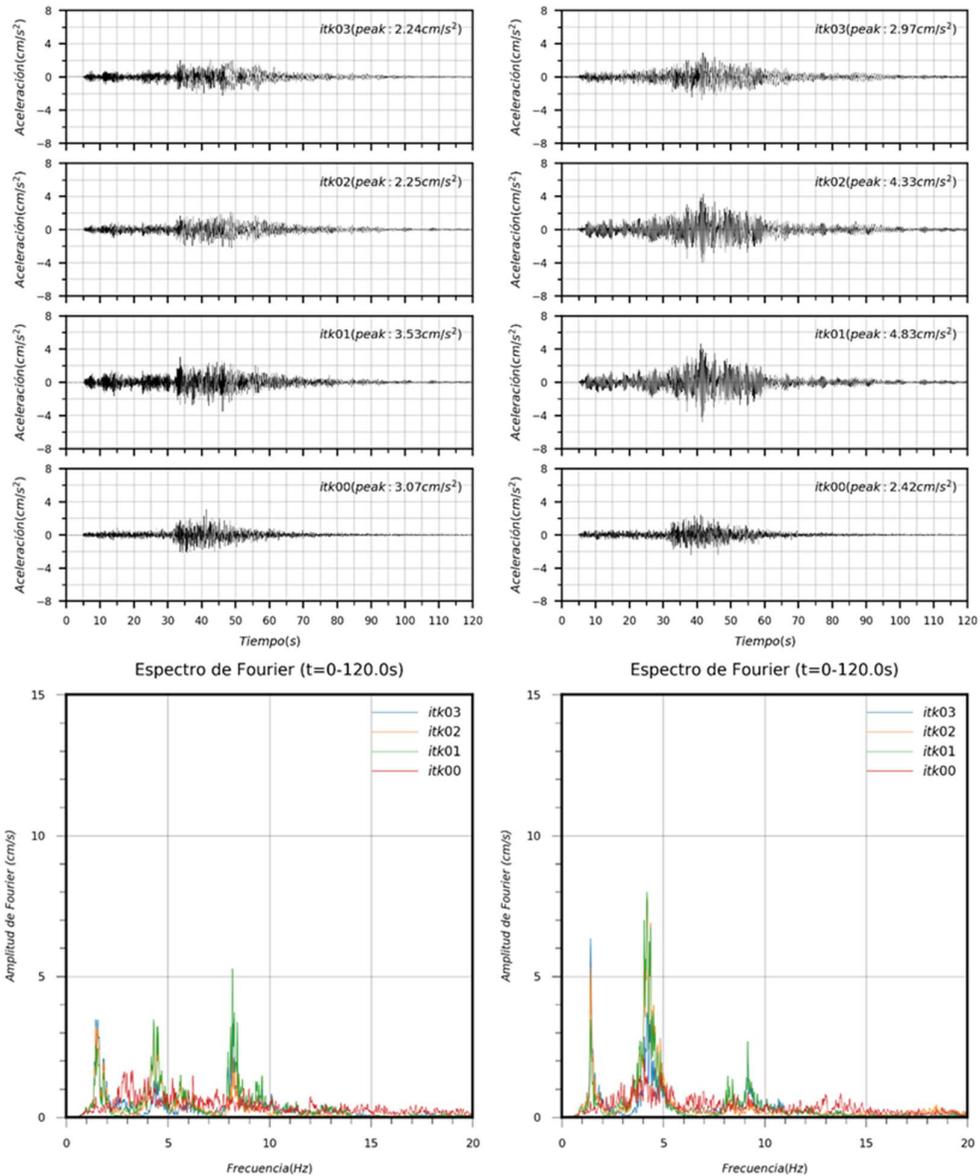


Figura A.1.10 Registros de aceleración espectro del Fourier del CIIFC, Fecha 15/01/2020  
Fuente: Elaboración propia

**ANEXO 2**

**Demanda Sísmica Sintética (EPU 2475 años)**

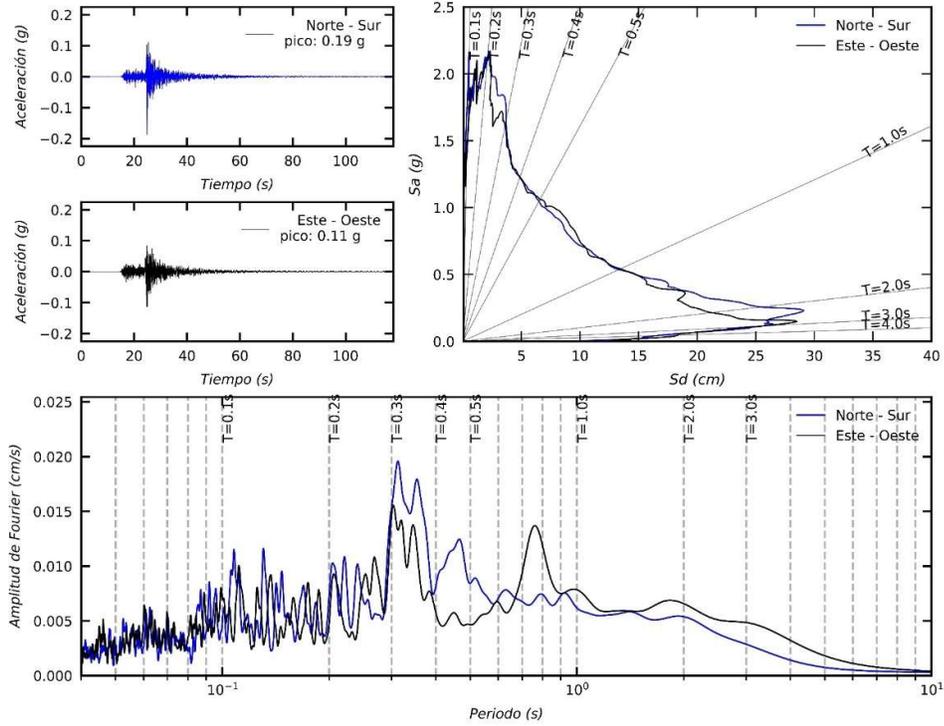


Figura A 2.1 Aceleraciones, Espectro de Respuesta y de Fourier Registros Sintético Tacna 2010

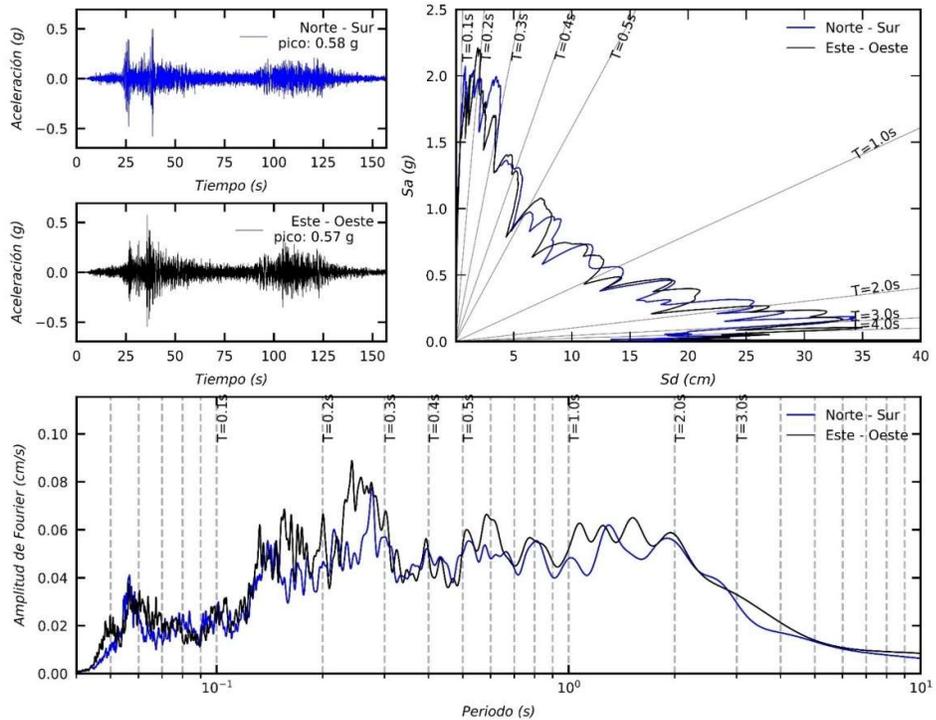


Figura A 2.2 Aceleraciones, Espectro de Respuesta y de Fourier Registros Sintético Pisco 2007.  
 Fuente: Elaboración propia

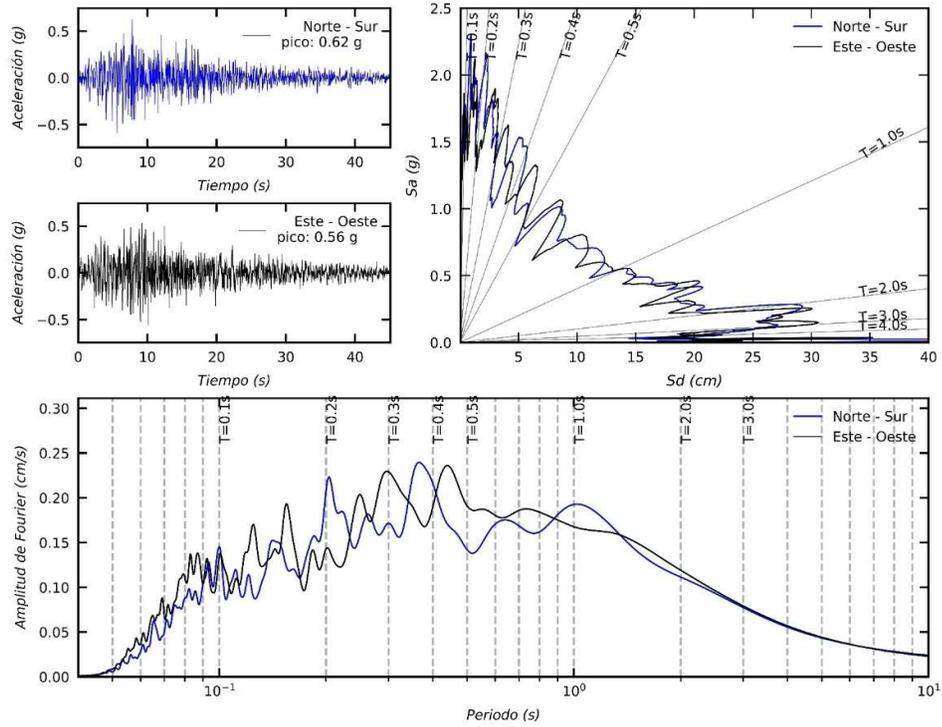


Figura A 2.3 Aceleraciones, Espectro de Respuesta y de Fourier Registros Sintético Huaraz 1970.

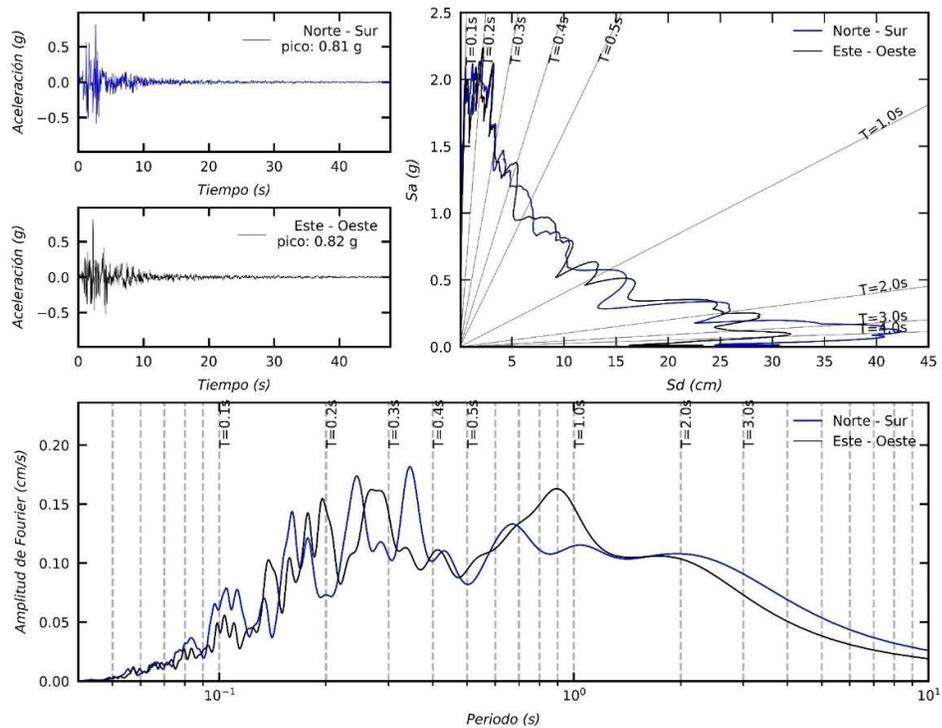


Figura A 2.4 Aceleraciones, Espectro de Respuesta y de Fourier Registros Sintético Lima noviembre 1974.

Fuente: Elaboración propia

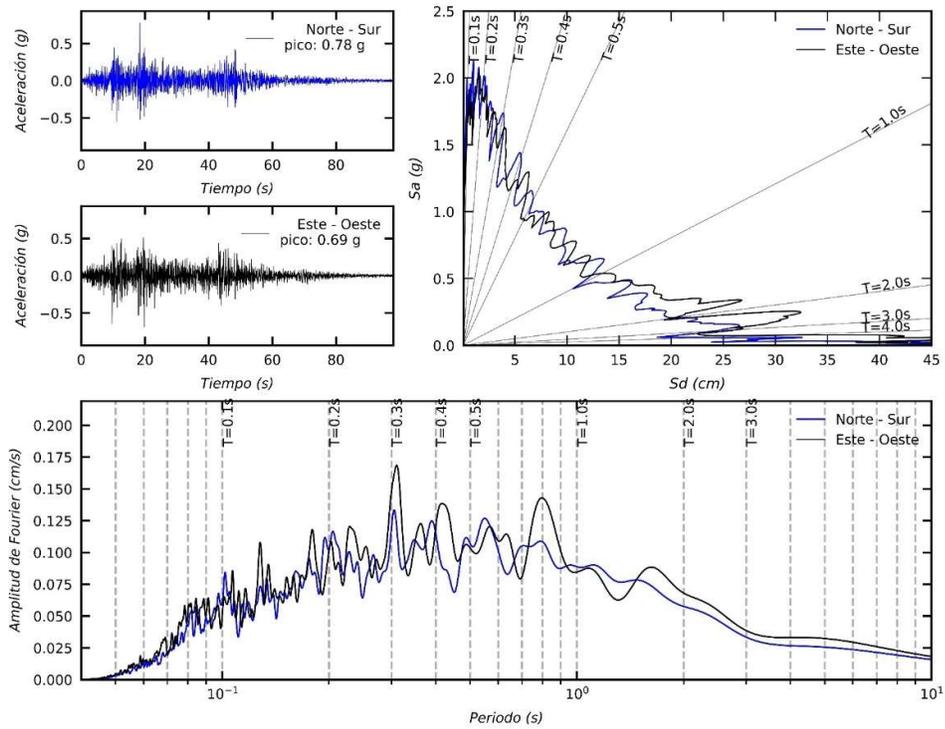


Figura A 2.5 Aceleraciones, Espectro de Respuesta y de Fourier Registros Sintético Lima octubre 1974.

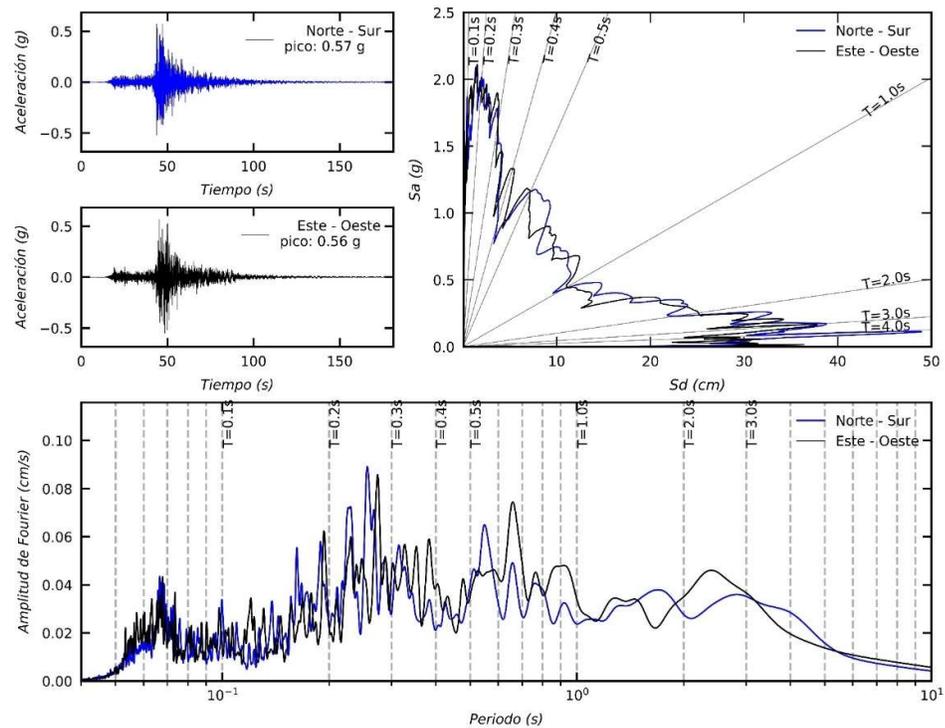


Figura A 2.6 Aceleraciones, Espectro de Respuesta y de Fourier Registros Sintético Iquique 2005.

Fuente: Elaboración propia

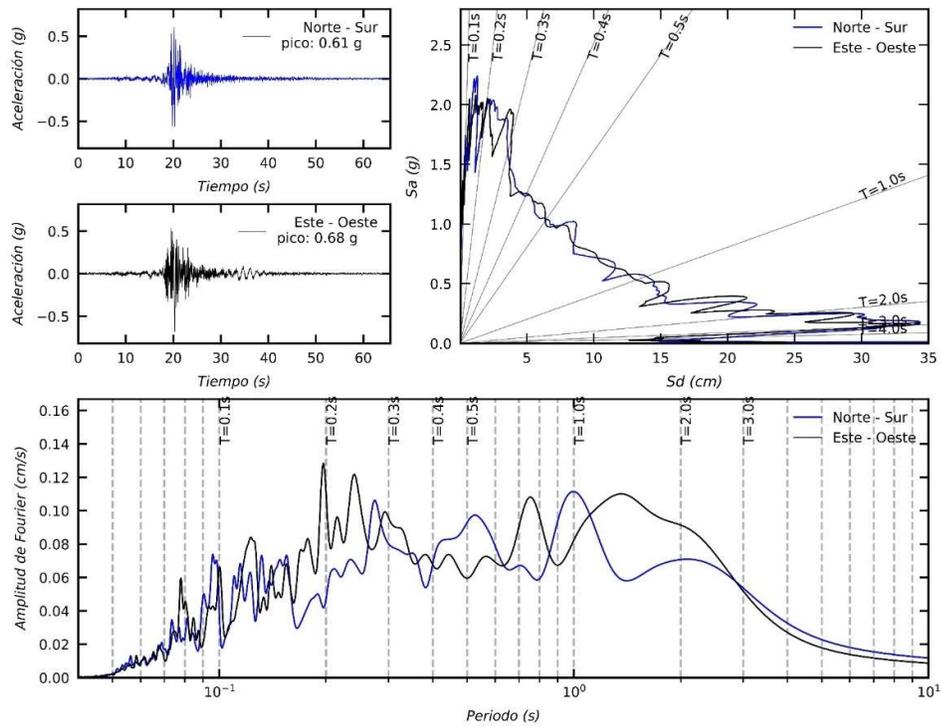


Figura A 2.7 Aceleraciones, Espectro de Respuesta y de Fourier Registros Sintético Lima 1966.

Fuente: Elaboración propia

**Demanda Sísmica Sintética (Escala 1G PGA)**

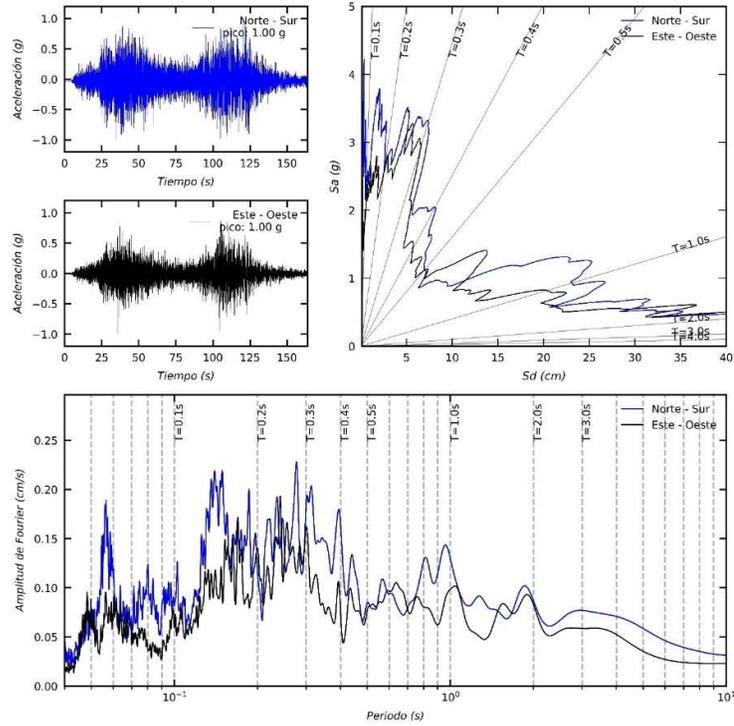


Figura A 2.8 Aceleraciones, Espectro de Respuesta y de Fourier Registros Sintético Pisco 2007 (Escala 1G PGA).

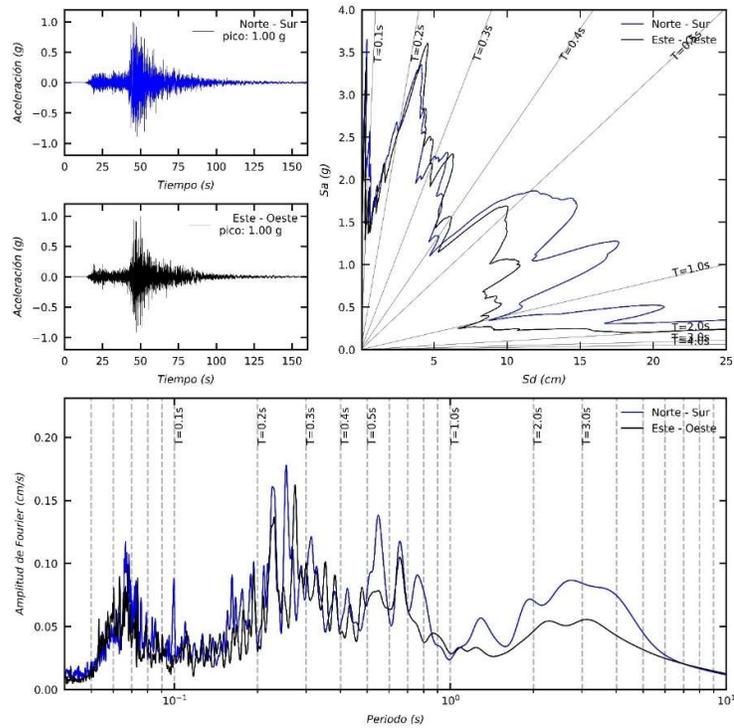


Figura A 2.9 Aceleraciones, Espectro de Respuesta y de Fourier Registros Sintético Iquique 2005 (Escala 1G PGA).

Fuente: Elaboración propia

## RESPUESTA SÍSMICA ELÁSTICA

### Respuesta Sísmica Lineal Tacna 2010

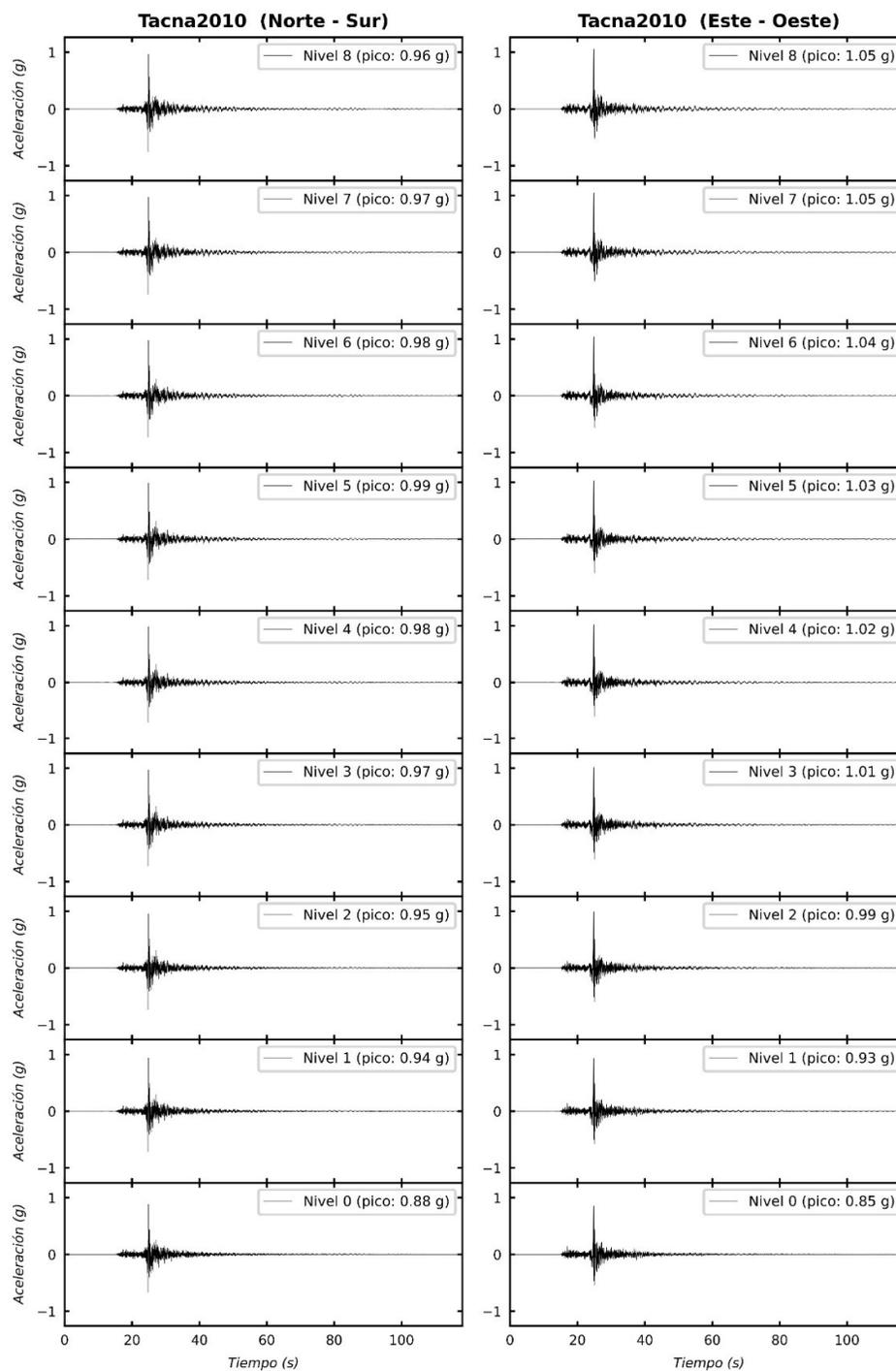


Figura A 2.10 Respuesta en Aceleraciones por nivel relativas al terreno Registro sintético Tacna 2010.

Fuente: Elaboración propia

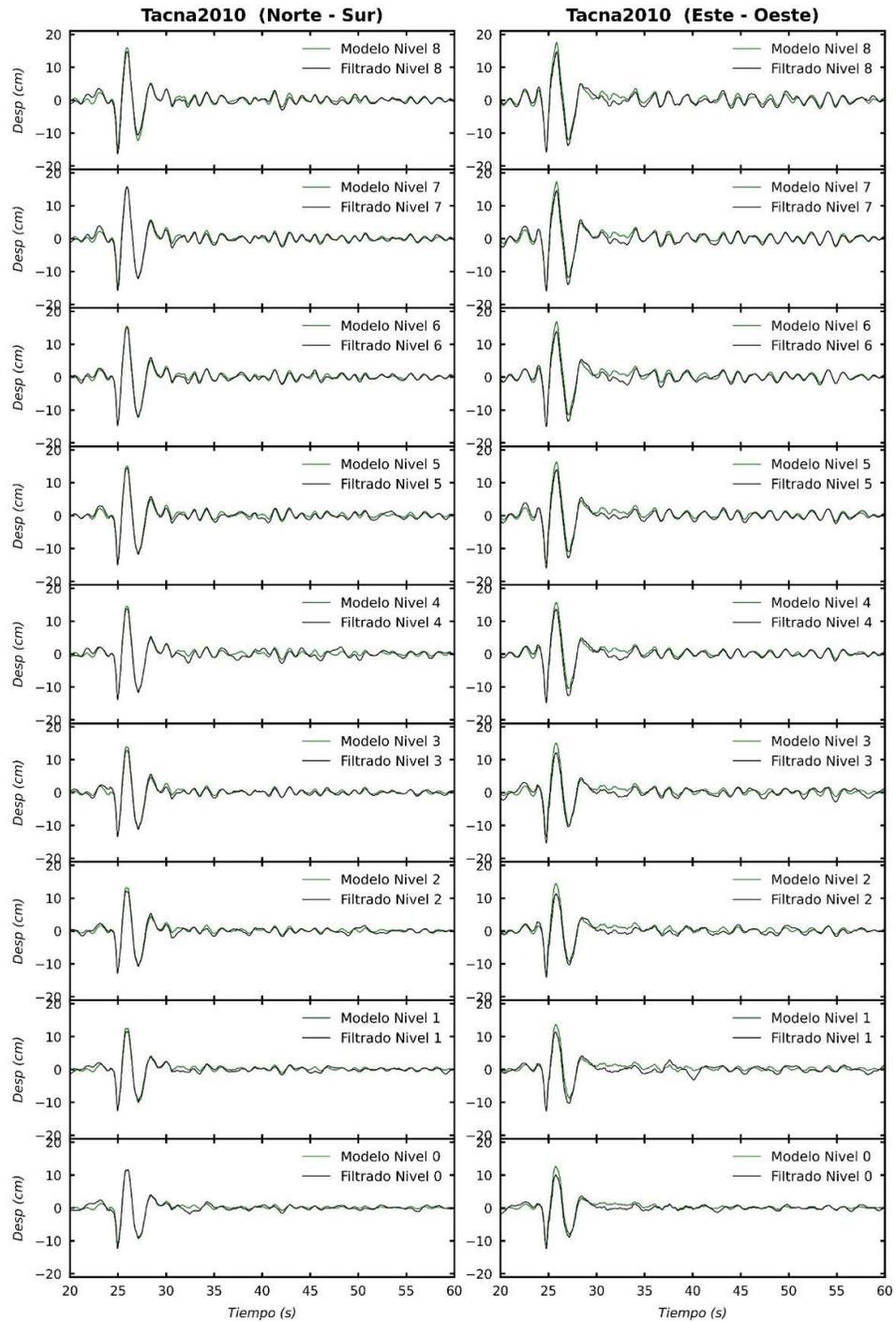
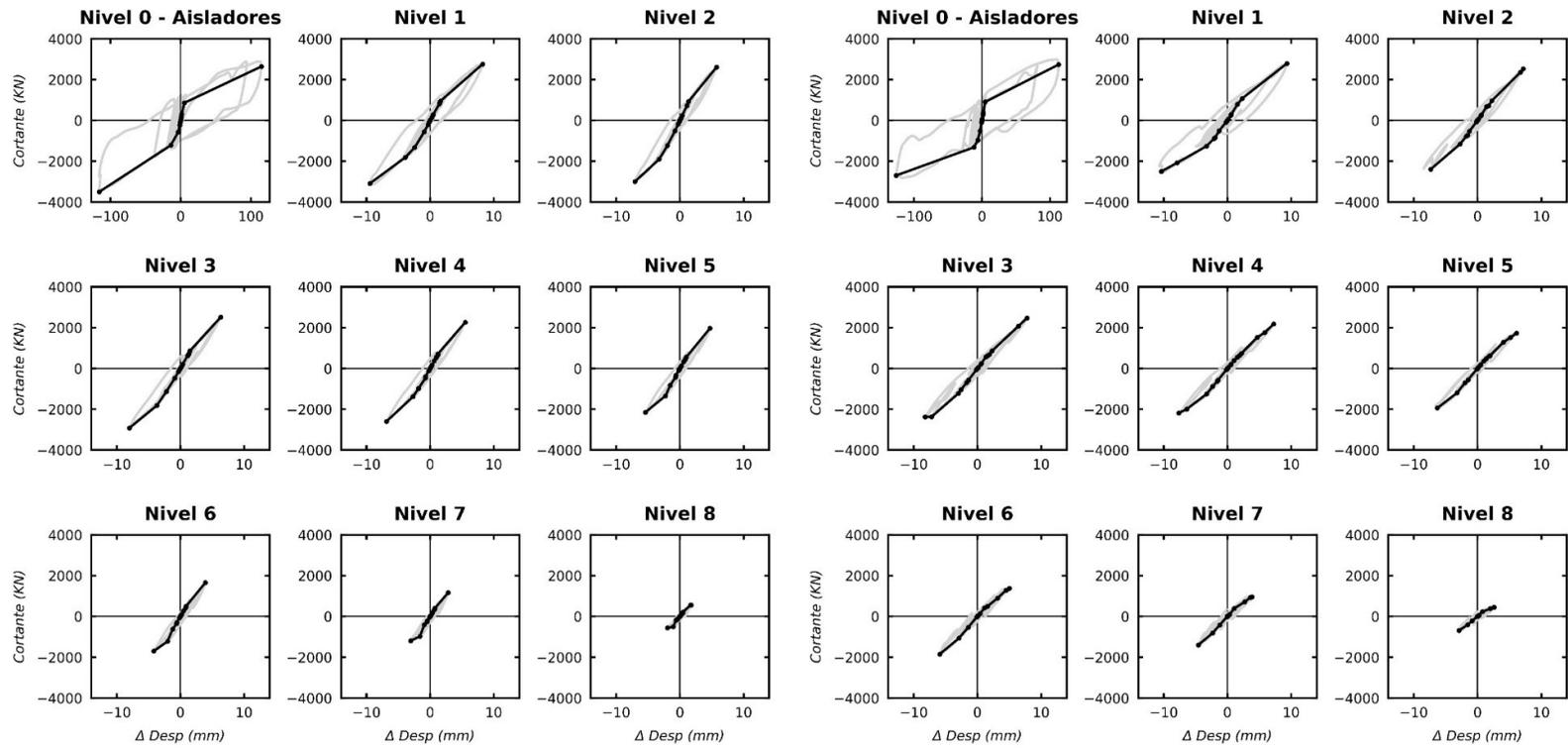


Figura A 2.11 Respuesta en Desplazamientos por nivel relativos al terreno del modelo y filtradas para el Registro sintético Tacna 2010.

Fuente: Elaboración propia



a) Dirección Norte-Sur

b) Dirección Este-Oeste

Figura A 2.12 Ciclos de histéresis y curvas de capacidad para cada nivel, registro sintético Tacna 2010.  
 Fuente: Elaboración propia

### Respuesta Sísmica Lineal Pisco 2007

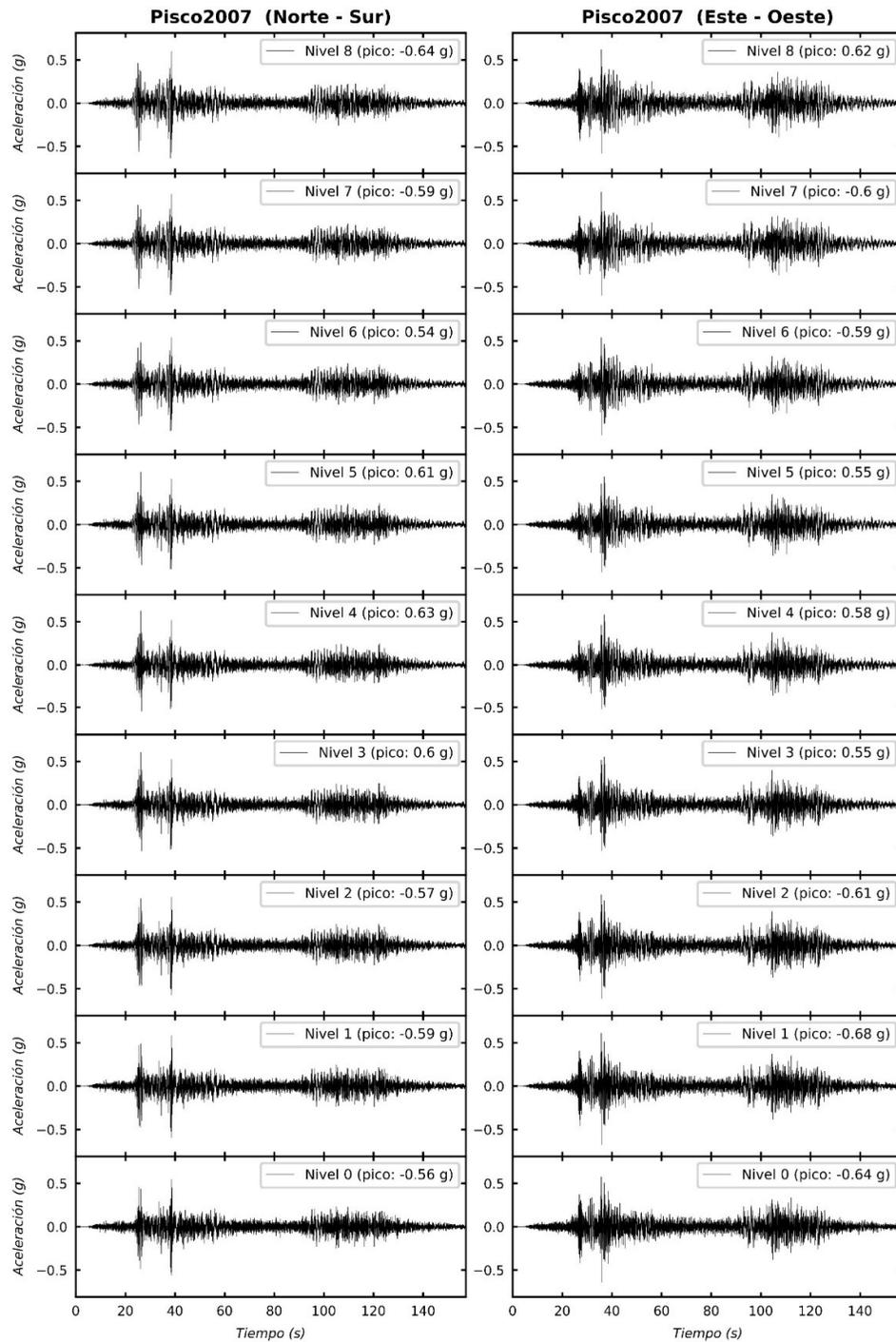


Figura A 2.13 Respuesta en Aceleraciones por nivel relativas al terreno Registro sintético Pisco 2007.

Fuente: Elaboración propia

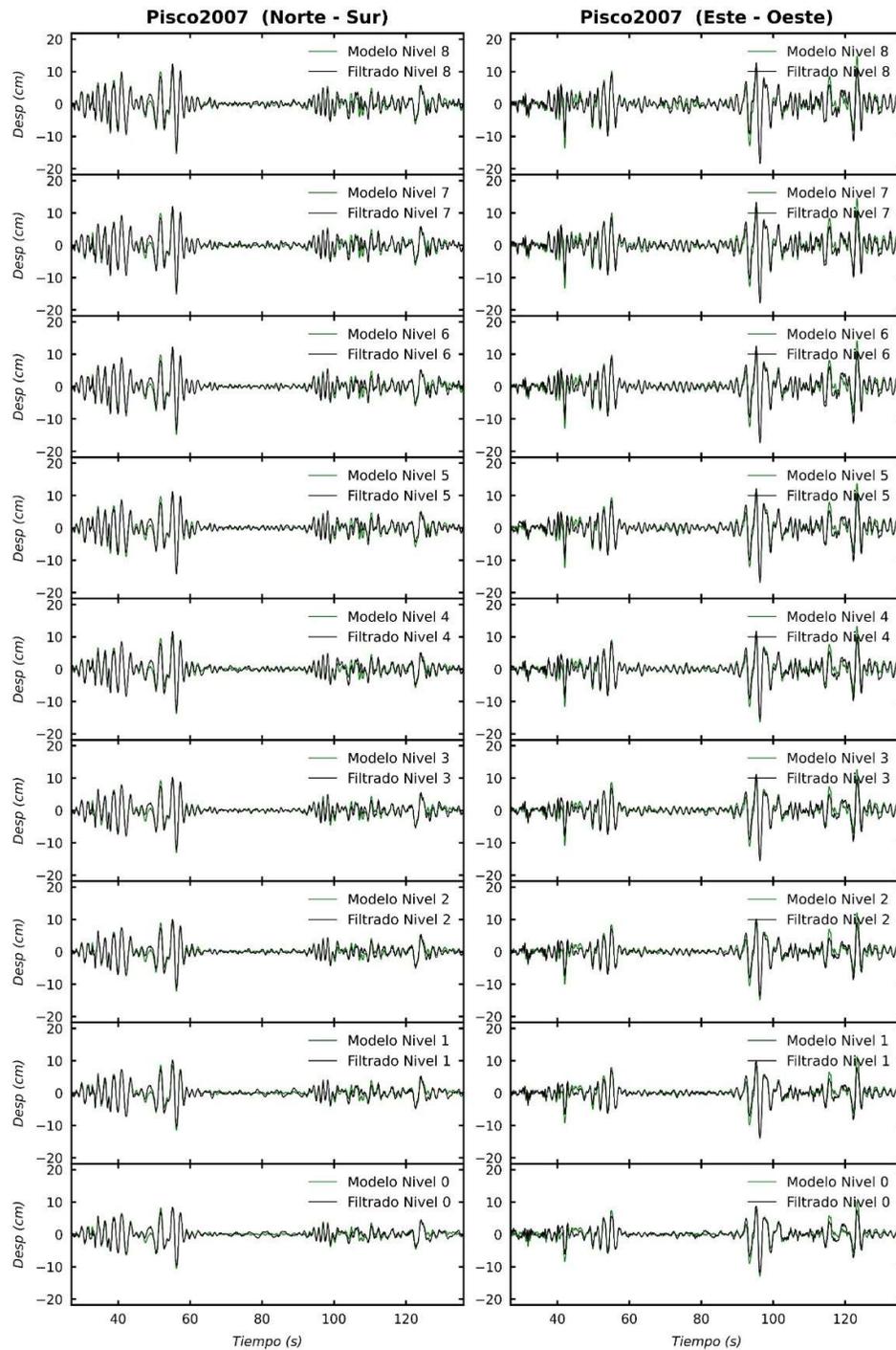
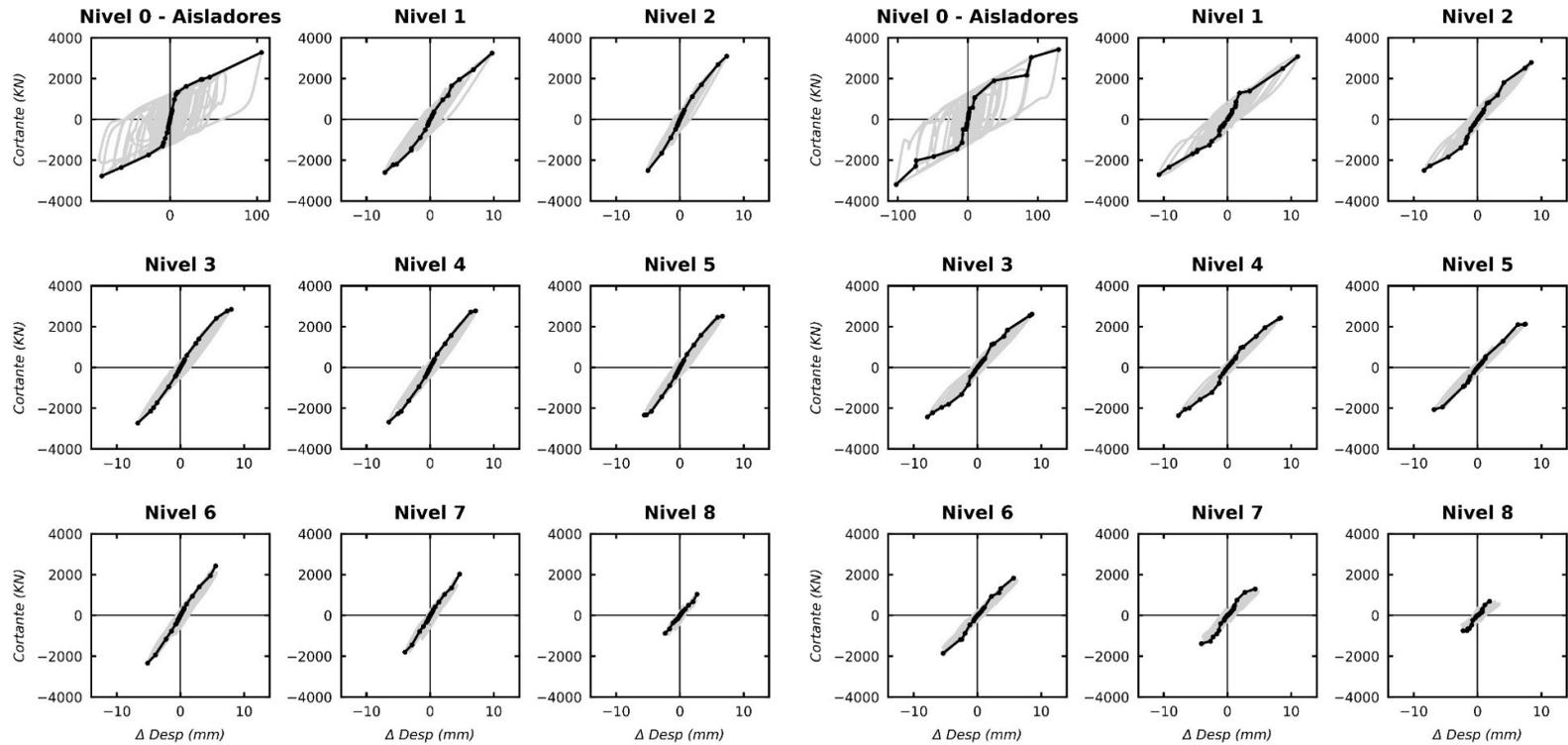


Figura A 2.14 Respuesta en Desplazamientos por nivel relativos al terreno del modelo y filtradas para el Registro sintético Pisco 2007.

Fuente: Elaboración propia



a) Dirección Norte-Sur

b) Dirección Este-Oeste

Figura A 2.15 Ciclos de histéresis y curvas de capacidad para cada nivel, registro sintético Pisco 2007.

Fuente: Elaboración propia

### Respuesta Sísmica Lineal Huaraz 1970

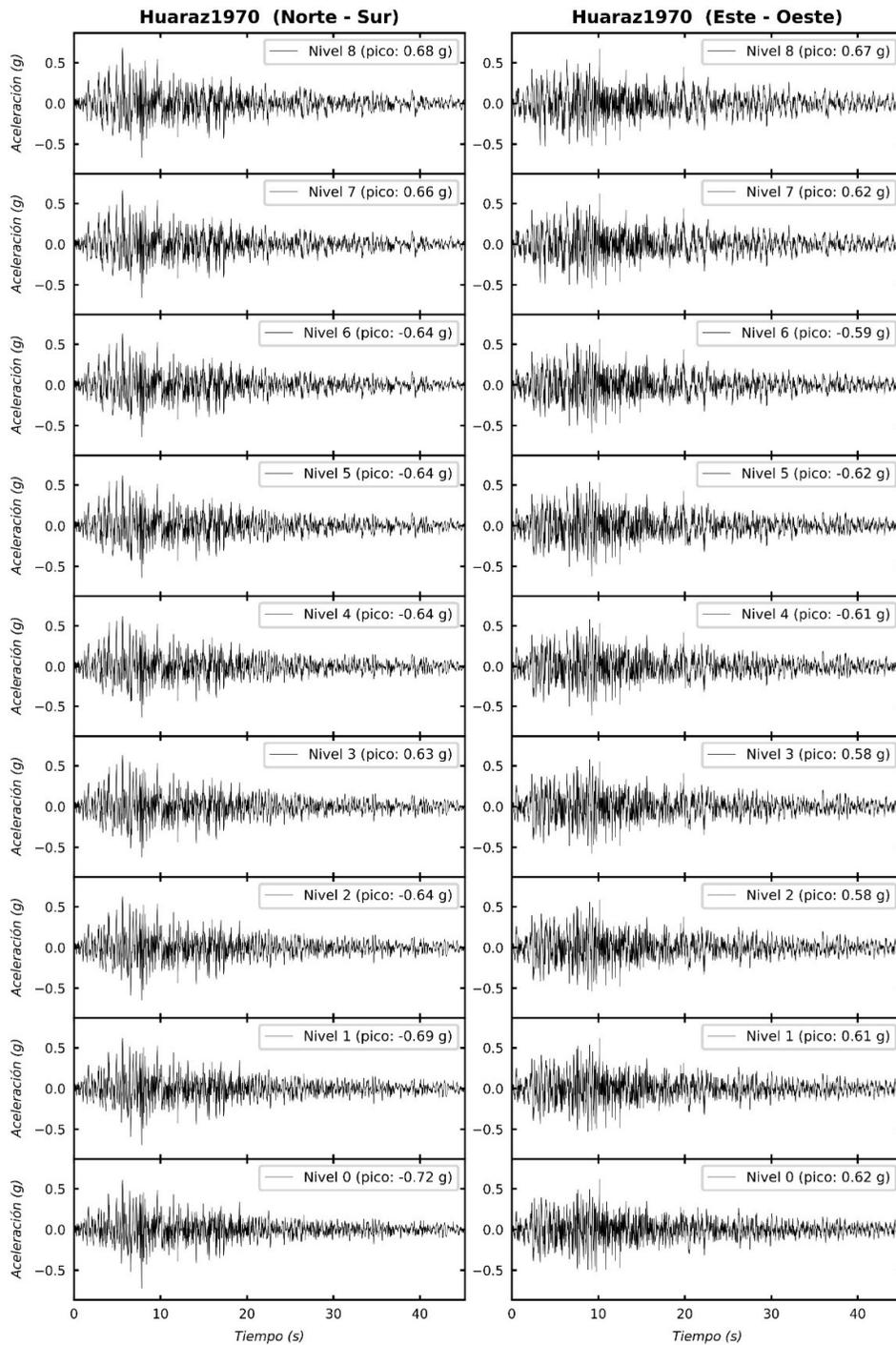


Figura A 2.16 Respuesta en Aceleraciones por nivel relativas al terreno Registro sintético Huaraz 1970.

Fuente: Elaboración propia

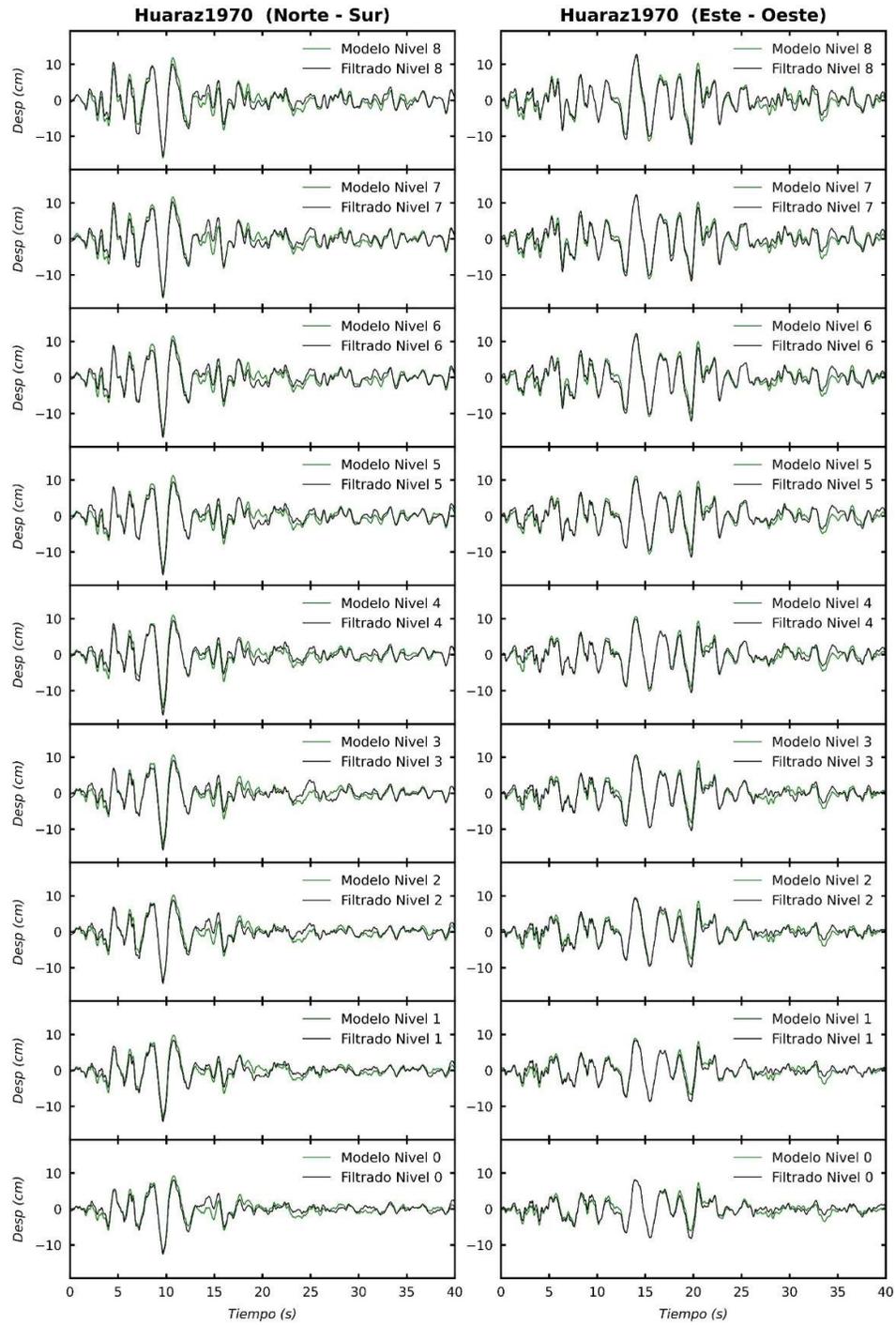
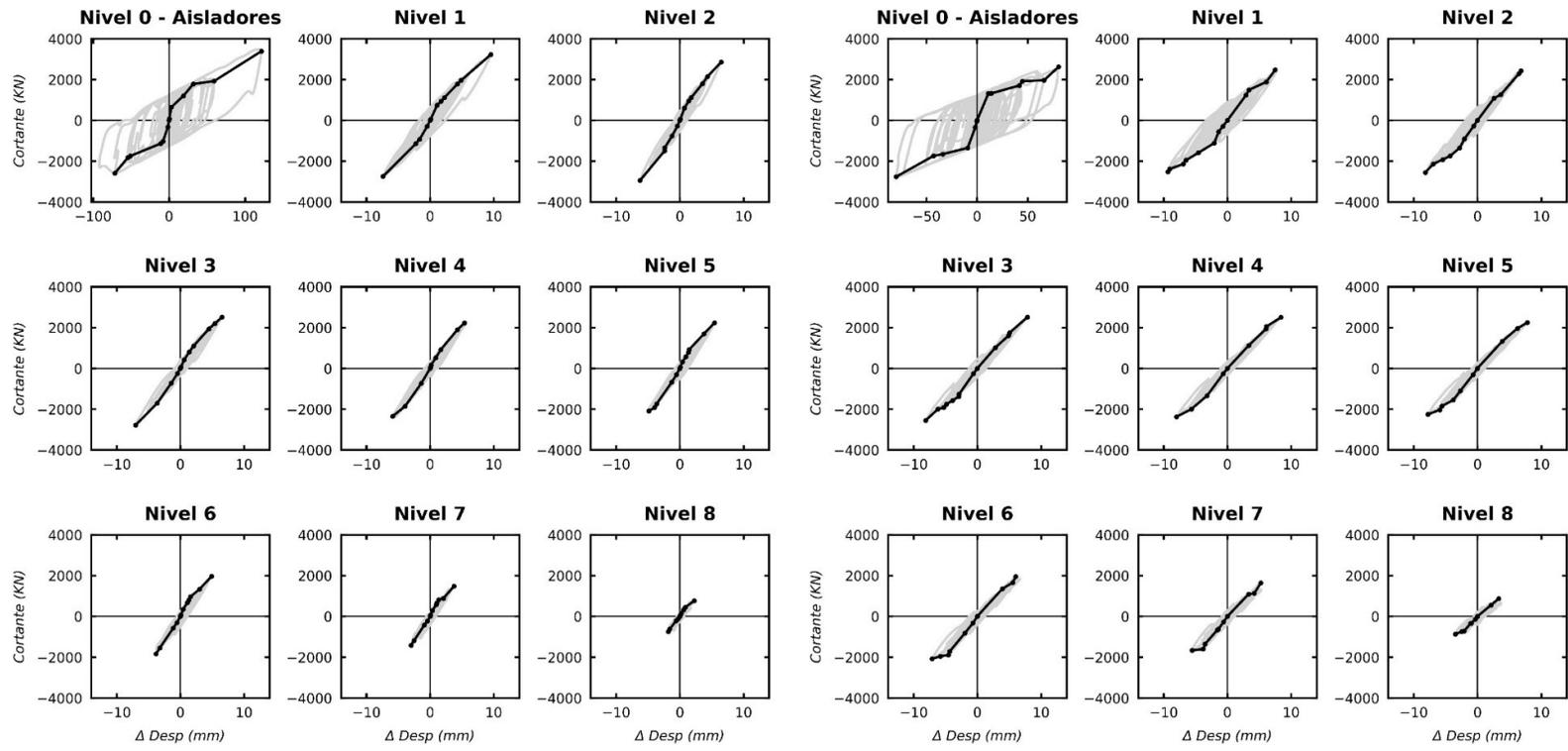


Figura A 2.17 Respuesta en Desplazamientos por nivel relativas al terreno del modelo y filtradas para el Registro sintético Huaraz 1970.

Fuente: Elaboración propia



a) Dirección Norte-Sur

b) Dirección Este-Oeste

Figura A 2.18 Ciclos de histéresis y curvas de capacidad para cada nivel, registro sintético Huaraz 1970.  
 Fuente: Elaboración propia

### Respuesta Sísmica Lineal Lima noviembre 1974

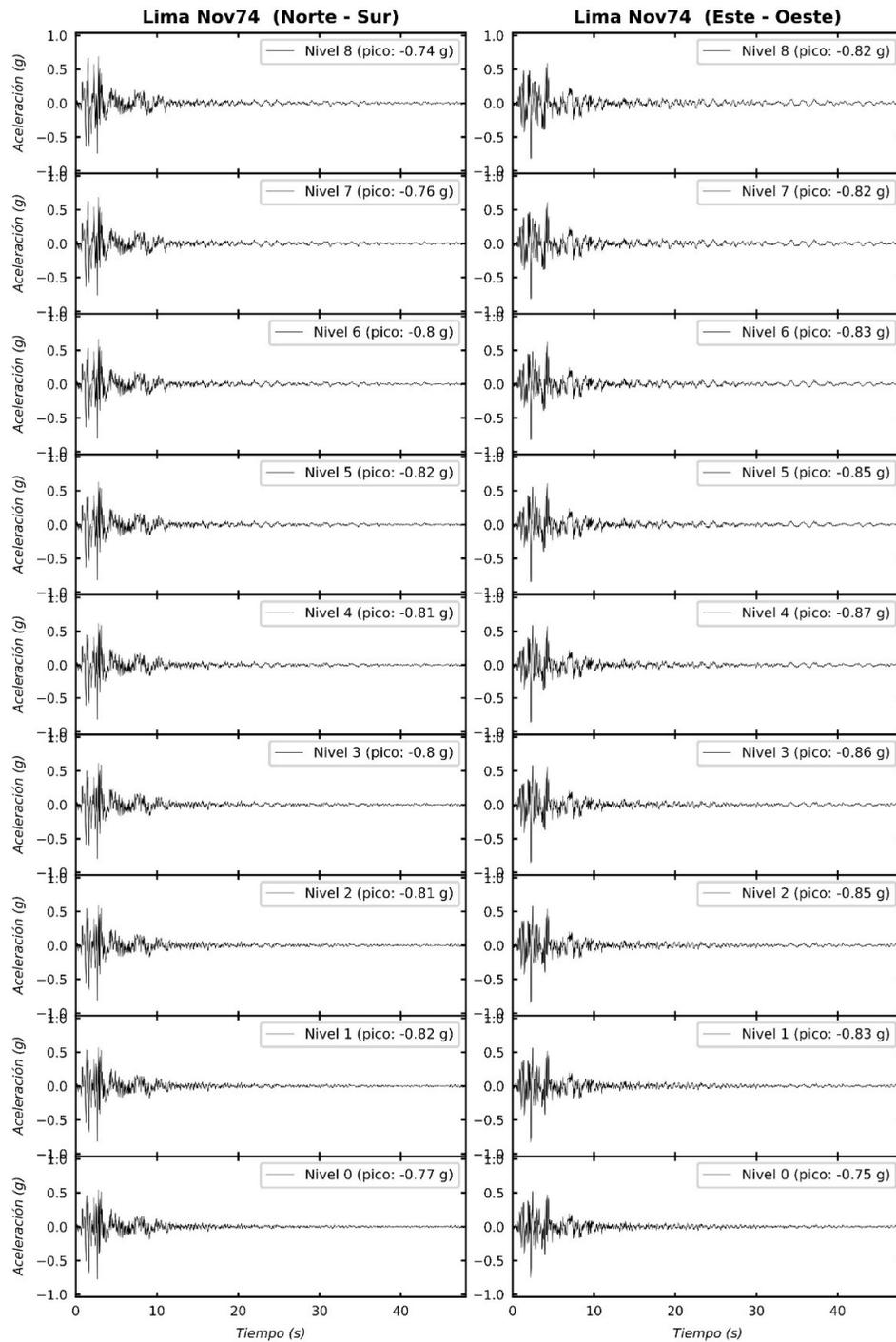


Figura A 2.19 Respuesta en Aceleraciones por nivel relativos al terreno Registro sintético Lima noviembre 1974.

Fuente: Elaboración propia

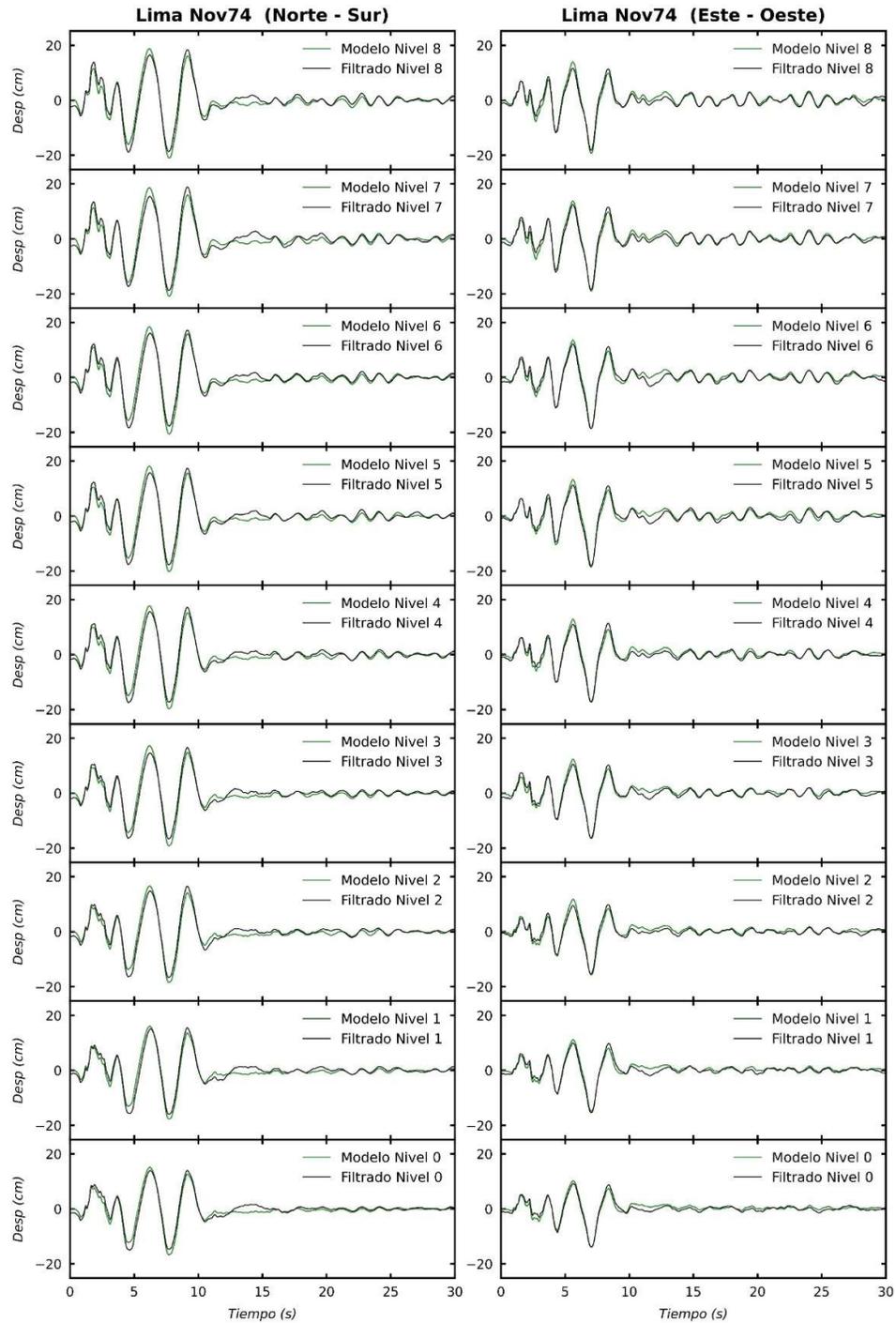
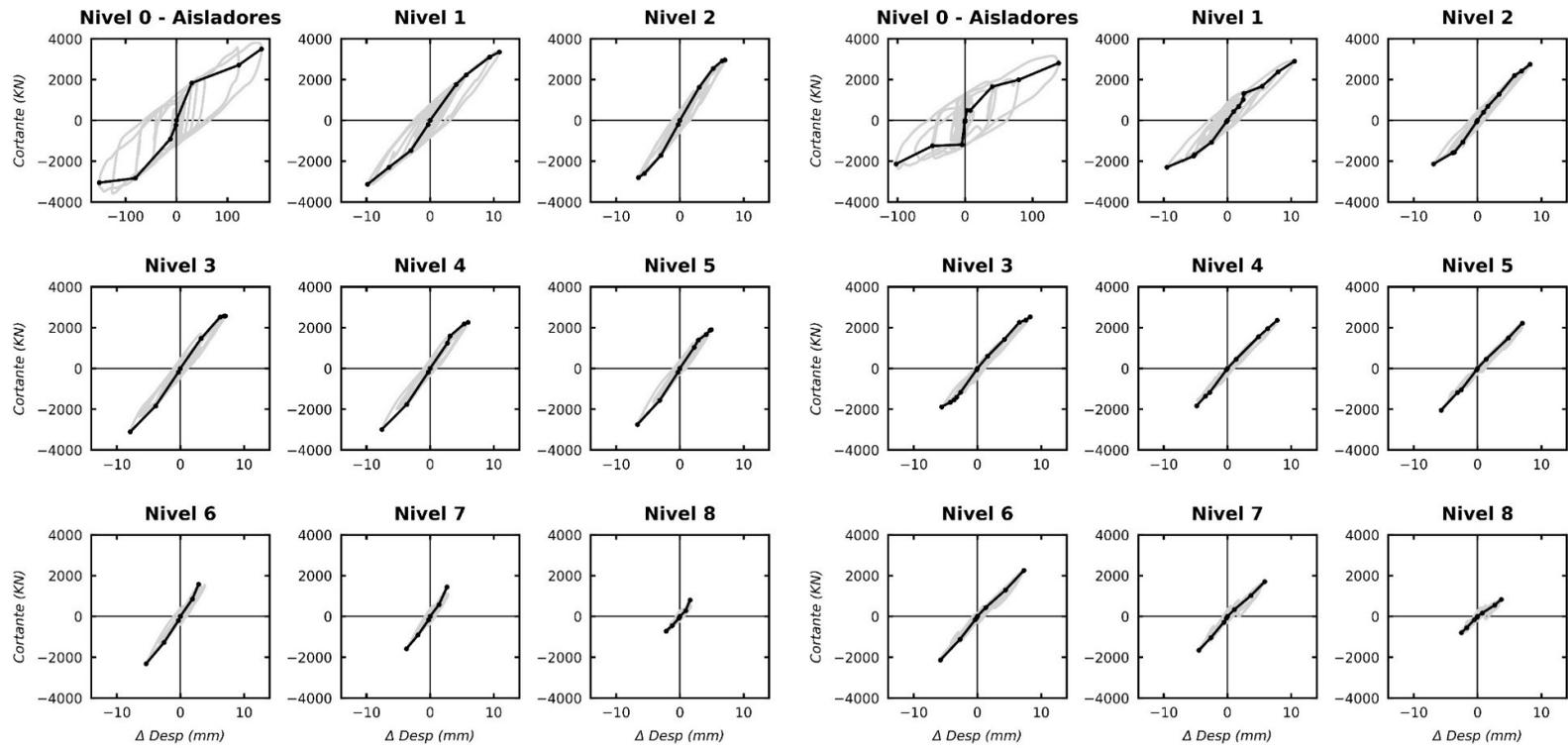


Figura A 2.20 Respuesta en Desplazamientos por nivel relativos al terreno del modelo y filtradas para el Registro sintético Lima noviembre 1974.

Fuente: Elaboración propia



a) Dirección Norte-Sur

b) Dirección Este-Oeste

Figura A 2.21 Ciclos de histéresis y curvas de capacidad para cada nivel, registro sintético Lima noviembre 1974.  
 Fuente: Elaboración propia

### Respuesta Sísmica Lineal Lima octubre 1974

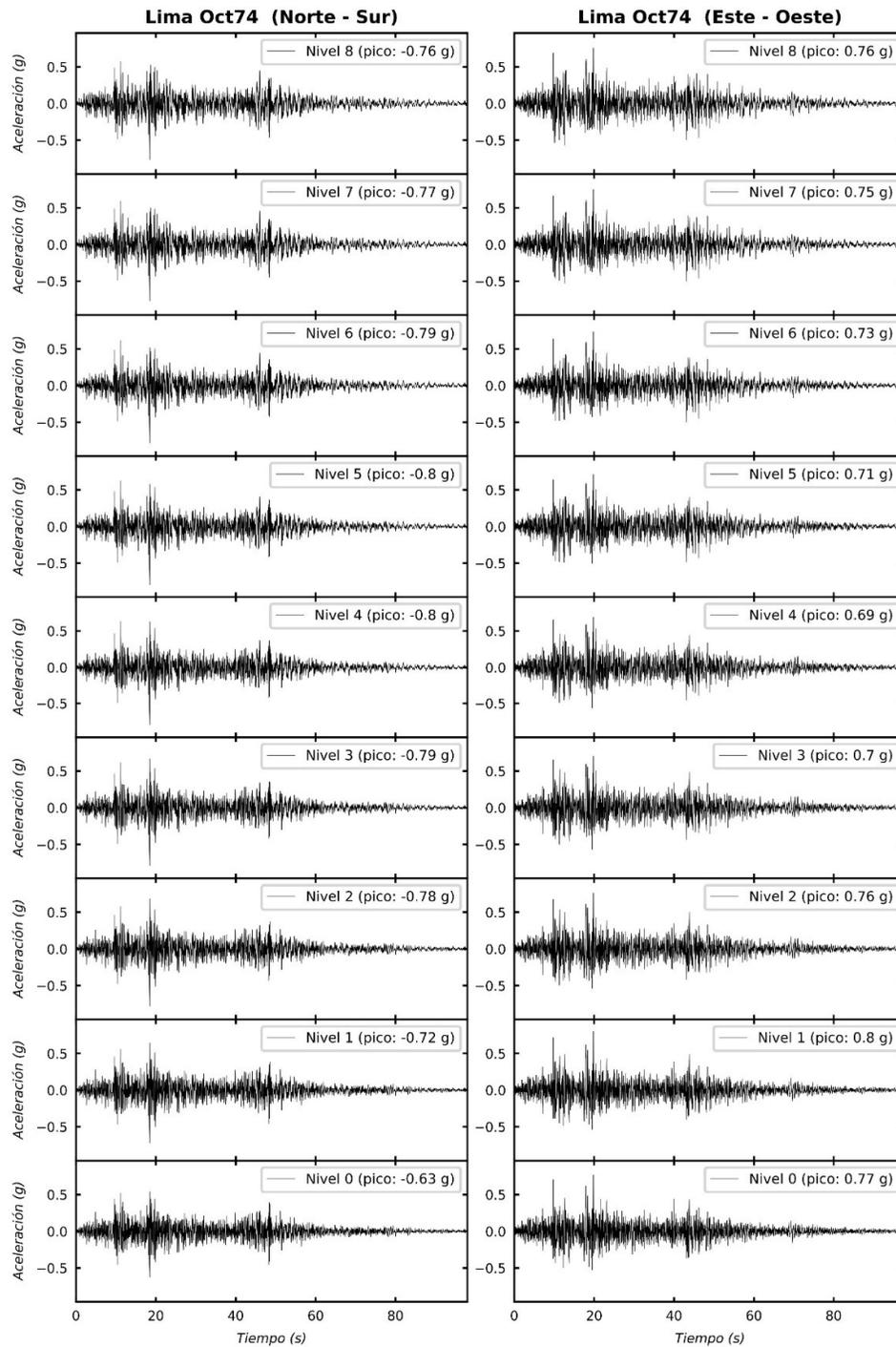


Figura A.2.22 Respuesta en Aceleraciones por nivel relativas al terreno Registro sintético Lima octubre 1974.

Fuente: Elaboración propia

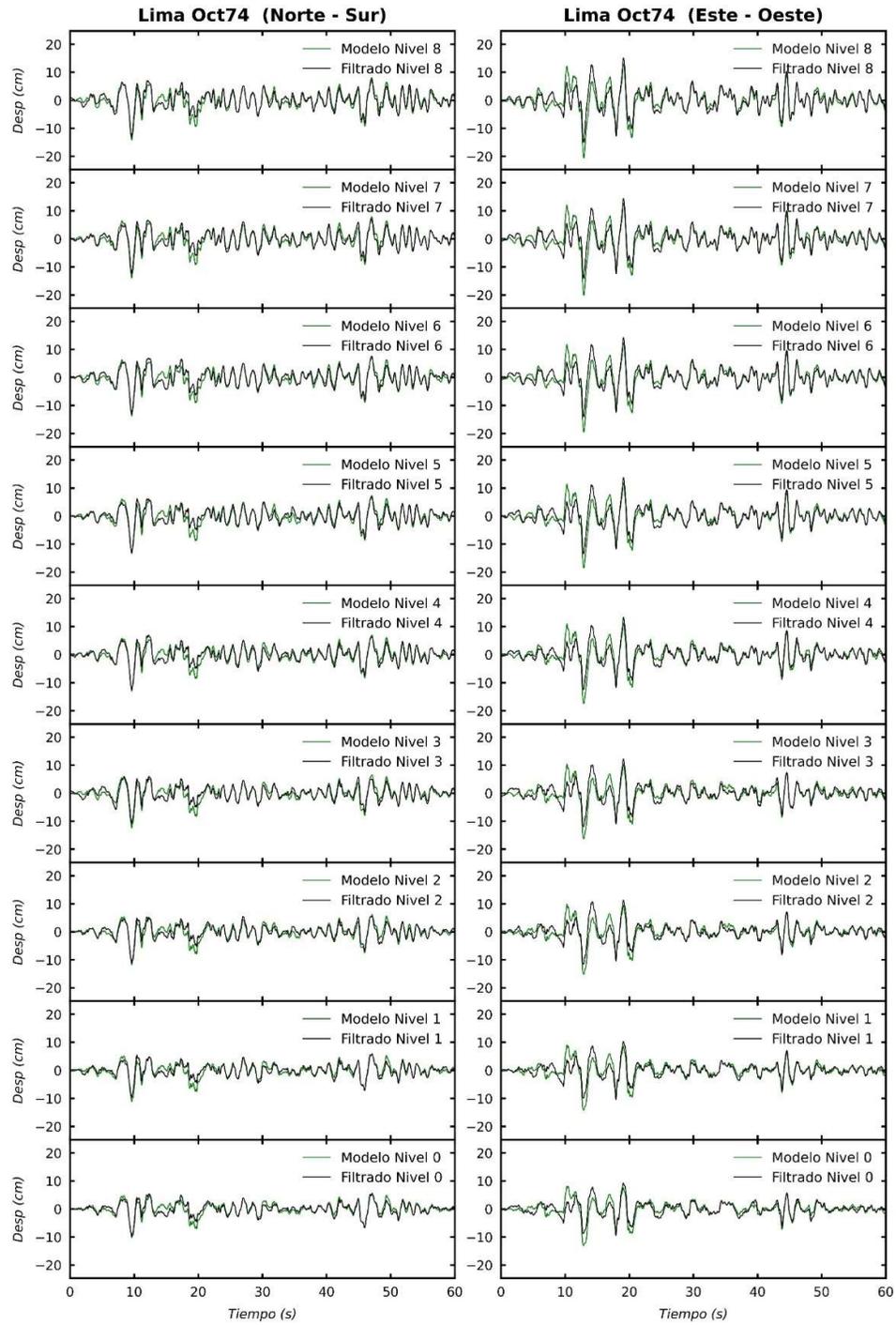
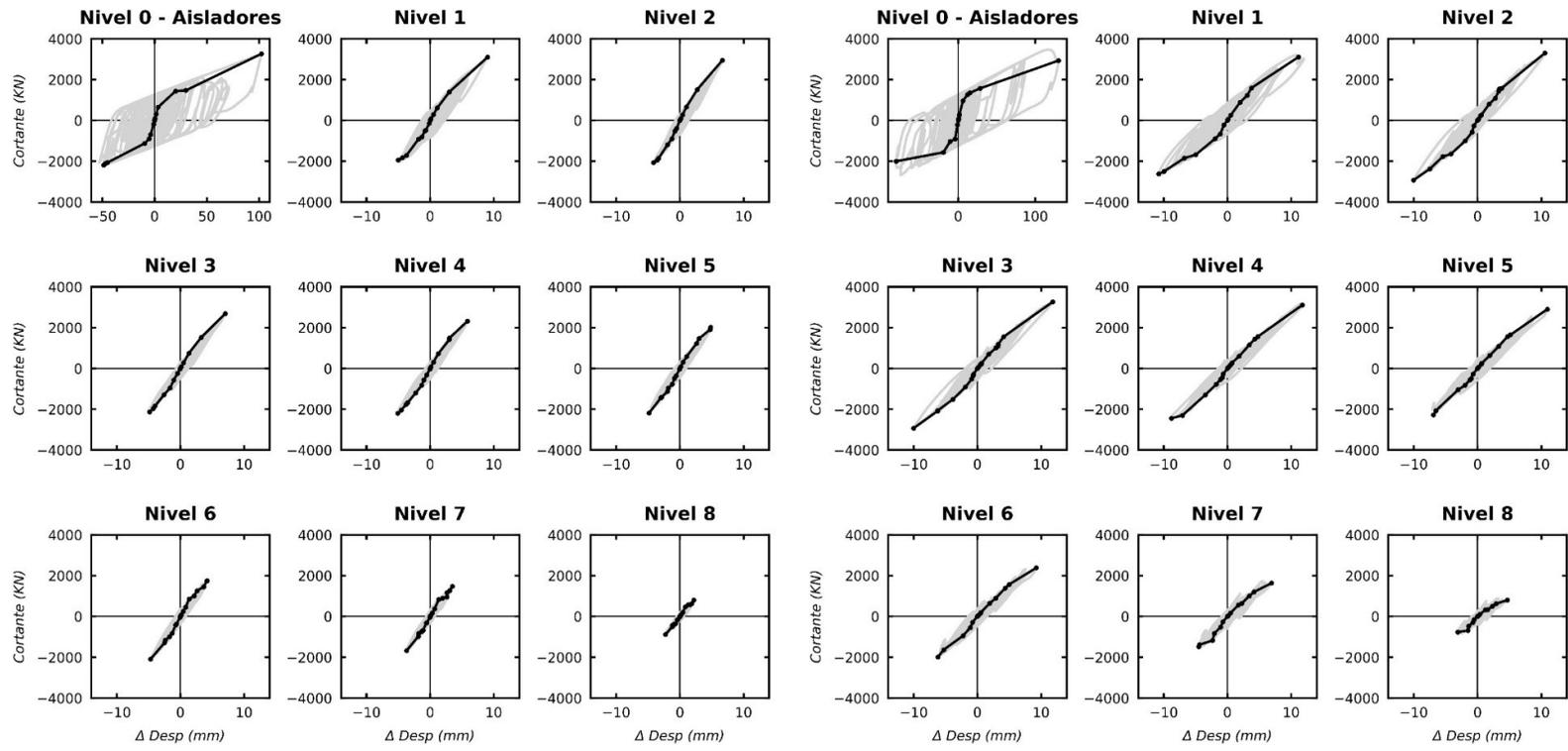


Figura A 2.23 Respuesta en Desplazamientos por nivel relativos al terreno del modelo y filtradas para el Registro sintético Lima octubre 1974.

Fuente: Elaboración propia



a) Dirección Norte-Sur

b) Dirección Este-Oeste

Figura A 2.24 Ciclos de histéresis y curvas de capacidad para cada nivel, registro sintético Lima octubre 1974.  
 Fuente: Elaboración propia

**Respuesta Sísmica Lineal Iquique 2005**

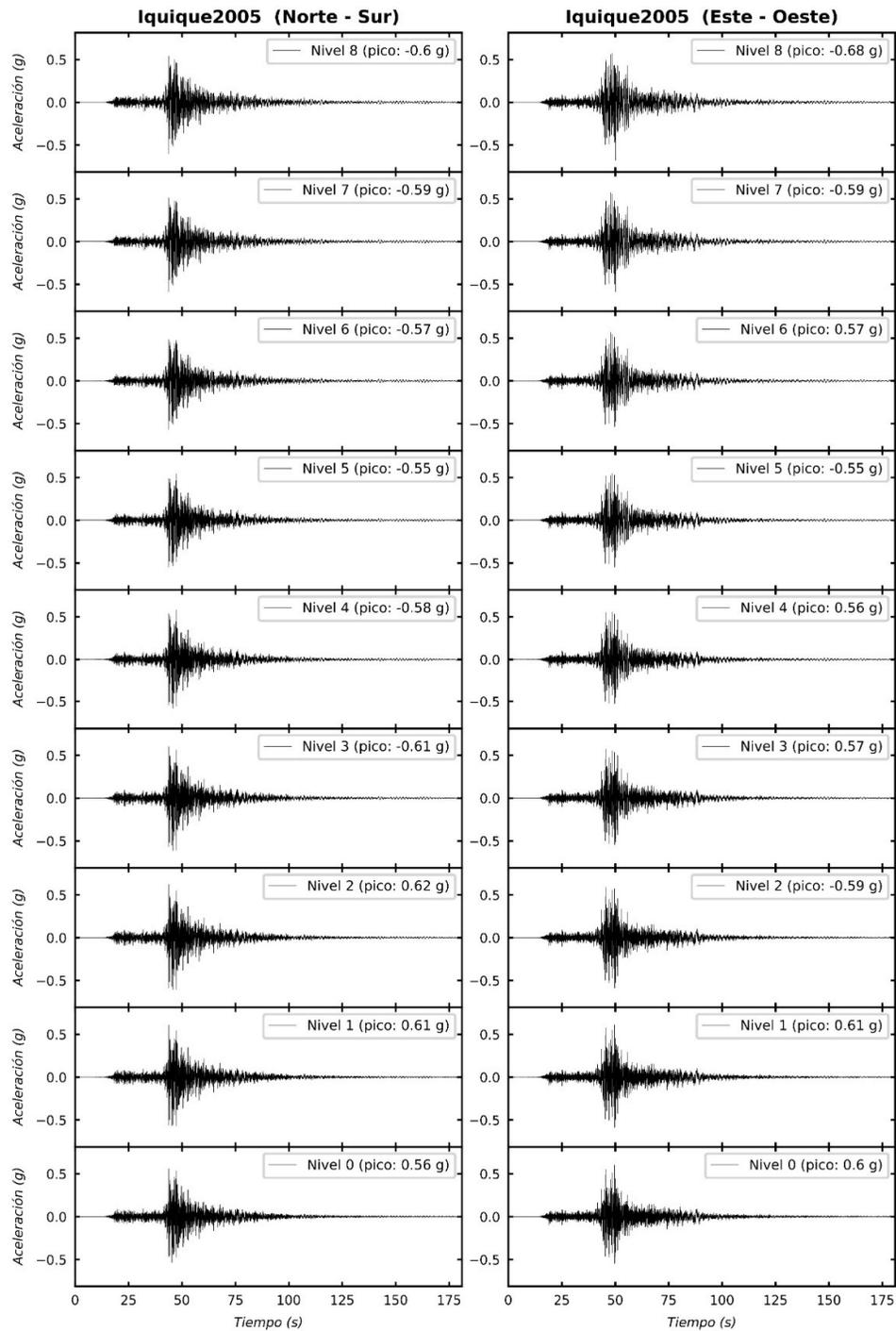


Figura A 2.25 Respuesta en Aceleraciones por nivel relativas al terreno Registro sintético Iquique 2005.

Fuente: Elaboración propia

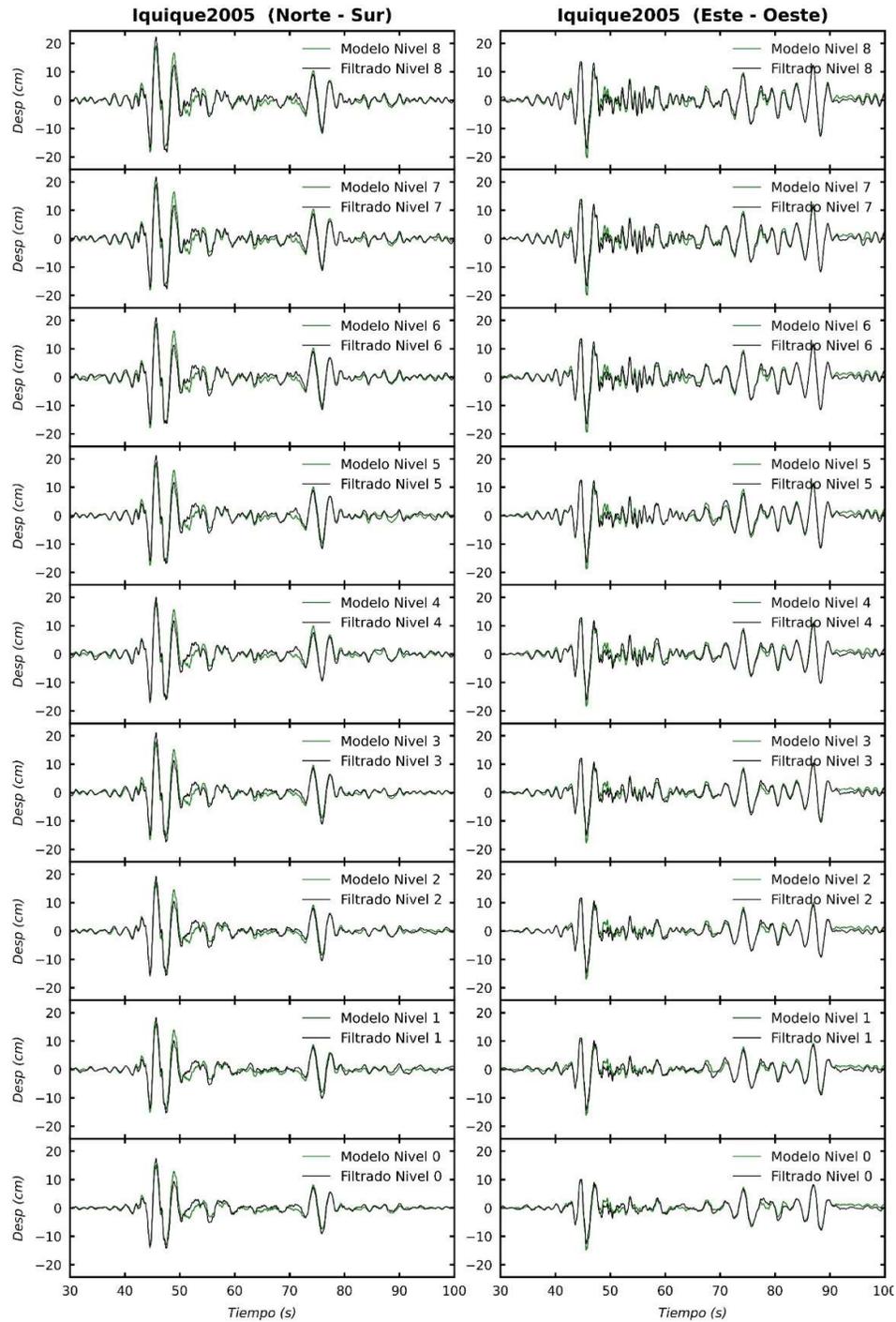
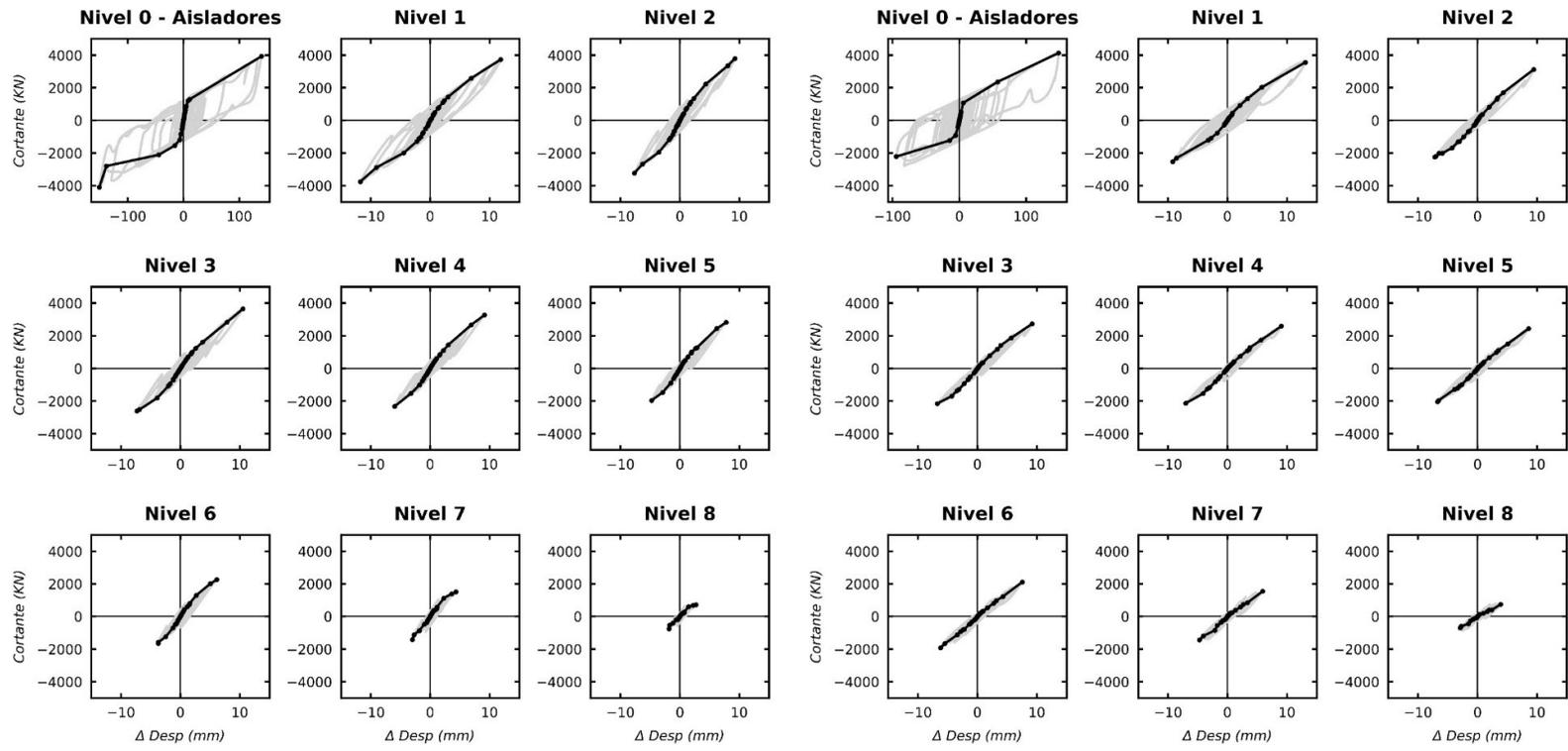


Figura A 2.26 Respuesta en Desplazamientos por nivel relativos al terreno del modelo y filtradas para el Registro sintético Iquique 2005.

Fuente: Elaboración propia



a) Dirección Norte-Sur

b) Dirección Este-Oeste

Figura A 2.27 Ciclos de histéresis y curvas de capacidad para cada nivel, registro sintético Iquique 2005.

Fuente: Elaboración propia

### Respuesta Sísmica Lineal Lima 1996

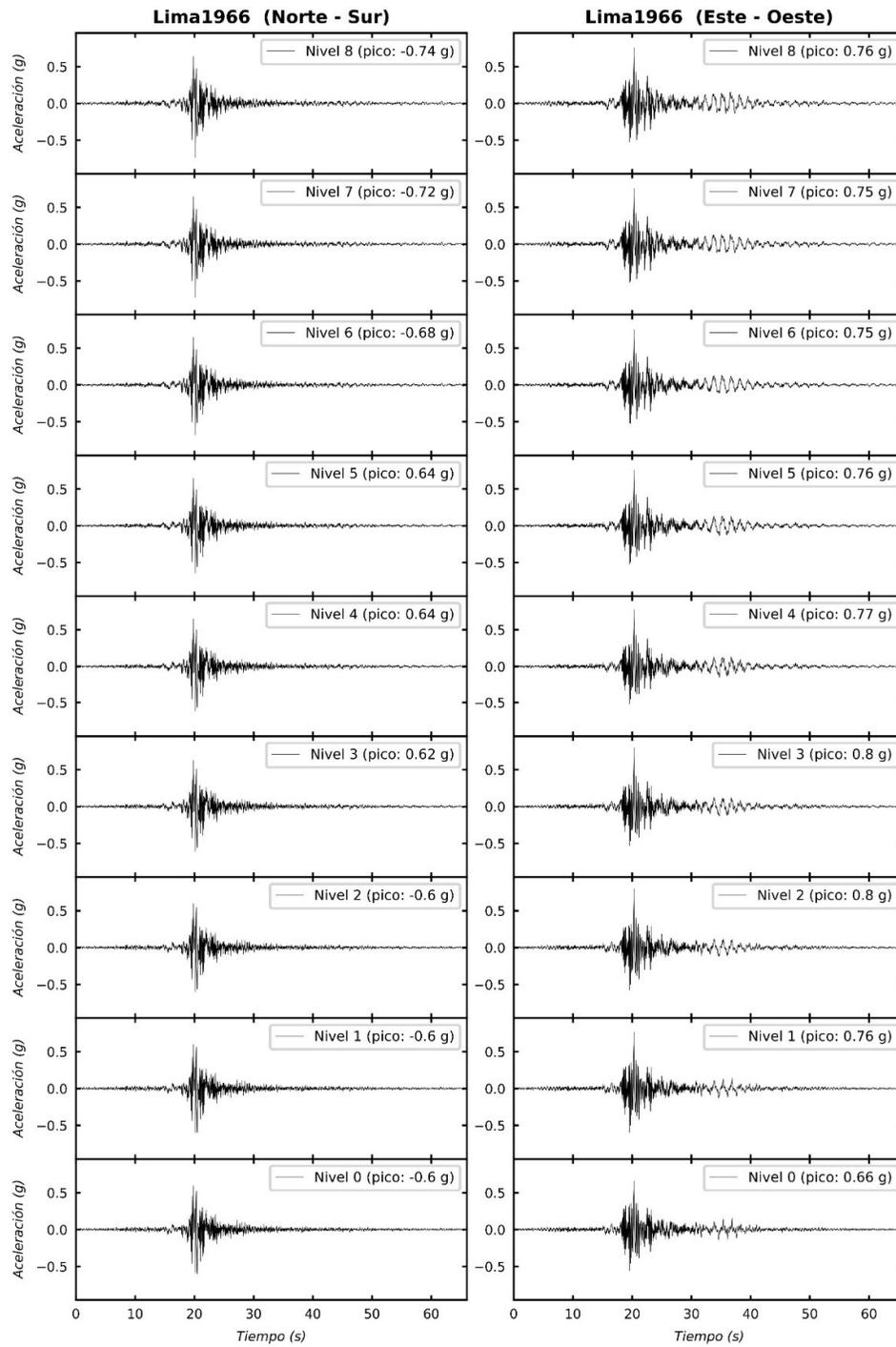


Figura A.2.28 Respuesta en Aceleraciones por nivel relativas al terreno Registro sintético Lima 1966.

Fuente: Elaboración propia

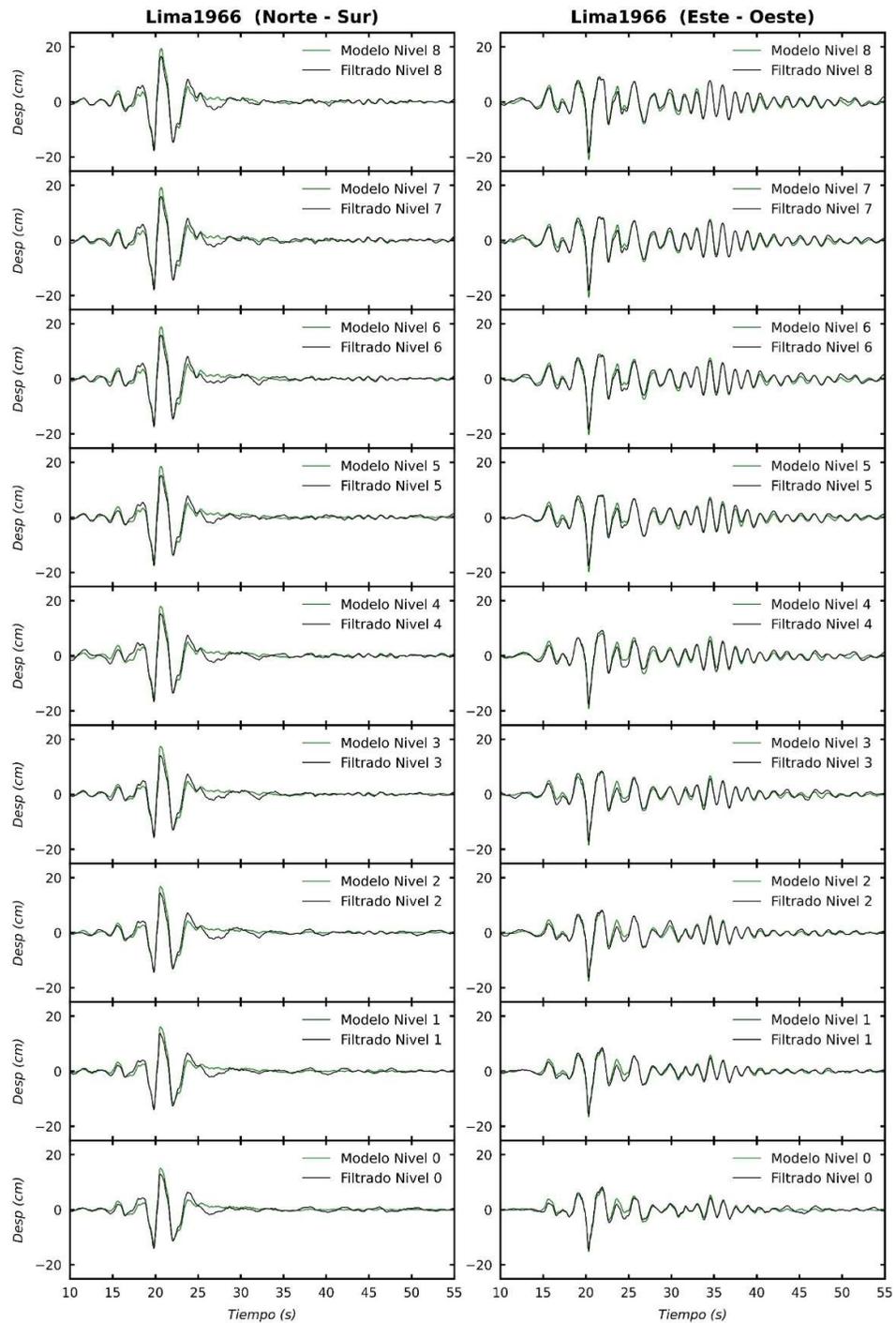
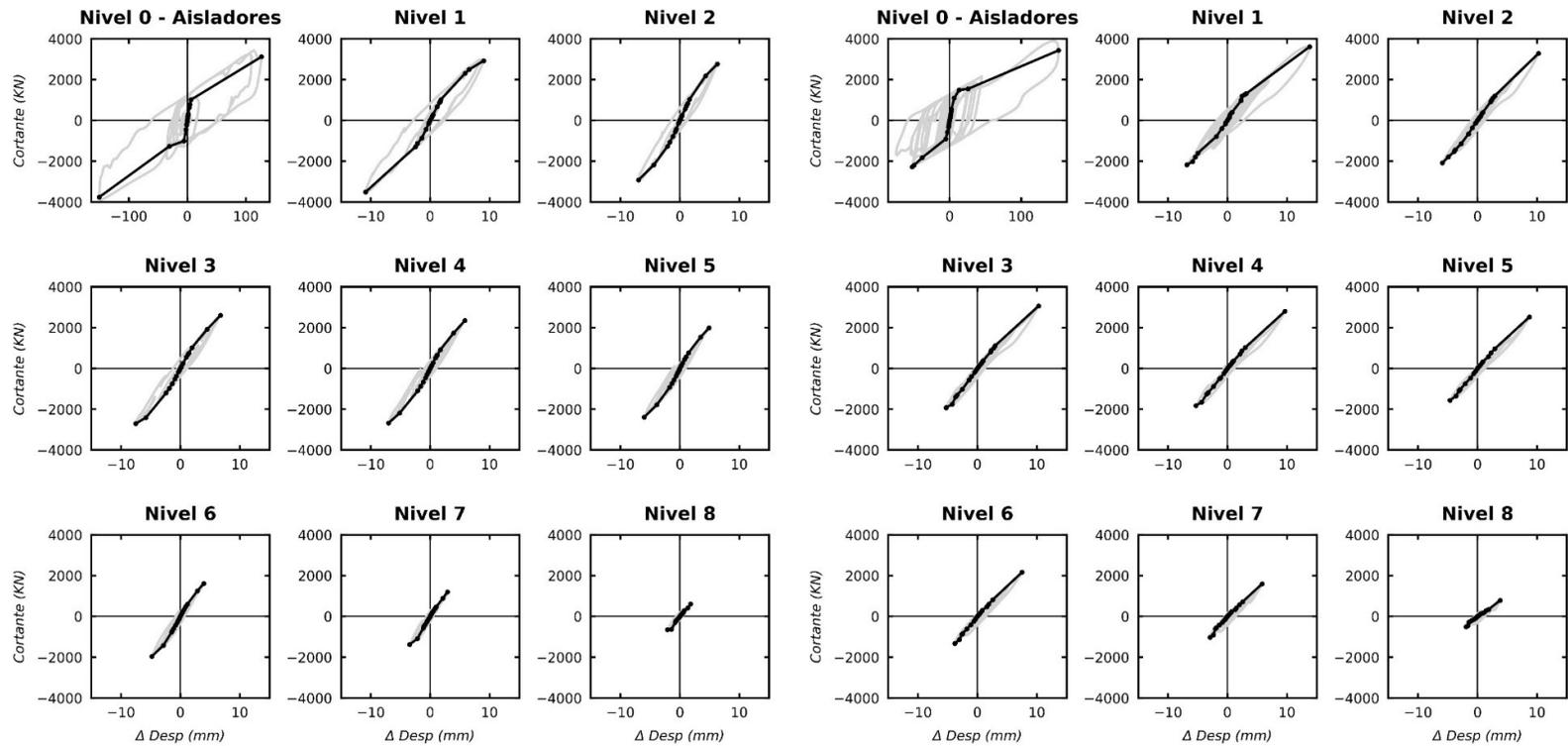


Figura A 2.29 Respuesta en Desplazamientos por nivel relativas al terreno del modelo y filtradas para el Registro sintético Lima 1966.

Fuente: Elaboración propia



a) Dirección Norte-Sur

b) Dirección Este-Oeste

Figura A 2.30 Ciclos de histéresis y curvas de capacidad para cada nivel, registro sintético Lima 1966.  
Fuente: Elaboración propia

**RESPUESTA SÍSMICA INELÁSTICA (ESCALA 1G PGA)**  
**Respuesta Sísmica No Lineal Pisco 2007**

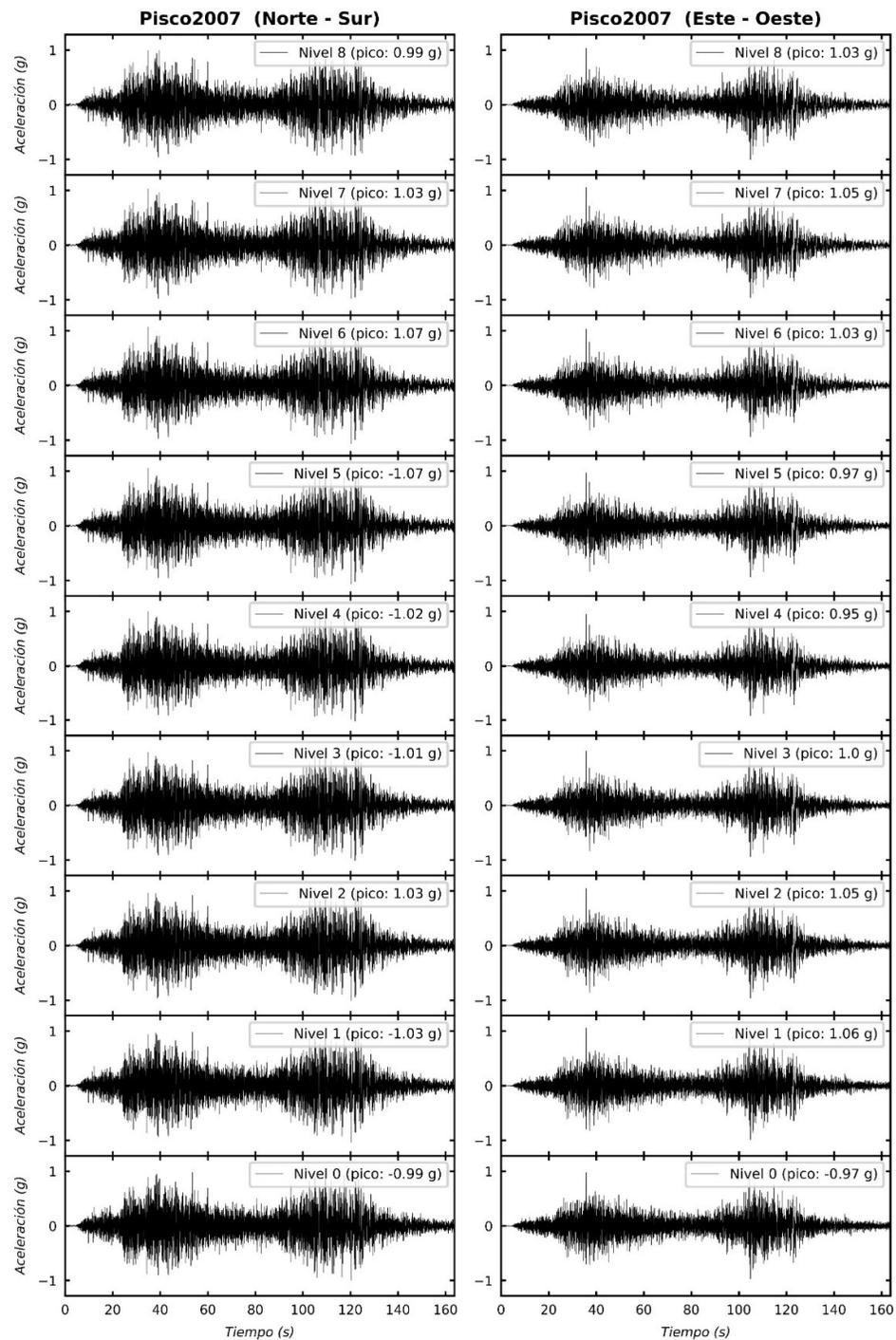


Figura A 2.31 Respuesta en Aceleraciones por nivel relativas al terreno Registro sintético Pisco 2007 (Escala 1G PGA).

Fuente: Elaboración propia

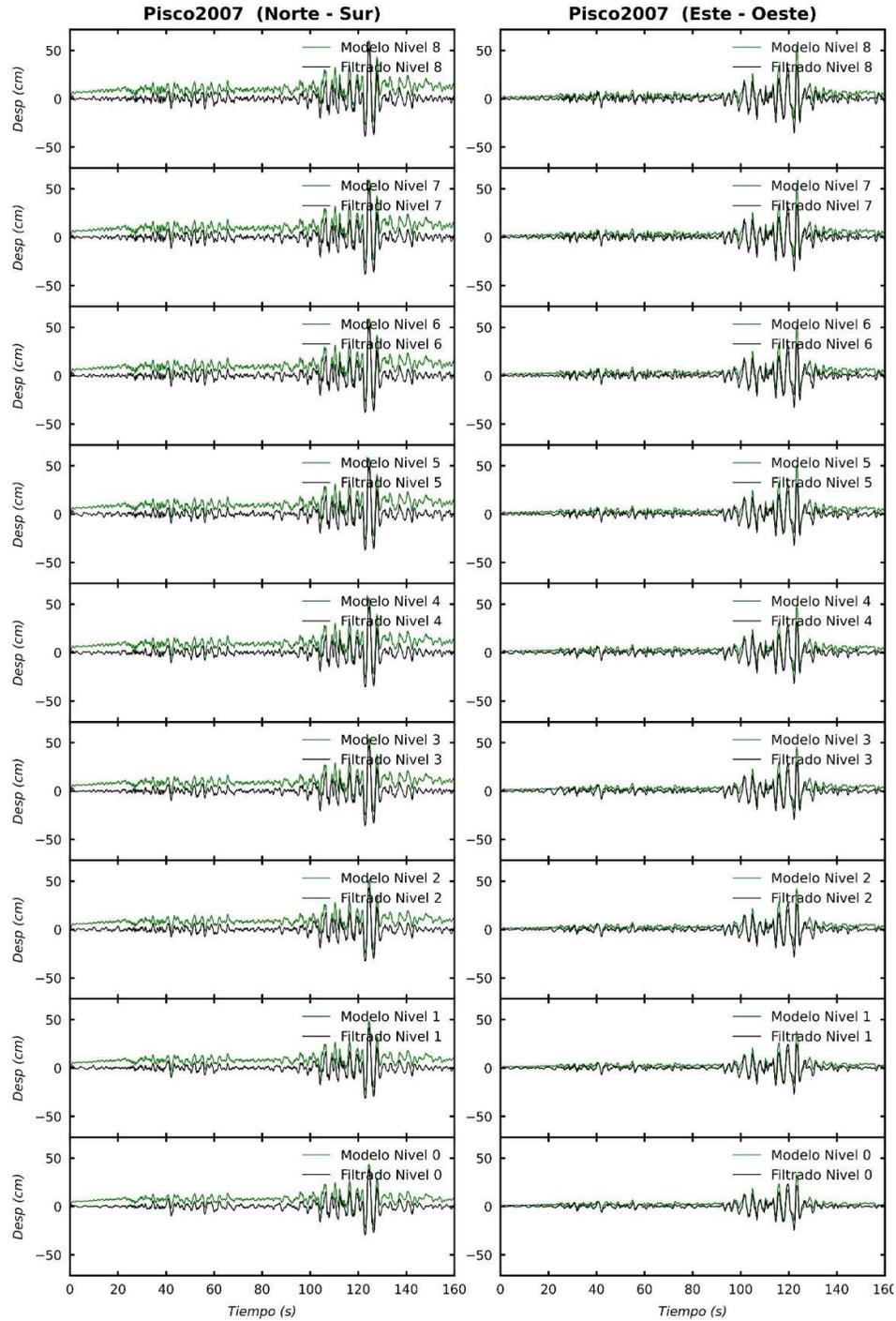


Figura A 2.32 Respuesta en Desplazamientos por nivel relativos al terreno del modelo y filtradas para el Registro sintético Pisco 2007 (Escala 1G PGA).

Fuente: Elaboración propia

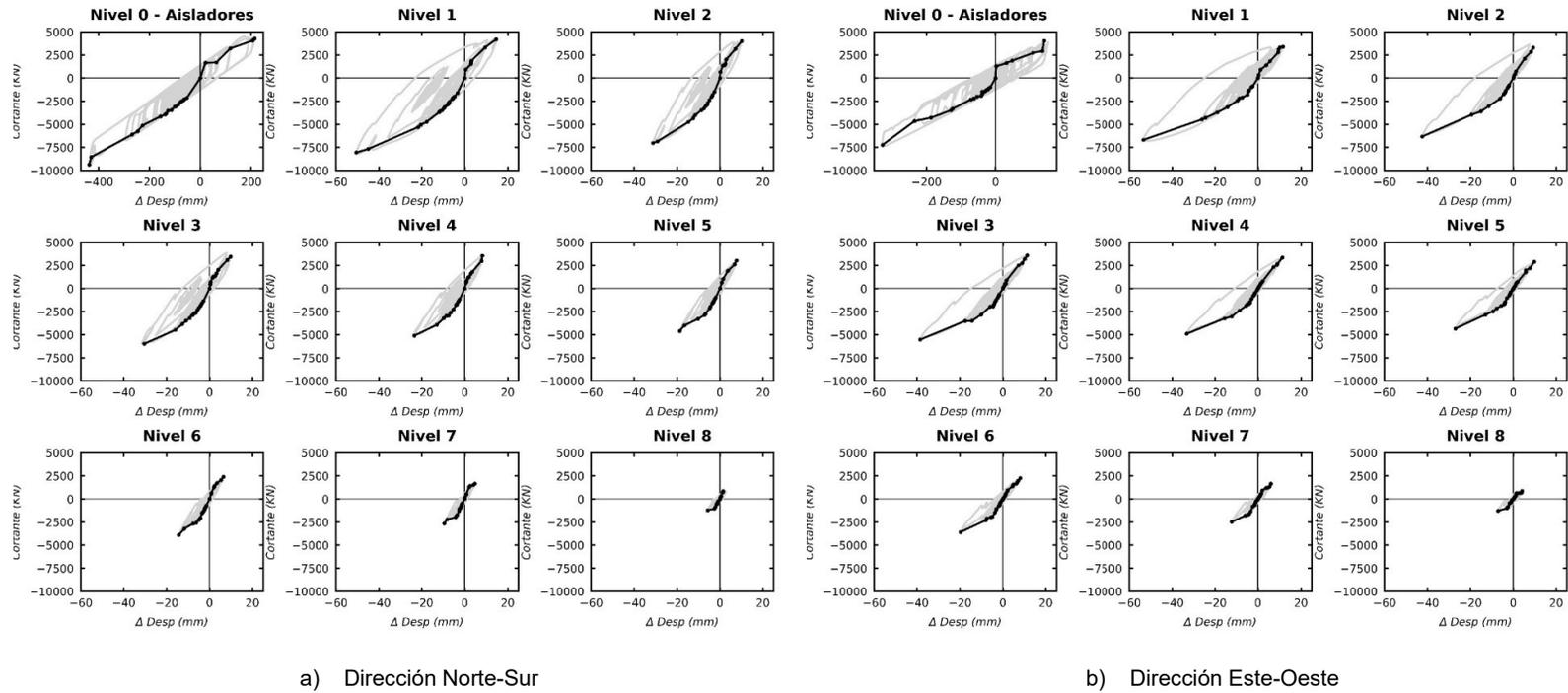


Figura A 2.33 Ciclos de histéresis y curvas de capacidad para cada nivel, registro sintético Pisco 2007 (Escala 1G PGA).  
 Fuente: Elaboración propia

**Respuesta Sísmica No Lineal Iquique 2005**

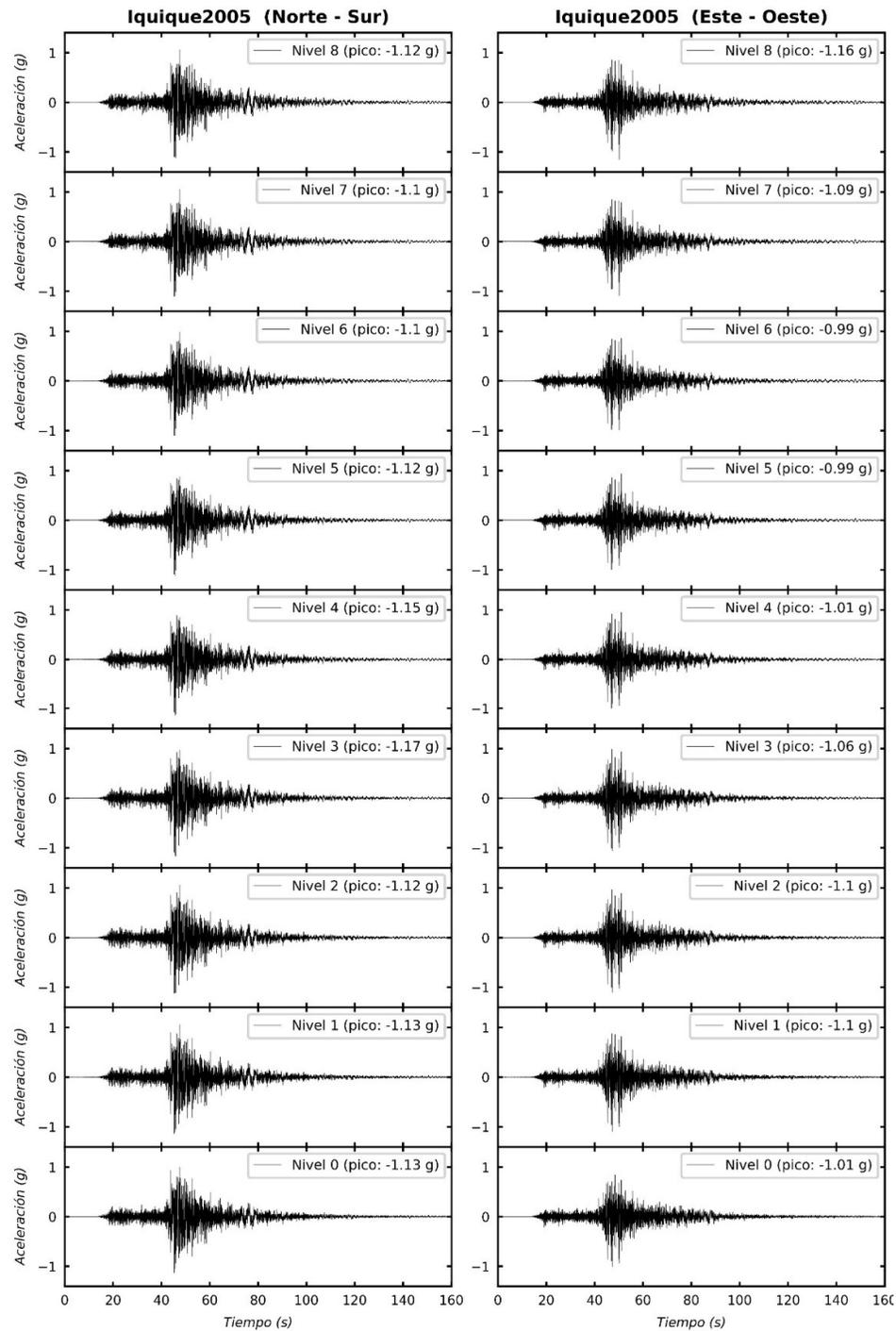


Figura A 2.34 Respuesta en Aceleraciones por nivel relativas al terreno Registro sintético Iquique 2005 (Escala 1G PGA).

Fuente: Elaboración propia

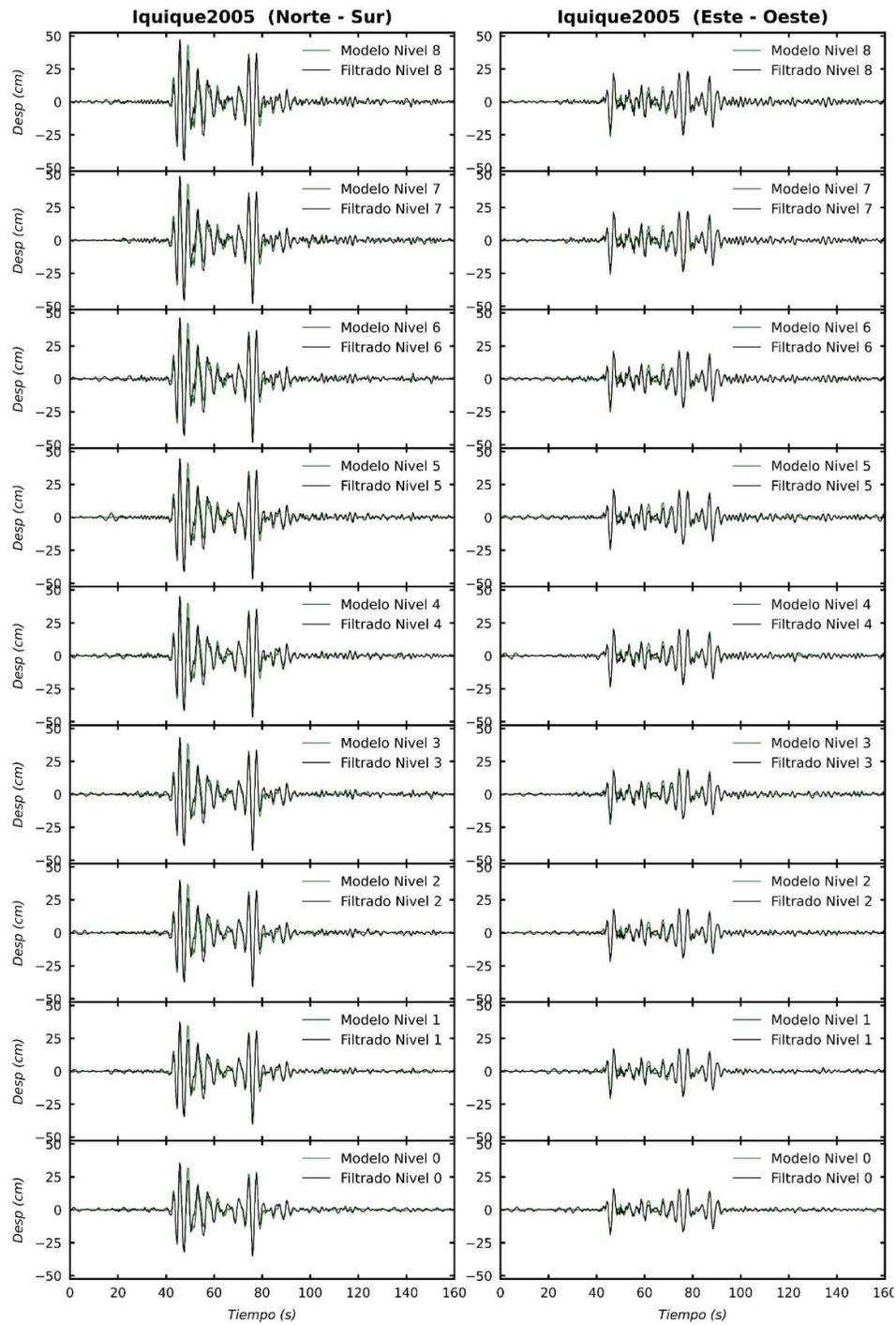


Figura A 2.35 Respuesta en Desplazamientos por nivel relativas al terreno del modelo y filtradas para el Registro sintético Iquique 2005 (Escala 1G PGA).

Fuente: Elaboración propia

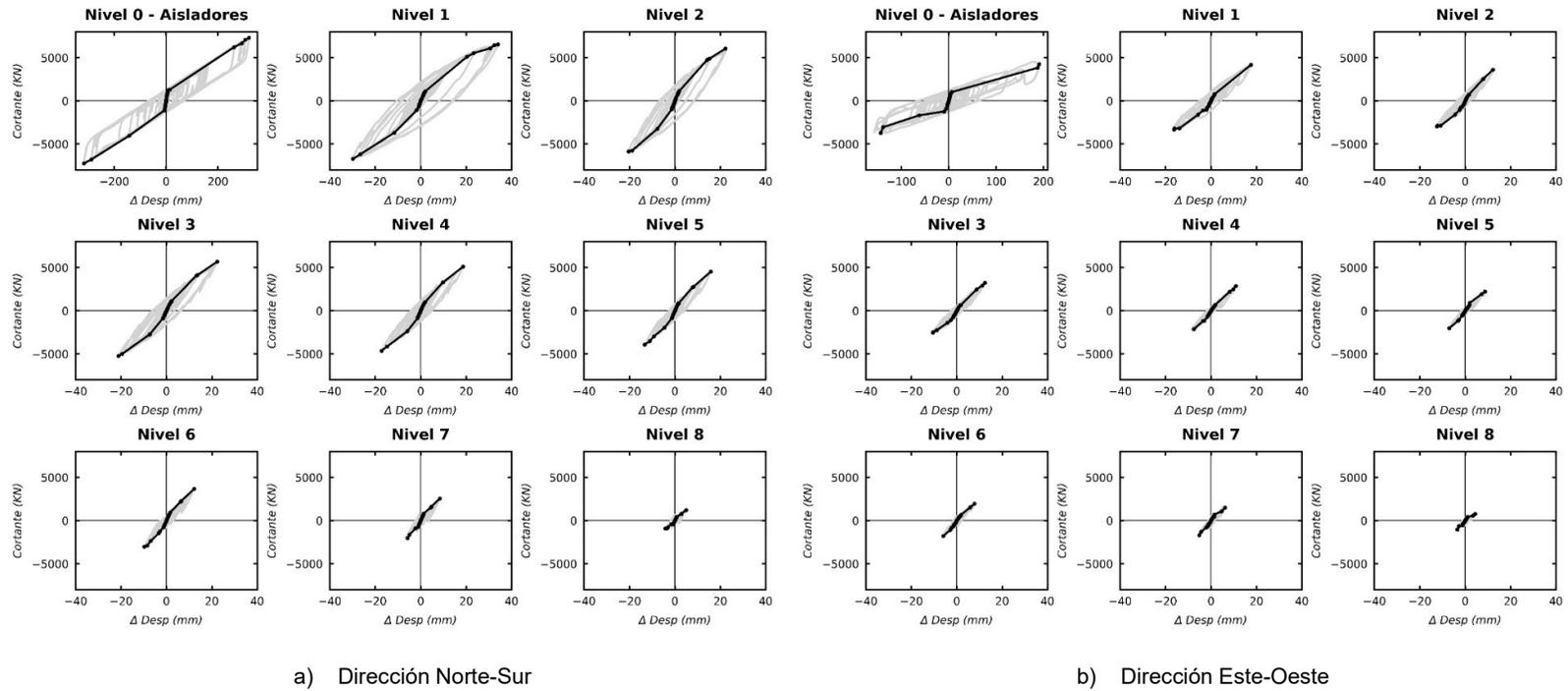


Figura A 2.36 Ciclos de histéresis y curvas de capacidad para cada nivel, registro sintético Iquique 2005 (Escala 1G PGA).  
Fuente: Elaboración propia

### Parámetros Dinámicos Participativos Respuesta Elástica

Tabla A 2.1 Combinaciones de rangos por nivel para Tacna 2010.

Rangos	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)
<b>Nivel 8</b>			<b>Norte - Sur</b>		<b>Este - Oeste</b>	
2+3+4+5+6+7	0.690	1.561	1.126	1.006	2.866	1.936
3+4+5+6+7	0.690	1.568	1.129	1.006	2.895	1.950
2+3+4+5+6	2.453	9.698	6.075	2.692	11.913	7.302
3+4+5+6	2.453	9.710	6.081	2.692	11.941	7.317
<b>Nivel 7</b>						
2+3+4+5+6+7	0.550	0.296	0.423	0.912	2.682	1.797
3+4+5+6+7	0.550	0.303	0.427	0.912	2.711	1.811
2+3+4+5+6	2.434	9.330	5.882	2.681	11.571	7.126
3+4+5+6	2.434	9.338	5.886	2.681	11.599	7.140
<b>Nivel 6</b>						
2+3+4+5+6+7	0.480	0.454	0.467	0.987	2.962	1.974
3+4+5+6+7	0.480	0.463	0.471	0.987	2.990	1.989
2+3+4+5+6	2.422	9.116	5.769	2.638	11.946	7.292
3+4+5+6	2.422	9.125	5.774	2.638	11.974	7.306
<b>Nivel 5</b>						
2+3+4+5+6+7	0.604	0.643	0.624	0.899	2.365	1.632
3+4+5+6+7	0.604	0.655	0.629	0.900	2.391	1.645
2+3+4+5+6	2.374	9.122	5.748	2.585	11.309	6.947
3+4+5+6	2.374	9.134	5.754	2.585	11.334	6.960
<b>Nivel 4</b>						
2+3+4+5+6+7	0.792	0.782	0.787	0.887	2.166	1.527
3+4+5+6+7	0.792	0.793	0.792	0.887	2.166	1.527
2+3+4+5+6	2.345	9.133	5.739	2.516	10.818	6.667
3+4+5+6	2.345	9.143	5.744	2.516	10.818	6.667
<b>Nivel 3</b>						
2+3+4+5+6+7	0.529	1.142	0.835	1.056	1.847	1.452
3+4+5+6+7	0.529	1.151	0.84	1.056	1.92	1.488
2+3+4+5+6	2.272	8.857	5.564	2.458	10.535	6.496
3+4+5+6	2.272	8.866	5.569	2.458	10.536	6.497
<b>Nivel 2</b>						
2+3+4+5+6+7	0.560	1.076	0.818	0.964	3.145	2.054
3+4+5+6+7	0.560	1.074	0.817	0.964	3.148	2.056
2+3+4+5+6	2.191	8.335	5.263	2.376	10.405	6.391
3+4+5+6	2.191	8.332	5.262	2.376	10.408	6.392
<b>Nivel 1</b>						
2+3+4+5+6+7	0.576	0.203	0.390	1.046	2.298	1.672
3+4+5+6+7	0.576	1.053	0.815	1.046	2.304	1.675
2+3+4+5+6	2.110	7.779	4.944	2.266	9.241	5.754
3+4+5+6	2.110	7.788	4.949	2.266	9.246	5.756
<b>Nivel 0</b>						
2+3+4+5+6+7	0.595	0.852	0.724	0.792	2.594	1.693
3+4+5+6+7	0.595	0.805	0.700	0.792	2.594	1.693
2+3+4+5+6	1.985	7.250	4.617	2.102	8.731	5.417
3+4+5+6	1.985	7.261	4.623	2.102	8.732	5.417

Fuente: Elaboración propia

Tabla A 2.2 Combinaciones de rangos por nivel para Pisco 2007.

Rangos	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)
<i>Nivel 8</i>			Norte - Sur		Este - Oeste	
2+3+4+5+6+7	0.781	0.747	0.764	1.147	0.226	0.686
3+4+5+6+7	0.781	0.750	0.766	1.147	0.231	0.689
2+3+4+5+6	1.646	2.521	2.083	2.563	12.053	7.308
3+4+5+6	1.646	2.524	2.085	2.563	12.048	7.305
<i>Nivel 7</i>						
2+3+4+5+6+7	0.763	0.768	0.766	1.086	0.224	0.655
3+4+5+6+7	0.763	0.771	0.767	1.086	0.219	0.652
2+3+4+5+6	1.633	2.457	2.045	2.529	11.915	7.222
3+4+5+6	1.633	2.459	2.046	2.529	11.909	7.219
<i>Nivel 6</i>						
2+3+4+5+6+7	0.740	1.234	0.987	1.060	0.341	0.701
3+4+5+6+7	0.740	1.232	0.986	1.060	0.336	0.698
2+3+4+5+6	1.608	2.494	2.051	2.492	11.547	7.019
3+4+5+6	1.608	2.492	2.050	2.492	11.542	7.017
<i>Nivel 5</i>						
2+3+4+5+6+7	0.760	0.125	0.443	1.041	0.659	0.850
3+4+5+6+7	0.760	0.121	0.441	1.041	0.664	0.853
2+3+4+5+6	1.579	2.557	2.068	2.427	10.892	6.659
3+4+5+6	1.579	2.552	2.065	2.427	10.897	6.662
<i>Nivel 4</i>						
2+3+4+5+6+7	0.805	0.799	0.802	1.013	0.816	0.915
3+4+5+6+7	0.805	0.798	0.802	1.013	0.821	0.917
2+3+4+5+6	1.544	2.39	1.967	2.354	10.657	6.505
3+4+5+6	1.544	2.389	1.966	2.354	10.662	6.508
<i>Nivel 3</i>						
2+3+4+5+6+7	0.707	0.906	0.807	0.994	0.262	0.628
3+4+5+6+7	0.707	0.909	0.808	0.994	0.271	0.633
2+3+4+5+6	1.493	2.29	1.891	2.263	10.155	6.209
3+4+5+6	1.493	2.293	1.893	2.263	10.164	6.214
<i>Nivel 2</i>						
2+3+4+5+6+7	0.708	1.084	0.896	0.948	1.276	1.112
3+4+5+6+7	0.708	1.086	0.897	0.948	1.281	1.114
2+3+4+5+6	1.448	2.250	1.849	2.177	9.668	5.923
3+4+5+6	1.448	2.252	1.850	2.177	9.673	5.925
<i>Nivel 1</i>						
2+3+4+5+6+7	0.746	1.078	0.912	0.908	0.434	0.671
3+4+5+6+7	0.746	1.086	0.916	0.908	0.443	0.675
2+3+4+5+6	1.393	2.014	1.703	2.067	9.53	5.798
3+4+5+6	1.393	2.022	1.707	2.067	9.54	5.803
<i>Nivel 0</i>						
2+3+4+5+6+7	0.680	0.958	0.819	0.918	1.151	1.035
3+4+5+6+7	0.680	0.968	0.824	0.918	1.163	1.041
2+3+4+5+6	1.325	2.334	1.829	1.924	8.683	5.304
3+4+5+6	1.325	2.344	1.835	1.925	8.695	5.310

Fuente: Elaboración propia

Tabla A 2.3 Combinaciones de rangos por nivel para Huaraz 1970.

Rangos	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)
<i>Nivel 8</i>			Norte - Sur		Este - Oeste	
2+3+4+5+6+7	1.259	0.432	0.845	1.082	0.674	0.878
3+4+5+6+7	1.259	0.469	0.864	1.083	0.651	0.867
2+3+4+5+6	2.686	7.806	5.246	2.270	4.116	3.193
3+4+5+6	2.686	7.842	5.264	2.270	4.121	3.195
<i>Nivel 7</i>						
2+3+4+5+6+7	1.226	0.539	0.882	1.015	0.367	0.691
3+4+5+6+7	1.226	0.506	0.866	1.016	0.361	0.688
2+3+4+5+6	2.672	7.653	5.163	2.250	3.663	2.957
3+4+5+6	2.672	7.686	5.179	2.251	3.668	2.959
<i>Nivel 6</i>						
2+3+4+5+6+7	1.155	1.075	1.115	1.034	0.617	0.826
3+4+5+6+7	1.155	1.038	1.097	1.034	0.613	0.823
2+3+4+5+6	2.622	7.643	5.132	2.199	3.953	3.076
3+4+5+6	2.622	7.680	5.151	2.200	3.958	3.079
<i>Nivel 5</i>						
2+3+4+5+6+7	1.143	1.100	1.122	0.979	1.854	1.417
3+4+5+6+7	1.143	1.063	1.103	0.980	1.868	1.424
2+3+4+5+6	2.557	7.585	5.071	2.167	4.130	3.148
3+4+5+6	2.557	7.623	5.090	2.167	4.133	3.15
<i>Nivel 4</i>						
2+3+4+5+6+7	1.126	1.976	1.551	0.944	0.747	0.845
3+4+5+6+7	1.127	1.938	1.532	0.944	0.771	0.857
2+3+4+5+6	2.497	7.199	4.848	2.119	3.787	2.953
3+4+5+6	2.497	7.236	4.866	2.119	3.811	2.965
<i>Nivel 3</i>						
2+3+4+5+6+7	1.165	1.473	1.319	0.991	0.620	0.806
3+4+5+6+7	1.165	1.443	1.304	0.991	0.606	0.798
2+3+4+5+6	2.418	6.948	4.683	2.052	3.234	2.643
3+4+5+6	2.418	6.978	4.698	2.052	3.246	2.649
<i>Nivel 2</i>						
2+3+4+5+6+7	1.134	0.641	0.888	0.956	2.255	1.606
3+4+5+6+7	1.134	0.608	0.871	0.956	2.277	1.617
2+3+4+5+6	2.321	6.429	4.375	1.966	3.119	2.542
3+4+5+6	2.321	6.463	4.392	1.966	3.126	2.546
<i>Nivel 1</i>						
2+3+4+5+6+7	1.022	1.183	1.102	0.855	0.573	0.714
3+4+5+6+7	1.022	1.148	1.085	0.856	0.560	0.708
2+3+4+5+6	2.203	6.413	4.308	1.896	2.941	2.419
3+4+5+6	2.203	6.447	4.325	1.896	2.928	2.412
<i>Nivel 0</i>						
2+3+4+5+6+7	1.056	0.444	0.750	0.892	2.109	1.500
3+4+5+6+7	1.056	0.405	0.730	0.892	2.112	1.502
2+3+4+5+6	2.046	5.860	3.953	1.781	3.138	2.459
3+4+5+6	2.046	5.899	3.973	1.781	3.229	2.505

Fuente: Elaboración propia

Tabla A 2.4 Combinaciones de rangos por nivel para Lima noviembre 1974.

Rangos	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)
<i>Nivel 8</i>			Norte - Sur		Este - Oeste	
2+3+4+5+6+7	1.536	2.475	2.006	0.938	1.170	1.054
3+4+5+6+7	1.537	2.467	2.002	0.938	1.172	1.055
2+3+4+5+6	4.808	13.600	9.204	3.704	14.355	9.030
3+4+5+6	4.808	13.592	9.200	3.704	14.357	9.031
<i>Nivel 7</i>						
2+3+4+5+6+7	1.629	2.058	1.843	0.916	0.538	0.727
3+4+5+6+7	1.629	2.048	1.839	0.916	0.543	0.729
2+3+4+5+6	4.786	13.335	9.061	3.663	14.055	8.859
3+4+5+6	4.786	13.326	9.056	3.663	14.059	8.861
<i>Nivel 6</i>						
2+3+4+5+6+7	1.449	2.867	2.158	1.051	0.111	0.581
3+4+5+6+7	1.450	2.860	2.155	1.051	0.114	0.583
2+3+4+5+6	4.724	13.164	8.944	3.592	14.005	8.799
3+4+5+6	4.724	13.157	8.940	3.592	14.011	8.802
<i>Nivel 5</i>						
2+3+4+5+6+7	1.474	2.456	1.965	1.066	0.562	0.814
3+4+5+6+7	1.474	2.443	1.958	1.066	0.563	0.815
2+3+4+5+6	4.664	12.850	8.757	3.525	13.275	8.400
3+4+5+6	4.664	12.836	8.750	3.525	13.280	8.402
<i>Nivel 4</i>						
2+3+4+5+6+7	1.416	2.383	1.899	0.899	0.111	0.505
3+4+5+6+7	1.416	2.384	1.900	0.899	0.114	0.506
2+3+4+5+6	4.566	12.456	8.511	3.404	13.075	8.239
3+4+5+6	4.566	12.457	8.512	3.404	13.077	8.241
<i>Nivel 3</i>						
2+3+4+5+6+7	1.350	2.521	1.936	0.921	0.262	0.592
3+4+5+6+7	1.350	2.521	1.935	0.922	0.269	0.595
2+3+4+5+6	4.463	12.401	8.432	3.314	12.322	7.818
3+4+5+6	4.463	12.401	8.432	3.314	12.329	7.822
<i>Nivel 2</i>						
2+3+4+5+6+7	1.350	1.821	1.585	0.908	0.425	0.666
3+4+5+6+7	1.350	1.817	1.583	0.908	0.429	0.668
2+3+4+5+6	4.323	11.869	8.096	3.154	11.782	7.468
3+4+5+6	4.323	11.865	8.094	3.154	11.787	7.470
<i>Nivel 1</i>						
2+3+4+5+6+7	1.351	1.753	1.552	0.923	0.552	0.737
3+4+5+6+7	1.352	1.753	1.552	0.923	0.547	0.735
2+3+4+5+6	4.165	11.19	7.677	2.999	11.293	7.146
3+4+5+6	4.165	11.191	7.678	2.999	11.299	7.149
<i>Nivel 0</i>						
2+3+4+5+6+7	1.277	1.940	1.608	0.871	0.048	0.459
3+4+5+6+7	1.277	1.935	1.606	0.871	0.046	0.458
2+3+4+5+6	3.948	10.755	7.351	2.779	10.523	6.651
3+4+5+6	3.948	10.750	7.349	2.779	10.527	6.653

Fuente: Elaboración propia

Tabla A 2.5 Combinaciones de rangos por nivel para Lima octubre 1974.

Rangos	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)
<i>Nivel 8</i>			Norte - Sur		Este - Oeste	
2+3+4+5+6+7	1.235	0.962	1.099	1.942	5.687	3.815
3+4+5+6+7	1.235	0.999	1.117	1.942	5.649	3.796
2+3+4+5+6	2.133	8.603	5.368	2.570	11.615	7.092
3+4+5+6	2.133	8.640	5.386	2.570	11.577	7.073
<i>Nivel 7</i>						
2+3+4+5+6+7	1.214	1.594	1.404	1.921	6.118	4.020
3+4+5+6+7	1.215	1.636	1.425	1.921	6.088	4.005
2+3+4+5+6	2.111	8.259	5.185	2.544	11.443	6.993
3+4+5+6	2.111	8.301	5.206	2.544	11.413	6.978
<i>Nivel 6</i>						
2+3+4+5+6+7	1.257	0.723	0.990	1.900	5.555	3.727
3+4+5+6+7	1.257	0.764	1.010	1.900	5.527	3.714
2+3+4+5+6	2.082	8.146	5.114	2.495	11.235	6.865
3+4+5+6	2.082	8.187	5.134	2.495	11.207	6.851
<i>Nivel 5</i>						
2+3+4+5+6+7	1.239	0.323	0.781	1.855	5.124	3.490
3+4+5+6+7	1.239	0.380	0.809	1.856	5.054	3.455
2+3+4+5+6	2.032	8.178	5.105	2.447	10.903	6.675
3+4+5+6	2.032	8.234	5.133	2.447	10.833	6.640
<i>Nivel 4</i>						
2+3+4+5+6+7	1.203	0.305	0.754	1.831	5.094	3.463
3+4+5+6+7	1.204	0.356	0.780	1.831	5.014	3.422
2+3+4+5+6	1.976	7.772	4.874	2.370	10.471	6.421
3+4+5+6	1.976	7.822	4.899	2.370	10.390	6.380
<i>Nivel 3</i>						
2+3+4+5+6+7	1.224	1.537	1.380	1.884	4.497	3.190
3+4+5+6+7	1.224	1.587	1.406	1.884	4.464	3.174
2+3+4+5+6	1.922	7.427	4.674	2.300	10.378	6.339
3+4+5+6	1.922	7.477	4.699	2.300	10.346	6.323
<i>Nivel 2</i>						
2+3+4+5+6+7	1.116	0.581	0.849	1.789	3.620	2.705
3+4+5+6+7	1.116	0.630	0.873	1.789	3.647	2.718
2+3+4+5+6	1.837	7.020	4.428	2.204	9.711	5.957
3+4+5+6	1.837	7.069	4.453	2.204	9.737	5.971
<i>Nivel 1</i>						
2+3+4+5+6+7	1.081	1.444	1.262	1.677	4.306	2.991
3+4+5+6+7	1.081	1.504	1.292	1.677	4.332	3.005
2+3+4+5+6	1.758	6.835	4.296	2.121	9.388	5.754
3+4+5+6	1.758	6.894	4.326	2.121	9.414	5.767
<i>Nivel 0</i>						
2+3+4+5+6+7	1.011	0.491	0.751	1.602	4.317	2.960
3+4+5+6+7	1.011	0.557	0.784	1.602	4.340	2.971
2+3+4+5+6	1.646	6.224	3.935	1.983	8.782	5.383
3+4+5+6	1.646	6.290	3.968	1.983	8.805	5.394

Fuente: Elaboración propia

Tabla A 2.6 Combinaciones de rangos por nivel para Iquique 2005.

Rangos	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)
<i>Nivel 8</i>			Norte - Sur		Este - Oeste	
2+3+4+5+6+7	1.267	3.147	2.207	0.951	3.320	2.136
3+4+5+6+7	1.267	3.155	2.211	0.951	3.334	2.143
2+3+4+5+6	3.398	9.241	6.320	2.328	7.226	4.777
3+4+5+6	3.398	9.233	6.315	2.328	7.240	4.784
<i>Nivel 7</i>						
2+3+4+5+6+7	1.243	2.714	1.979	0.985	3.288	2.136
3+4+5+6+7	1.243	2.724	1.984	0.985	3.308	2.146
2+3+4+5+6	3.368	9.234	6.301	2.300	7.088	4.694
3+4+5+6	3.368	9.223	6.296	2.300	7.108	4.704
<i>Nivel 6</i>						
2+3+4+5+6+7	1.231	2.224	1.727	0.967	2.988	1.978
3+4+5+6+7	1.231	2.239	1.735	0.967	3.014	1.990
2+3+4+5+6	3.322	9.081	6.201	2.247	6.857	4.552
3+4+5+6	3.322	9.065	6.194	2.247	6.883	4.565
<i>Nivel 5</i>						
2+3+4+5+6+7	1.276	2.627	1.952	0.950	2.286	1.618
3+4+5+6+7	1.276	2.643	1.959	0.950	2.301	1.626
2+3+4+5+6	3.272	9.003	6.138	2.194	7.098	4.646
3+4+5+6	3.272	8.988	6.130	2.194	7.113	4.653
<i>Nivel 4</i>						
2+3+4+5+6+7	1.253	1.850	1.551	0.967	2.128	1.547
3+4+5+6+7	1.253	1.859	1.556	0.967	2.133	1.550
2+3+4+5+6	3.190	8.817	6.004	2.112	6.650	4.381
3+4+5+6	3.191	8.808	5.999	2.112	6.655	4.384
<i>Nivel 3</i>						
2+3+4+5+6+7	1.204	3.384	2.294	0.909	2.617	1.763
3+4+5+6+7	1.204	3.400	2.302	0.909	2.618	1.764
2+3+4+5+6	3.099	8.642	5.870	2.036	6.697	4.367
3+4+5+6	3.099	8.626	5.863	2.036	6.699	4.367
<i>Nivel 2</i>						
2+3+4+5+6+7	1.140	2.262	1.701	0.876	1.981	1.428
3+4+5+6+7	1.141	2.271	1.706	0.876	1.988	1.432
2+3+4+5+6	2.970	8.083	5.526	1.953	6.220	4.087
3+4+5+6	2.970	8.075	5.522	1.953	6.227	4.090
<i>Nivel 1</i>						
2+3+4+5+6+7	1.192	2.041	1.617	0.928	1.682	1.305
3+4+5+6+7	1.192	2.052	1.622	0.929	1.679	1.304
2+3+4+5+6	2.857	8.067	5.462	1.860	5.825	3.842
3+4+5+6	2.857	8.056	5.457	1.860	5.822	3.841
<i>Nivel 0</i>						
2+3+4+5+6+7	1.060	2.274	1.667	0.861	2.159	1.510
3+4+5+6+7	1.060	2.285	1.673	0.861	2.161	1.511
2+3+4+5+6	2.673	7.178	4.925	1.718	5.537	3.627
3+4+5+6	2.673	7.167	4.920	1.718	5.539	3.628

Fuente: Elaboración propia

Tabla A 2.7 Combinaciones de rangos por nivel para Lima 1966.

Rangos	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)	RMSE (cm)	$\Delta$ picos (cm)	prom (cm)
<b>Nivel 8</b>	Norte - Sur			Este - Oeste		
2+3+4+5+6+7	1.143	2.889	2.016	0.845	2.470	1.658
3+4+5+6+7	1.143	2.884	2.013	0.845	2.458	1.651
2+3+4+5+6	3.471	14.099	8.785	1.360	4.849	3.105
3+4+5+6	3.471	14.093	8.782	1.360	4.836	3.098
<b>Nivel 7</b>						
2+3+4+5+6+7	1.117	3.275	2.196	0.809	2.487	1.648
3+4+5+6+7	1.117	3.294	2.205	0.809	2.477	1.643
2+3+4+5+6	3.456	13.829	8.643	1.327	4.686	3.006
3+4+5+6	3.456	13.849	8.652	1.327	4.675	3.001
<b>Nivel 6</b>						
2+3+4+5+6+7	1.119	3.010	2.064	0.847	1.887	1.367
3+4+5+6+7	1.119	3.030	2.075	0.847	1.874	1.361
2+3+4+5+6	3.422	13.584	8.503	1.304	4.525	2.914
3+4+5+6	3.422	13.605	8.514	1.304	4.512	2.908
<b>Nivel 5</b>						
2+3+4+5+6+7	1.126	3.327	2.226	0.821	2.218	1.520
3+4+5+6+7	1.126	3.354	2.240	0.822	2.209	1.515
2+3+4+5+6	3.376	13.210	8.293	1.283	4.279	2.781
3+4+5+6	3.376	13.238	8.307	1.283	4.270	2.777
<b>Nivel 4</b>						
2+3+4+5+6+7	1.183	2.770	1.977	0.908	1.609	1.258
3+4+5+6+7	1.183	2.776	1.980	0.908	1.595	1.251
2+3+4+5+6	3.292	12.397	7.844	1.275	4.360	2.817
3+4+5+6	3.292	12.403	7.847	1.275	4.345	2.810
<b>Nivel 3</b>						
2+3+4+5+6+7	1.096	3.414	2.255	0.854	1.368	1.111
3+4+5+6+7	1.096	3.382	2.239	0.854	1.357	1.106
2+3+4+5+6	3.220	11.615	7.418	1.224	3.877	2.550
3+4+5+6	3.220	11.583	7.402	1.224	3.866	2.545
<b>Nivel 2</b>						
2+3+4+5+6+7	1.140	2.378	1.759	0.739	1.293	1.016
3+4+5+6+7	1.140	2.359	1.749	0.739	1.293	1.016
2+3+4+5+6	3.078	10.490	6.784	1.193	3.646	2.420
3+4+5+6	3.078	10.471	6.774	1.193	3.647	2.420
<b>Nivel 1</b>						
2+3+4+5+6+7	1.059	2.466	1.762	0.684	0.963	0.823
3+4+5+6+7	1.059	2.447	1.753	0.684	0.964	0.824
2+3+4+5+6	2.987	10.234	6.611	1.173	3.452	2.312
3+4+5+6	2.987	10.215	6.601	1.173	3.453	2.313
<b>Nivel 0</b>						
2+3+4+5+6+7	1.018	2.169	1.593	0.734	0.692	0.713
3+4+5+6+7	1.018	2.154	1.586	0.734	0.695	0.715
2+3+4+5+6	2.806	9.482	6.144	1.120	3.084	2.102
3+4+5+6	2.806	9.468	6.137	1.120	3.087	2.104

Fuente: Elaboración propia

### ANEXO 3

#### Expediente técnico

<u>PARAMETROS SISMICOS DE DISEÑO - EDIFICIO</u>	
<b>SISTEMA ESTRUCTURAL SISMO RESISTENTE :</b>	
DIRECCION X - X : Pórticos de concreto armado apoyado sobre Aisladores Elastoméricos	
DIRECCION Y - Y : Pórticos de concreto armado apoyado sobre Aisladores Elastoméricos	
<b>CONFIGURACION ESTRUCTURAL :</b>	
En Planta : RREGULAR	
En Altura : IRREGULAR	
<b>PARAMETROS DEL ESPECTRO DE DISEÑO :</b>	
Factor de Zona :	Z = 0.4 (Lima)
Factor de Uso :	U = 1.0 (Biblioteca + Oficinas)
Parametro de Suelo :	S = 1.0 (Firme)
Coefficiente de Amplificacion Dinamica :	C = Variable
Factor de Reduccion :	R : Direccion X-X : R = 1 Direccion Y-Y : R = 1
<b>DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO EN LA BASE :</b>	
$D_{\max}(\text{Dir X}) = 11.97 \text{ cm.}$	$D_{\max}(\text{Dir Y}) = 11.77 \text{ cm.}$
<b>DESPLAZAMIENTO MÁXIMO EN LA BASE :</b>	
$D_{\max}(\text{Dir X}) = 25.55 \text{ cm}$	$D_{\max}(\text{Dir Y}) = 25.48 \text{ cm.}$
<b>DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO EN EL ULTIMO NIVEL :</b>	
$D_{\max}(\text{Dir X}) = 16.38 \text{ cm.}$	$D_{\max}(\text{Dir Y}) = 18.98 \text{ cm.}$
<b>DESPLAZAMIENTO MÁXIMO EN EL ULTIMO NIVEL :</b>	
$D_{\max}(\text{Dir X}) = 34.39 \text{ cm.}$	$D_{\max}(\text{Dir Y}) = 34.86 \text{ cm.}$
<b>DISTORSIONES DE ENTREPISO PARA EL DESPLAZAMIENTO DE DISEÑO :</b>	
$\Psi_{\max}(\text{Dir X}) = 2.38/1000$	$\Psi_{\max}(\text{Dir Y}) = 3.93/1000$
<b>DISTORSIONES DE ENTREPISO PARA EL DESPLAZAMIENTO MÁXIMO :</b>	
$\Psi_{\max}(\text{Dir X}) = 4.73/1000$	$\Psi_{\max}(\text{Dir Y}) = 5.23/1000$

Figura A 3.1 Tabla de parámetros sísmicos de diseño.  
Fuente: Expediente técnico, plano E-4

<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS</b>	
<b><u>SUELO (Norma E-050)</u></b>	
$\sigma_t = 4.0 \text{ kg/cm}^2$ (según estudio de suelos)	
<b>NOTA:</b> Las zonas en relleno se deberán compactar al 95% del PROCTOR MODIFICADO.	
<b><u>ACERO DE REFUERZO</u></b>	
Acero de refuerzo grado 60	$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
<b><u>CONCRETO (Norma E.060, ACI-318)</u></b>	
ZAPATAS Y PEDESTALES :	$f_c = 280 \text{ kg-f/cm}^2$
VIGA DE CIMENTACIÓN:	$f_c = 280 \text{ kg-f/cm}^2$
MUROS DE SOTANO	$f_c = 280 \text{ kg-f/cm}^2$
CAPITELES	$f_c = 350 \text{ kg-f/cm}^2$
COLUMNAS (1er y 2do piso)	$f_c = 350 \text{ kg-f/cm}^2$
COLUMNAS (niveles superiores):	$f_c = 280 \text{ kg-f/cm}^2$
VIGAS :	$f_c = 280 \text{ kg-f/cm}^2$
LOSAS:	$f_c = 280 \text{ kg-f/cm}^2$
FALSO PISO :	$f_c = 175 \text{ kg-f/cm}^2$
SOLADOS :	Cemento : Hormigon 1 : 8
<b><u>RECUBRIMIENTOS</u></b>	
Vigas y Columnas	5cm
Losas y Escaleras	2.0 cm
Zapatas	Inferior: 10 cm ; Superior: 5cm.
Viga de cimentación	Inferior: 10 cm ; Superior: 5cm.
<b><u>PLANCHAS DE ACERO</u></b>	A36
<b><u>PERNOS DE ANCLAJE</u></b>	A325
<b><u>SOBRECARGAS DE DISEÑO (Norma E.020)</u></b>	
Escalera, Descansos,	
Salas de Lectura y Pasadizos:	400 kg-f / m <sup>2</sup>
Oficinas	300 kg-f / m <sup>2</sup>
Bibliotecas	1500 kg-f / m <sup>2</sup>
Azotea	150 kg-f / m <sup>2</sup>
<b><u>TABIQUERÍA NO ESTRUCTURAL</u></b>	
La tabiquería será no estructural y se utilizará ladrillo tipo IV	
Ladrillo de arcilla - tipo IV	$f'_{b} = 130 \text{ kg/cm}^2$ $f'_{m} = 50 \text{ kg/cm}^2$
Dimensiones : 13cm x 24cm x 9cm	
Porcentaje máximo de vacíos : 30%	
Mortero Tipo P1 - Cemento : Arena 1 : 4	
<b><u> AISLADORES ELASTOMÉRICOS</u></b>	
Desplazamiento de Diseño del aislador: $D_D = 187 \text{ mm}$	
Desplazamiento Máximo del aislador: $D_M = 407 \text{ mm}$	
Rigidez previo a la fluencia: $K_y = 1 \text{ kN/mm}$	
Fuerza de fluencia del núcleo de plomo: $F_y = 71.4 \text{ kN}$	
Rigidez efectiva para el desplazamiento de diseño: $K_{eff} = 1.643 \text{ kN/mm}$	
Rigidez efectiva para el desplazamiento máximo: $K_{eff} = 1.214 \text{ kN/mm}$	
Amortiguamiento efectivo para el desplazamiento de diseño: $\beta_{eff} = 0.20$	
Amortiguamiento efectivo para el desplazamiento máximo: $\beta_{eff} = 0.10$	
<b><u>NORMAS DE ANÁLISIS Y DISEÑO</u></b>	
Norma técnica E.020 CARGAS - Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú.	
Norma técnica E.030 DISEÑO SISMO RESISTENTE - Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú.	
Norma técnica E.050 SUELOS Y CIMENTACIONES - Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú.	
Norma técnica E.060 CONCRETO ARMADO - Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú.	
Norma técnica E.070 ALBAÑILERÍA - Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú.	
ASCE/SEI 07-10 "MINIMUM DESIGN LOADS FOR BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES" – Recomendaciones.	

Figura A 3.37 Especificaciones Técnicas.  
Fuente: Expediente técnico, plano E-4

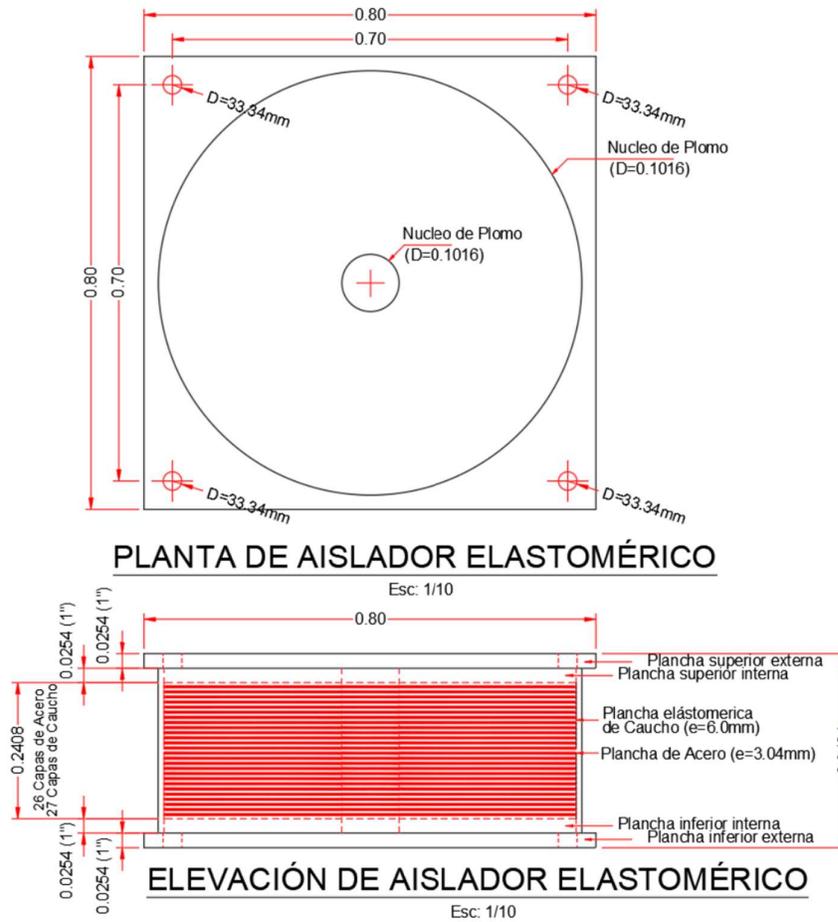


Figura A 3.38 Vistas en planta y elevación, aisladores elastoméricos.  
Fuente: Expediente técnico, plano E-4