



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL-ESTRUCTURAS

**MONITOREO DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO – ESTRUCTURA DE UN
EDIFICIO INSTRUMENTADO EN ACAPULCO**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA - ESTRUCTURAS**

PRESENTA:

DIEGO PÉREZ MIGUEL

TUTOR:

DR. GERARDO RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria , CD. MX.

Enero 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Resumen

En esta tesis se estudian los efectos de interacción suelo-estructura de un edificio instrumentado de 17 niveles, denominado SIS, cuya estructuración es a base de marcos de concreto reforzado, ubicado en la zona de suelo blando de la ciudad de Acapulco. Fue instrumentado en el año 2001, y hasta marzo de 2022 se han registrado más de 26 eventos sísmicos de baja intensidad y un evento de moderada intensidad.

Los objetivos del presente estudio son estimar los efectos de Interacción Suelo-Estructura (ISE) del edificio con base en los registros sísmicos, además de identificar los posibles efectos no lineales del suelo ante los sismos registrados de mayor intensidad.

El monitoreo de los efectos de ISE consiste en determinar las frecuencias y rigideces de traslación, de cabeceo de la base y de la estructura, utilizando el método semi-empírico de Luco (1980) en función de las frecuencias del sistema previamente calculadas por otros autores. Las rigideces de ISE obtenidas a partir de datos experimentales serán comparadas con las obtenidas analíticamente del programa de cómputo Dyna5 y con valores estimados mediante el Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE (MDOC, 2019).

Para identificar los posibles efectos no lineales del suelo se aplicará un análisis espectral a partir de la selección de sismos de mayor intensidad registrados simultáneamente en la estación de campo del edificio SIS y en algunas estaciones de Acapulco ubicadas en suelos clasificados como blando, intermedio y firme. El análisis consiste en identificar la variación de los periodos dominantes del sitio empleando espectros de respuesta y cocientes espectrales de Fourier.

Agradecimiento especial

Dr. David Murià Vila

Por la gran aceptación, persistencia y motivación que recibí desde la primera interacción que tuvimos, así como por compartir su experiencia, conocimiento y tiempo que me brindó en el desarrollo de este trabajo, quiero expresar mi profundo agradecimiento. Su pacencia, consejos y críticas han sido fundamentales para mi crecimiento tanto a nivel personal como profesional.

Agradecimientos

A mi familia por el gran apoyo moral, por su comprensión y tiempo durante esta etapa de mi formación. A mi madre Nicolasa Miguel Andrés por permanecer en todos estos años de formación.

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por proporcionarme apoyo económico durante mis estudios y por su continua ayuda a toda la sociedad de estudiantes de posgrado de México.

Sin menor importancia, al instituto de ingeniería de la universidad Nacional autónoma de México (II-UNAM) por brindarme asistencia técnica y económica en el tiempo oportuno durante mie estancia como becario.

A mi director de tesis el Dr. Gerardo Rodríguez Gutiérrez, por la aceptación, apoyo y sugerencias que me fueron de gran ayuda para culminar este trabajo.

Al Mtro. Daniel Aldama y al Dr. Miguel Illescas por su solidaria contribución a este trabajo, a la comprensión, experiencia y sugerencias que me condujeron a mejorar mi formación, así mismo, agradezco de su amistad y profesionalismo que me demostraron durante este tiempo.

También manifiesto mi gratitud a la accesibilidad y apoyo proporcionado por los propietarios del edificio durante el tiempo de monitoreo transcurrido a la fecha. Igualmente, al desempeño indispensable de la Coordinación de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería a cargo del Dr. Leonardo Ramírez Guzmán, así como a la atención por parte del M.I. Marco A. Macías Castillo en lo referente a la operación, mantenimiento de la instrumentación del edificio y del preprocesamiento de los registros sísmicos.

Finalmente, agradezco a aquellos calladamente colaboraron en la realización de este trabajo.

Índice

Agradecimientos	4
Índice	5
Notación	7
Introducción	9
Capítulo 1. El edificio SIS	10
1.1 Descripción de la estructura y su instrumentación	10
1.2 Instrumentación	12
1.3 Registros sísmicos	14
Capítulo 2. Frecuencias fundamentales del sistema suelo-estructura	30
2.1 Frecuencias del sistema del método AE y N4SID en la fase intensa	31
2.2 Frecuencias del sistema de los métodos AE y N4SID en la fase final	34
2.3 Frecuencias del sistema por ventanas	37
Capítulo 3. Estimación de los efectos de interacción suelo-estructura (ISE)	42
3.1. Método simplificado de Luco	43
3.2 Estimación espectral de las frecuencias y rigideces de ISE con el método de Luco.....	49
3.2.1 Estimación en la fase intensa	49
3.2.2 Estimación en la fase final	60
3.3 Estimación espectral por ventanas con el método de Luco	69
3.3.1 Estimación de las frecuencias de ISE a partir de las frecuencias del sistema obtenidas con los métodos de MM y N4SID	70
3.3.2 Historia de las frecuencias y rigideces de ISE	73
3.4 Comparación de las frecuencias de ISE entre las fases intensa, final y por ventanas	90
3.5 Comparación de las rigideces de ISE experimentales con valores analíticos	95
3.6 Cocientes espectrales sótano con respecto a la estación de campo	102
Capítulo 4. Movimiento del terreno del edificio SIS y en otras estaciones de Acapulco del II-UNAM	105
4.1 Metodologías del análisis espectral	106
4.2 Análisis espectral del sitio SIS	109
4.2.1 Estimación de las frecuencias dominantes con los CN.....	109
4.2.2 Estimación de las frecuencias dominantes en la fase final con los CN	116
4.2.3 Estimación de las frecuencias dominantes con espectros de respuesta	120

4.2.4 Comparaciones y comentarios	124
4.3 Análisis espectral de las estaciones de campo de Acapulco del II-UNAM.....	128
4.3.1 Registros sísmicos de las estaciones de campo.....	130
4.3.2 Estimación de las frecuencias o periodos dominantes	150
4.4 Análisis comparativo entre estaciones de campo	153
Capítulo 5. Comentarios y conclusiones.....	171
Apéndice A. Análisis espectral de los registros.....	176
A.1 Identificación de las frecuencias del sistema con el método AE con los registros completos	179
Apéndice B. Efectos de ISE estimados con el método de Luco por ventanas	182
B.1 Estimación a partir de las frecuencias del sistema obtenidas con el método N4SID	182
B.2 Estimación a partir de las frecuencias del sistema obtenidas con el método de MM.....	198
Apéndice C. Cocientes de Nakamura y espectros de respuesta las estaciones de campo	202
C.1 Edificio SIS	202
C.2 Estaciones del II-UNAM ubicadas en Acapulco	205
Reconocimientos	218
Referencias	219

Notación

$A_{m\acute{a}x}$	aceleración máxima registrada en el suelo en cm/s^2
$a_{m\acute{a}x}$	respuesta máxima en términos de aceleración para un sistema de un grado de libertad cm/s^2
$Amp_{m\acute{a}x}$	amplificación máxima asociada a la frecuencia dominante del suelo
CN	cociente de Nakamura empleando espectros de Fourier de los registros completos
CN_{ff}	cociente de Nakamura empleando espectros de Fourier de la fase final de registros
$D_{m\acute{a}x}$	respuesta máxima en términos de desplazamiento para un sistema de un grado de libertad en cm
D_{epi}	distancia epicentral en km
ERA	espectro de respuesta de aceleraciones
ERD	espectro de respuesta de desplazamientos
\bar{f}_1	frecuencia fundamental de traslación del sistema suelo-estructura en Hz
\bar{f}_{1r}	frecuencia fundamental de torsión del sistema suelo-estructura en Hz
f_1	frecuencia natural de traslación de la estructura con base empotrada en Hz
f_{1r}	frecuencia natural de torsión de la estructura con base empotrada en Hz
f_c	frecuencia natural de cabeceo de la base en Hz
f_h	frecuencia natural de traslación de la base en Hz
f_r	frecuencia natural de torsión de la base en Hz
f_s	frecuencia dominante del suelo en Hz
FT	función de transferencia empleando espectros de Fourier de los registros completos
FT_{ff}	función de transferencia empleando espectros de Fourier de la fase final de los registros
H	altura total de la estructura medida desde la base
$\{h\}$	vector de alturas de cada nivel del edificio
I_1	masa modal rotacional correspondiente al primer modo de vibrar de la estructura con base empotrada en kg.m^2
I_{Arias}	intensidad de Arias en cm/s
$I_{Arias-h}$	intensidad de Arias horizontal o suma de intensidades de Arias de los componentes horizontales
K_1	rigidez de traslación de la estructura con base empotrada en N/m
K_{1r}	rigidez de torsión de la estructura con base empotrada Nm/rad
K_c	rigidez de cabeceo de la base en Nm/rad
K_h	rigidez de traslación de la base en N/m
K_r	rigidez de torsión de la base en Nm/rad
L	componente longitudinal del edificio
M	escala sismológica de Richter
M_1	masa modal correspondiente al primer modo de vibrar de la estructura con base empotrada en $\text{kg.s}^2/\text{m}$
T	componente transversal del edificio
T_s	periodo dominante del suelo en s

Notación

β_1	parámetro modal para el cálculo de los efectos de ISE con el método de Luco
γ_1	parámetro modal para el cálculo de los efectos de ISE con el método de Luco
x_b	traslación absoluta en la base en el dominio del tiempo
X_b	traslación absoluta en la base en el dominio de la frecuencia
X_e^{az}	traslación de la estructura en la azotea en el dominio de la frecuencia
$\{\phi_1\}$	vector de la forma modal del primer modo de vibrar de la estructura con base empotrada
\bar{X}_{tot}^{az}	traslación total del sistema en la azotea en el dominio de la frecuencia
ϕ_r	giro de cabeceo en la base en el dominio del tiempo
Φ_r	giro de cabeceo en la base en el dominio de la frecuencia
Φ_{rv}	giro torsional en la base en el dominio de la frecuencia
$\bar{\Phi}_{tot}^{az}$	giro torsional total en la azotea en el dominio de la frecuencia
V	componente vertical del edificio o de la estación

Introducción

A partir de los estudios en las estructuras instrumentadas en México se ha identificado la variación de las propiedades dinámicas por efecto de la interacción suelo-estructura (ISE), en función de la intensidad de las solicitaciones en la estructura (Murià-Vila, 2007).

Las estructuras expuestas a solicitaciones sísmicas de mediana y alta intensidad tienen la posibilidad de padecer daño estructural, siendo la instrumentación de edificios una opción que permite dar seguimiento de su comportamiento durante su vida útil. Así, se tiene la posibilidad de detectar posibles cambios de las propiedades dinámicas del edificio (Murià-Vila, 2007).

Esta tesis trata de un edificio instrumentado denominado SIS, localizado en la ciudad de Acapulco, a cargo del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) y se enfoca en el monitoreo de los efectos de ISE. Cabe mencionar que las respuestas registradas de este edificio se han estudiado desde el año 2001 de este edificio como puede consultarse en Tabora (2003), Murià-Vila *et al.* (2004), Correa (2005), y Aldama *et al.*, (2019).

Los objetivos del estudio al estimar los efectos de ISE del edificio SIS son:

1. La estimación de los efectos ISE se realizará con base en el método simplificado de Luco (1980), utilizando las frecuencias de vibración estimadas en trabajos anteriores del edificio SIS (Aldama *et al.*, 2019), con el fin de obtener las frecuencias y rigideces de traslación, cabeceo y de la estructura utilizando los registros sísmicos con una discretización en ventanas y así poder identificar la variación de las frecuencias y rigideces de ISE en el tiempo. Las rigideces de ISE se comparan con valores analíticos obtenidos con las expresiones establecidas en el Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE (2019) y el programa Dyna5.
2. Determinar la posible presencia de los efectos no lineales en el sitio donde está desplantado el edificio mediante el estudio comparativo de la respuesta local con respecto a la respuesta de las estaciones acelerométricas localizadas en diferentes zonas de Acapulco. Adicionalmente, se analizarán y compararán los cambios aparentes tanto en los espectros de respuesta como en los espectros de Fourier de los registros capturados en la estación de campo.

Capítulo 1. El edificio SIS

1.1 Descripción de la estructura y su instrumentación

El edificio SIS cuenta con un semisótano para uso de estacionamiento, el nivel de planta baja es para uso común, siguiendo 16 niveles para uso habitacional. Las dimensiones de las plantas tipo son de 23.90 m en la dirección longitudinal (L) por 24.60 m en la dirección transversal (T), habiendo una ampliación de estas dimensiones para el semisótano, de 32.90 m en L y 37.55 m en T.

La altura tipo de los entrepisos es de 3.60 m, a excepción de la planta baja y del último nivel que son de 4.45 m y 3.80 m, respectivamente. En cambio, el semisótano tiene una altura de 2.80 m con una profundidad de desplante de 0.80 m, siendo así, la altura total de 71.50 m (figuras 1 a 3).

El edificio consta de un sistema de marcos rígidos compuesto por columnas y traveses de concreto reforzado, que a su vez da soporte al sistema de piso a base de losas macizas de 10 cm de espesor, coladas monolíticamente con las traveses, las cuales tienen un peralte de 0.90 m. La resistencia nominal del concreto es de $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$ y el acero de refuerzo tiene resistencia a la fluencia de $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$.

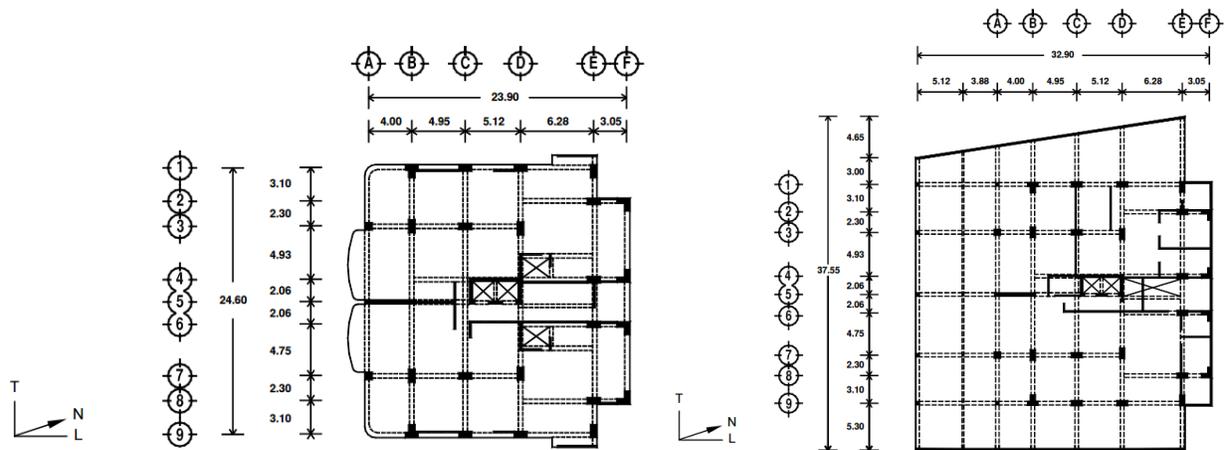


Figura 1. Dimensiones de la planta tipo (izquierda) y de la planta del sótano (derecha)

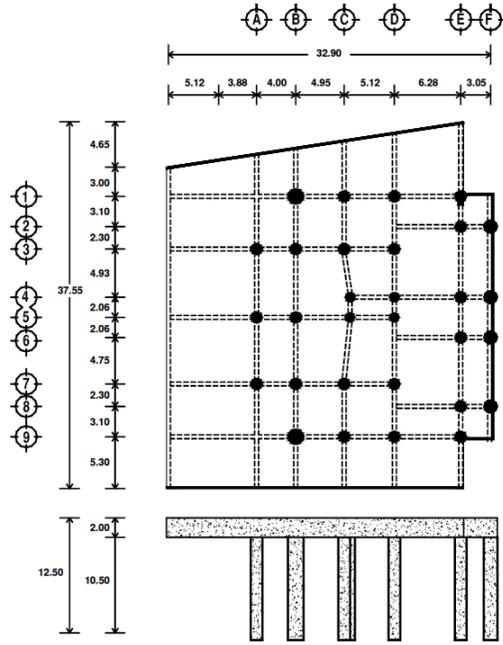


Figura 2. Planta de la cimentación del edificio SIS

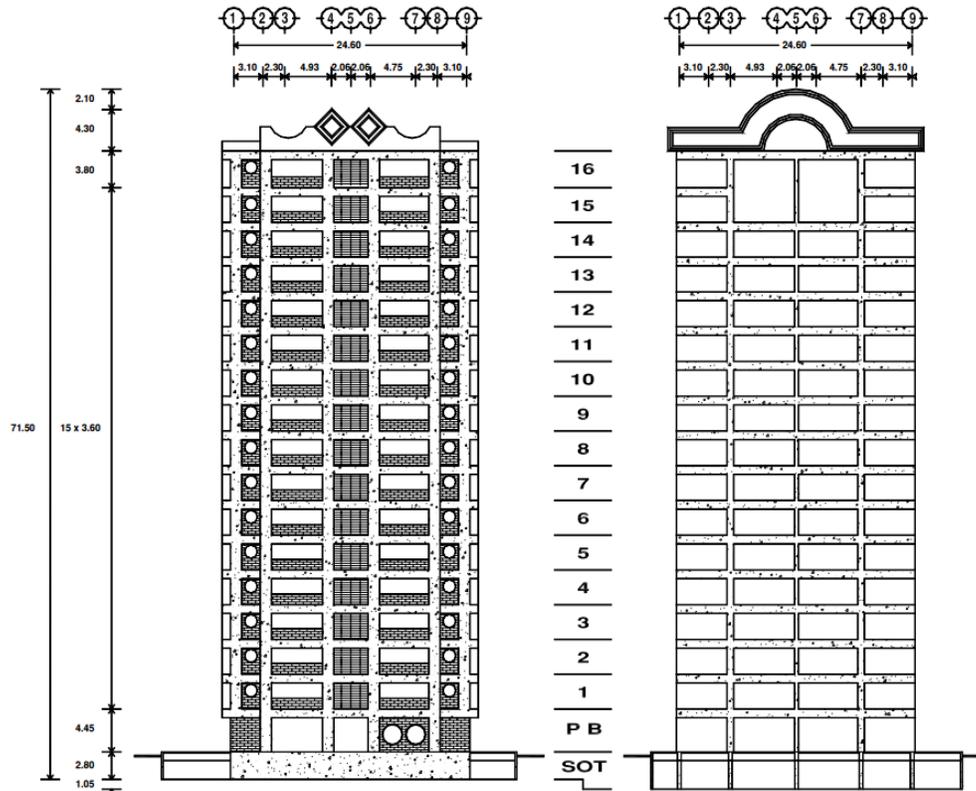


Figura 3. Elevación de la fachada norte (izquierda) y fachada sur (derecha), dimensiones en m

1.2 Instrumentación

En el edificio se encuentra instalada una red de 18 servoacelerómetros uniaxiales y dos triaxiales, teniendo un total de 24 canales de alta resolución distribuidos distintos niveles del edificio. Los acelerómetros tienen $\pm 1g$ a nivel del suelo, $\pm 2g$ en los pisos intermedios y $\pm 4g$ en la azotea del edificio. El muestreo es a 100 Hz, con un rango dinámico de 114 dB y operan con convertidores analógicos a digitales de 20-bits permitiendo registrar tanto la vibración ambiental como los movimientos sísmicos de gran intensidad. La construcción del edificio fue concluida en diciembre de 2000 y un año después se instaló este sistema de registro con acelerómetros.

Los acelerómetros se encuentran distribuidos en sitios estratégicos que permiten conocer el movimiento en los componentes transversal, longitudinal y vertical (T, L y V). La figura 4 muestra la distribución de los 24 canales originales y la orientación correspondiente.

- El sótano tiene instalado un sensor triaxial en el oeste (SO-O), dos uniaxiales en el norte (SO-N) y uno uniaxial en el costado este (SO-E).
- La estación de campo integra un sensor triaxial (JN).
- Los niveles 4, 8 y 12 cuentan con dos sensores en el costado norte (nivel-N) y uno en el centro, al interior del foso del ascensor (nivel-C).
- En la azotea tienen seis sensores, dos al norte (AZ-N), dos al sur (AZ-S) y dos en el este y oeste (AZ-O y AZ-E, respectivamente).

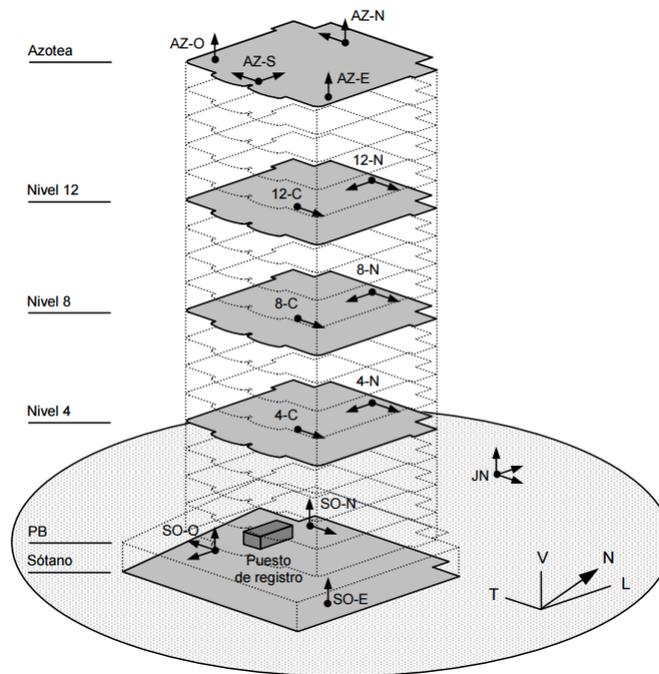


Figura 4. Ubicación de la instrumentación en el edificio SIS (Taborda, 2003)

De acuerdo con el sistema de Alerta Estructural (AlertaE) desarrollado por Aldama (2009) y Murià-Vila *et al.* (2010), el procesamiento de los registros originales (figura 4) consiste los siguientes pasos:

1. Sincronización de los acelerogramas registrados en cada nivel instrumentado, tomando en común un tiempo de referencia.

2. Polarización de los registros de acuerdo con la orientación de los sensores y el sistema de referencia.
3. Corrección de línea base a partir de un promedio de amplitudes del tramo inicial, previo a la fase intensa del movimiento, este promedio se resta a toda la señal.
4. Filtrado de la señal con una función de Butterworth (1930) pasa altas con una frecuencia de corte de 0.10 Hz.
5. Generación de los registros adicionales en puntos estratégicos a partir de las señales originales.
6. Doble integración de la historia de aceleraciones para obtener la respuesta en términos de velocidades y desplazamientos. Para el caso se supone una variación lineal entre cada incremento de tiempo.

Para el desarrollo del punto 5, el equipo de monitoreo del II-UNAM ha desarrollado diversas herramientas que permiten generar registros adicionales con el fin de optimizar la ubicación de los instrumentos de los niveles intermedios (Taborda y Murià-Vila, 2002). Con base en expresiones basadas en la geometría del diafragma rígido se generan los registros horizontales adicionales para el centro de los niveles instrumentados (CEN), en el costado norte del edificio (LAT) y en el costado sur, denominado como opuesto (OPTO). Además, se generan las señales verticales en cada uno de los costados del sótano y del centro, (SO-OES, SO-EST, SO-SUR, SO-NOR Y SO-CEN, respectivamente). Para mayor detalle sobre la generación de los registros horizontales y verticales se puede consultar el trabajo de Taborda (2002).

En la figura 5 se observan los registros horizontales y verticales generados en los niveles instrumentados.

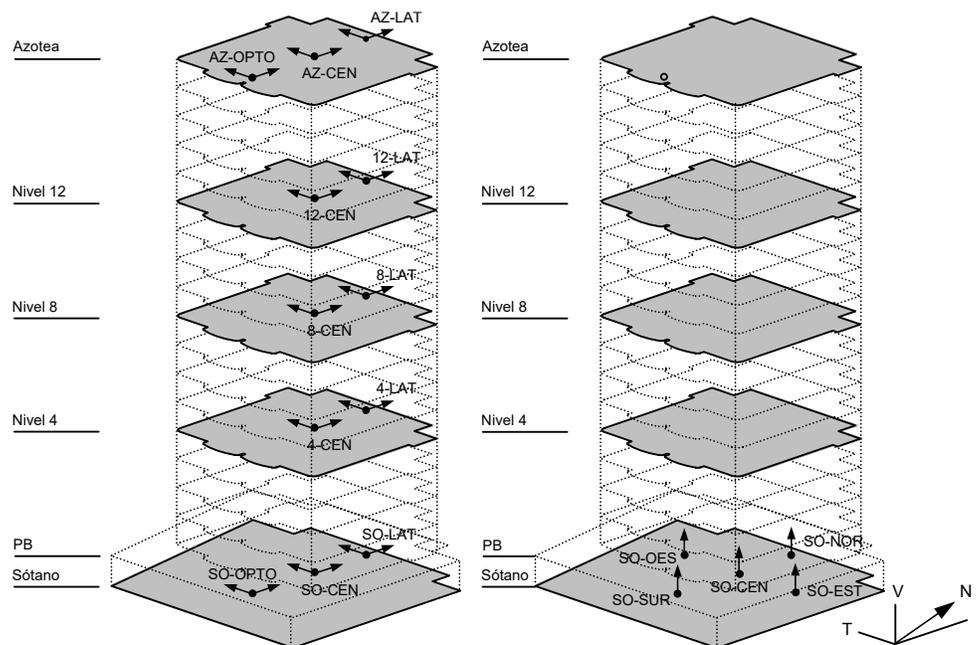


Figura 5. Registros horizontales y verticales generados en la azotea, nivel 12, nivel 8, nivel 4 y en el sótano (Taborda, 2003)

El sistema de AlertaE hace el procesamiento antes descrito de forma automática, por lo que posteriormente es indispensable hacer una revisión a detalle de los registros por si fuera necesaria alguna corrección.

1.3 Registros sísmicos

Desde el año 2001 hasta la fecha, se han registrado decenas de sismos por la instrumentación del edificio SIS y su estación de campo. De estos, se han seleccionado los 27 eventos más representativos del monitoreo y que se abordarán en este trabajo para la estimación de los efectos de ISE.

Los sismos seleccionados se clasifican por su intensidad a partir de indicadores de severidad del sistema de AlertaE (Aldama, 2009 y Murià-Vila *et al.*, 2010). Estos indicadores están en función de los umbrales con los que se evalúa el nivel de daño físico en edificios instrumentados, dos indicadores se refieren la severidad del sismo que son la aceleración máxima del suelo ($A_{m\acute{a}x}$) y la intensidad de Arias horizontal ($I_{h-Arias}$), los otros tres indicadores evalúan el desempeño estructural, que son el coeficiente sísmico (Cs), la relación de deriva entre pisos (SD) y la variación de frecuencia fundamental de los componentes horizontales (VF).

Para el desarrollo de este trabajo se consideran solo los indicadores de la $A_{m\acute{a}x}$ y la $I_{h-Arias}$ para la clasificación de los eventos sísmicos. La aceleración máxima del suelo $A_{m\acute{a}x}$ se identifica en los registros de la estación de campo en los componentes L y T.

La intensidad Arias (1970) es un indicador del contenido energético disipado de un registro sísmico, que se estima con la integración del registro de aceleración, siendo $a(t)$ el registro de aceleración, t el tiempo total del registro y g la aceleración de la gravedad.

$$I_{Arias} = \frac{\pi}{2g} \int_0^t a^2(t) dt \quad Ec. 1$$

El indicador intensidad de Arias horizontal $I_{h-Arias}$ que se emplea en el sistema de AlertaE (Aldama, 2009 y Murià-Vila *et al.*, 2010) es la suma de las intensidades de los componentes L y T registrados en la estación de campo.

En la tabla 1 se establecen los límites de los umbrales de la $A_{m\acute{a}x}$ y la $I_{h-Arias}$ que recientemente estan en actualización por parte del equipo de monitoreo de este edificio conforme a las características de los nuevos eventos sísmicos registrados en el edificio SIS (Murià-Vila *et al.*, 2010). Dichos límites sirven para clasificar particularmente a los sismos que se registran en el sitio donde está desplantado el edificio de estudio.

Tabla 1. Umbrales para la clasificación de la intensidad de un sismo

Intensidad	$I_{h-Arias}$	$A_{m\acute{a}x}$
	(cm/s)	(cm/s ²)
Baja	<107	<292
Moderada	107-645	292-972
alta	>645	>972

Estos límites se han reajustado a partir del sismo de alta intensidad que afectó a la ciudad de Acapulco del 07 de septiembre de 2021 de magnitud 7.1, por lo que difieren de los indicados en publicaciones previas (Aldama, 2003 y Murià-Vila *et al.*, 2019).

En la tabla 2 se muestra la relación de sismos seleccionados para la estimación de los efectos de ISE del edificio, la cual contiene la clave con la que se identifica el sismo, la fecha, la magnitud (M), coordenadas del epicentro, la distancia epicentral (D_{epi}) con respecto al edificio, la aceleración máxima ($A_{m\acute{a}x}$) en tres direcciones (transversal, longitudinal y vertical), la intensidad de Arias horizontal ($I_{h-Arias}$) y la clasificación de intensidad (baja, moderada y alta). Los valores mostrados son resultado del análisis y procesamiento mediante el sistema de AlertaE (Aldama, 2009 y Murià-Vila *et al.*, 2010).

Tabla 2. Eventos sísmicos registrados por la red instrumentada en el edificio SIS y su clasificación

Evento	Ubicación	Fecha	M	Coordenadas		D_{epi} (km)	$A_{m\acute{a}x}$ (cm/s ²)			I_{Arias} (cm/s)		$I_{h-Arias}$ (cm/s)	Intensidad
				Lat.N	Lon.W		T	L	V	T	L		
01-1	Guerrero	07/10/2001	6.1	16.98	100.16	45	101.9	77.5	72.7	9.38	7.06	16.44	baja
01-2	Guerrero	07/10/2001	3.4	17.11	100.01	43	15.0	9.7	8.1	0.13	0.06	0.18	baja
01-3 ⁽¹⁾	Guerrero	29/10/2001	4.0	16.65	100.05	31	8.1	4.0	2.9	0.01	0.01	0.02	baja
02-1	Guerrero	20/01/2002	4.7	16.8	100.29	54	28.5	28.8	16.4	0.39	0.48	0.87	baja
02-2	Guerrero	16/02/2002	4.6	16.92	99.91	20	47.8	32.1	23.6	0.92	0.57	1.49	baja
02-3	Guerrero	19/02/2002	4.6	16.91	100.11	37	31.2	18.0	16.5	0.36	0.17	0.53	baja
02-4	Guerrero	18/04/2002	6.3	16.42	101.1	148	1.8	1.4	2.3	0.03	0.02	0.05	baja
03-1	Colima	21/01/2003	7.6	18.22	104.6	551	7.5	7.3	3.4	0.44	0.55	0.99	baja
04-1	Oaxaca	14/06/2004	5.8	16.03	97.84	231	5.8	5.9	3.0	0.15	0.23	0.38	baja
07-1	Guerrero	13/04/2007	6.3	17.09	100.44	78	98.0	65.9	49.6	5.59	3.56	9.15	baja
11-1	Guerrero	10/12/2011	6.5	17.84	99.98	118	28.8	17.9	17.3	3.02	1.84	4.86	baja
12-1	Guerrero	20/03/2012	7.8	16.42	98.36	164	30.9	30.0	12.7	3.31	3.32	6.63	baja
13-3	Guerrero	21/08/2013	6.0	16.79	99.56	27	323.9	289.2	270.4	75.94	43.17	119.10	moderada
14-1	Guerrero	18/04/2014	7.2	17.18	101.19	159	38.5	43.4	21.9	7.20	7.31	14.51	baja
14-2	Guerrero	08/05/2014	6.4	17.11	100.87	123	48.7	31.8	23.8	6.12	1.68	7.79	baja
14-3	Guerrero	10/05/2014	6.1	17.06	100.95	130	15.2	9.2	6.6	0.53	0.40	0.92	baja
17-1	Chiapas	07/09/2017	8.2	14.85	94.11	661	13.1	13.0	7.5	1.39	1.55	2.93	baja
17-2	Puebla	19/09/2017	7.1	18.40	98.72	214	35.1	34.3	25.5	6.48	6.19	12.66	baja
17-3	Oaxaca	23/09/2017	6.1	16.80	94.90	540	3.0	2.5	1.1	0.05	0.04	0.09	baja
17-4	Guerrero	25/12/2017	5.0	16.86	99.85	10	119.8	124.5	56.9	2.87	2.78	5.65	baja
18-1	Oaxaca	16/02/2018	7.2	16.25	98.03	204	25.9	20.5	7.6	3.35	3.14	6.49	baja
18-2	Oaxaca	19/02/2018	6.0	16.25	97.77	231	3.8	3.1	1.7	0.07	0.07	0.14	baja
18-3	Guerrero	21/05/2018	5.1	17.08	98.68	128	10.0	11.5	5.7	0.21	0.22	0.43	baja
20-1	Oaxaca	23/06/2020	7.4	15.784	96.12	420	8.6	7.6	2.8	0.59	0.68	1.27	baja
21-1 ⁽²⁾	Guerrero	13/10/2021	4.0	16.75	99.75	7	33.4	18.4	10.3	0.21	0.08	0.28	baja
22-1	Guerrero	21/02/2022	4.4	16.95	99.77	19	14.4	11.4	9.3	0.08	0.04	0.12	baja
22-2	Guerrero	18/03/2022	4.8	16.85	99.95	18	35.5	32.3	28.6	0.69	0.47	1.16	baja

Donde M, D_{epi} , $A_{m\acute{a}x}$, $I_{h-Arias}$, es la escala sismológica de magnitud de momento, distancia epicentral, aceleración máxima registrada en el suelo y la intensidad de Arias horizontal, respectivamente.

⁽¹⁾Sismo de referencia para la evaluación del estado físico del edificio SIS.

⁽²⁾Réplica del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 de M 7.1 que no se registró en la red acelerográfica del edificio SIS.

El sismo de alta intensidad ocurrido el 7 de septiembre de 2021, (magnitud de M 7.1) no fue registrado por la red acelerométrica del edificio SIS. Para el caso se dispone el evento 21-1 que

corresponde a una réplica, este evento es representativo del estado dinámico del edificio posterior a la ocurrencia del sismo de gran intensidad.

El estudio y análisis de las propiedades dinámicas del edificio se enfocan en lo estimado en las fases inicial, intensa y final de cada evento sísmico. Por medio de la variación de la intensidad de Arias de los registros de la estación de campo (JN) es posible determinar los intervalos de tiempo de las fases inicial, intensa y final de cada evento. Para el estudio del edificio SIS, la fase intensa se considera con base en la intensidad de Arias entre los porcentajes de 2.5 y 97.5 % de su valor con el fin de considerar las pequeñas amplitudes de movimiento sísmico dada la influencia de ésta con la frecuencia natural de la estructura.

Como ejemplo, en la figura 6 se muestra el registro de aceleraciones del evento 01-1, registrado en el componente L de la estación de campo. En el registro se indican las fases, inicial, intensa y final de este evento. En la misma figura se traza con una línea discontinua la variación de la intensidad de Arias de dicho componente, apreciando la variación que tienen las fases con las amplitudes de aceleración. El comienzo de la fase final corresponde al instante en el que la intensidad de Arias alcanza el 97.5 % de su valor, se podrá notar que en esta fase están asociadas aceleraciones menores a las de la fase intensa, habiendo coincidencia con los porcentajes de la intensidad de Arias antes mencionados.

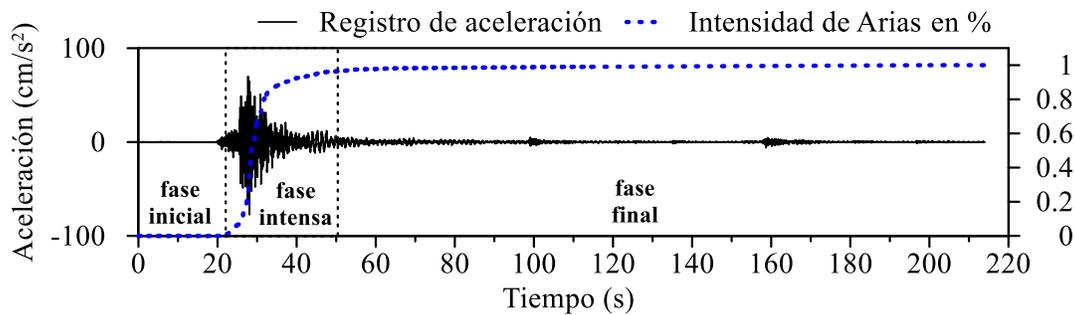


Figura 6. Representación de las fases inicial, intensa y final del registro de aceleraciones de la estación de campo en función de la intensidad de Arias del evento 01-1 registrado en el componente L

El evento 13-3 es el único evento de moderada intensidad de los eventos registrados, el resto de los eventos de la tabla 2 son catalogados de baja intensidad.

En el evento más intenso 13-3, las $A_{m\acute{a}x}$ son de 324 y 289 cm/s^2 en las direcciones T y L, respectivamente. En este evento la $I_{h-Arias}$ es de 119 cm/s . De los eventos de baja intensidad, los eventos 01-1 y 17-4 son los que presentan $A_{m\acute{a}x}$ superiores a los 100 cm/s^2 , ya sea en el componente L o T, mientras que en el resto de los eventos las $A_{m\acute{a}x}$ son menores de los 50 cm/s^2 y las $I_{h-Arias}$ son menores de 15 cm/s .

En las figuras 7 a 12 se muestran los registros de aceleraciones de cada evento, representando los registros generados en el centro de la azotea (AZ-CEN), en el centro del sótano (SO-CEN), así como los registros de la estación de campo (JN). Las figuras 7 y 8 corresponden a los registros en la dirección T; las figuras 9 y 10 a los registros en la dirección L; y las figuras 11 y 12 muestran los registros en la dirección V.

En las mismas figuras 7 al 12 se observa que las aceleraciones registradas en la AZ-CEN son mayores con respecto a las de la estación de campo y las aceleraciones registradas en el SO-CEN son menores

a las aceleraciones registradas en la estación JN, siendo claro la amplificación del movimiento en la azotea y un abatimiento en el sótano con respecto al movimiento del terreno.

La aceleración en el punto AZ-CEN en la dirección L o T se amplifica entre 1.1 y 8.5 veces con respecto a las aceleraciones registradas en la estación de campo JN, en el caso contrario, en los eventos de muy baja intensidad 01-3, 21-1, 22-1 y 22-2 las aceleraciones en la azotea se atenúan con respecto a las aceleraciones del terreno, mientras que la aceleración en la dirección V en la azotea presentan amplificaciones en un orden de 1.1 a 2.7 veces con respecto a la aceleración del terreno.

Por otra parte, en las figuras 13 a 15 se tienen los espectros de amplitudes de Fourier de las aceleraciones registradas en los puntos SO-CEN y JN, los espectros se presentan para las tres direcciones de movimiento registrados L, T y V.

En los espectros de Fourier de los registros de los puntos SO-CEN y JN se aprecia que las amplitudes asociadas a frecuencias menores de 5 Hz son aproximadamente del mismo orden, y en frecuencias superiores de 5 Hz, las amplitudes del espectro SO-CEN se atenúan con respecto al del terreno (JN).

También en las figuras 13 a 15 se observa que del evento 01-1 a 02-3 las máximas amplitudes de Fourier se distribuyen en una amplia banda de frecuencias que va de 0.5 a 18 Hz, en un caso similar son los eventos 07-1, 13-3, 17-4, 21-1, 22-1 y 22-2. Por el contrario, en los eventos 02-1, 03-1, 04-1, 11-1, 12-1, 14-1, 14-2, 14-3, 17-1, 17-2, 17-3, 18-1, 18-2, 18-3 y 20-1, las máximas amplitudes se concentran en frecuencias menores a 6 Hz.

En las figuras 16 a 18 se muestran los espectros de Fourier de los registros, que representa el movimiento de traslación total del sistema suelo-estructura en los componentes L y T, que corresponden a los registros generados en el centro de la azotea (AZ-CEN), y para el movimiento de torsión del sistema se presentan los espectros de Fourier de los registros que describen giro torsional total en el nivel de la azotea (AZ-LAT y AZ-CEN). Adicionalmente se ilustran los espectros de Fourier de los registros de la estación de campo (JN) en las direcciones L y T.

En los espectros de Fourier del componente L, las máximas amplitudes están asociadas a un intervalo angosto comprendido entre 0.80 y 1.0 Hz, el cual está asociado a la frecuencia fundamental del sistema de este componente. En este intervalo de frecuencias hay múltiples crestas, en la mayoría de los eventos mostrados. En algunos eventos se tiene una sola cresta, tales son los eventos 02-2, 02-3, 14-3, 17-3.

En los espectros de Fourier del componente T, se observa que las máximas amplitudes predominan en el intervalo de 0.70 y 0.90 Hz, tal como se observa en los espectros de los eventos 01-1, 02-1 al 12-1. Por otro lado, en los espectros de Fourier de los eventos 13-3 a 22-2 se observan otras amplitudes adicionales entre 2 y 3 Hz que son mayores de 100 cm/s. Dichos intervalos dan un esquema general de las frecuencias fundamentales del sistema.

Los espectros de Fourier de los registros del punto AZ-CEN son similares a los espectros del punto AZ-LAT (línea punteada), con la diferencia de que en este último hay otras crestas de menor amplitud entre 1.1 a 1.3 Hz, aproximadamente, las cuales están asociadas a la frecuencia fundamental de torsión.

El cálculo del espectro de Fourier de un registro dado es obtenido con la formulación que se describe en el Apéndice A.

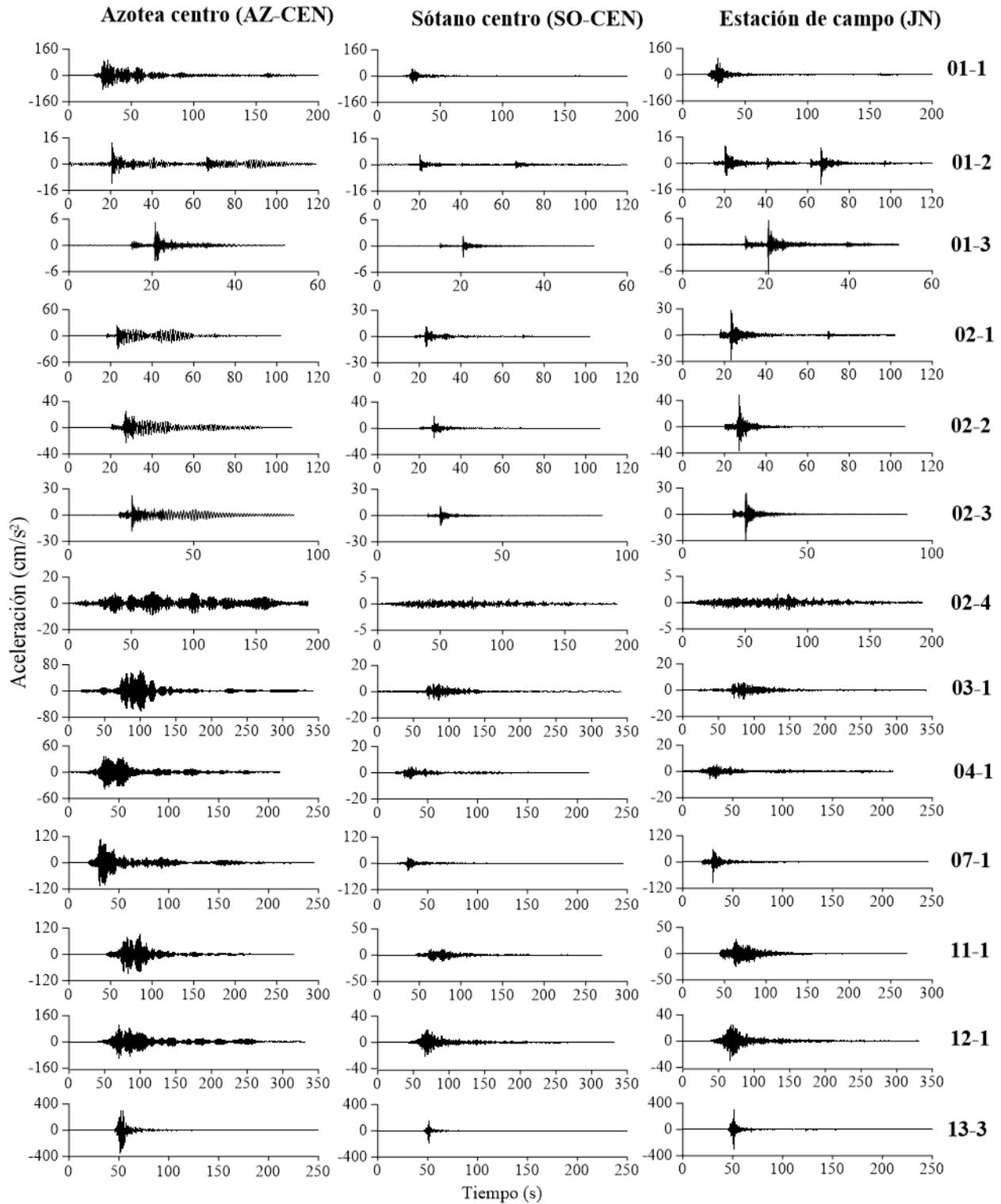


Figura 7. Historia de aceleraciones de los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en la dirección T del evento 01-1 al 13-3

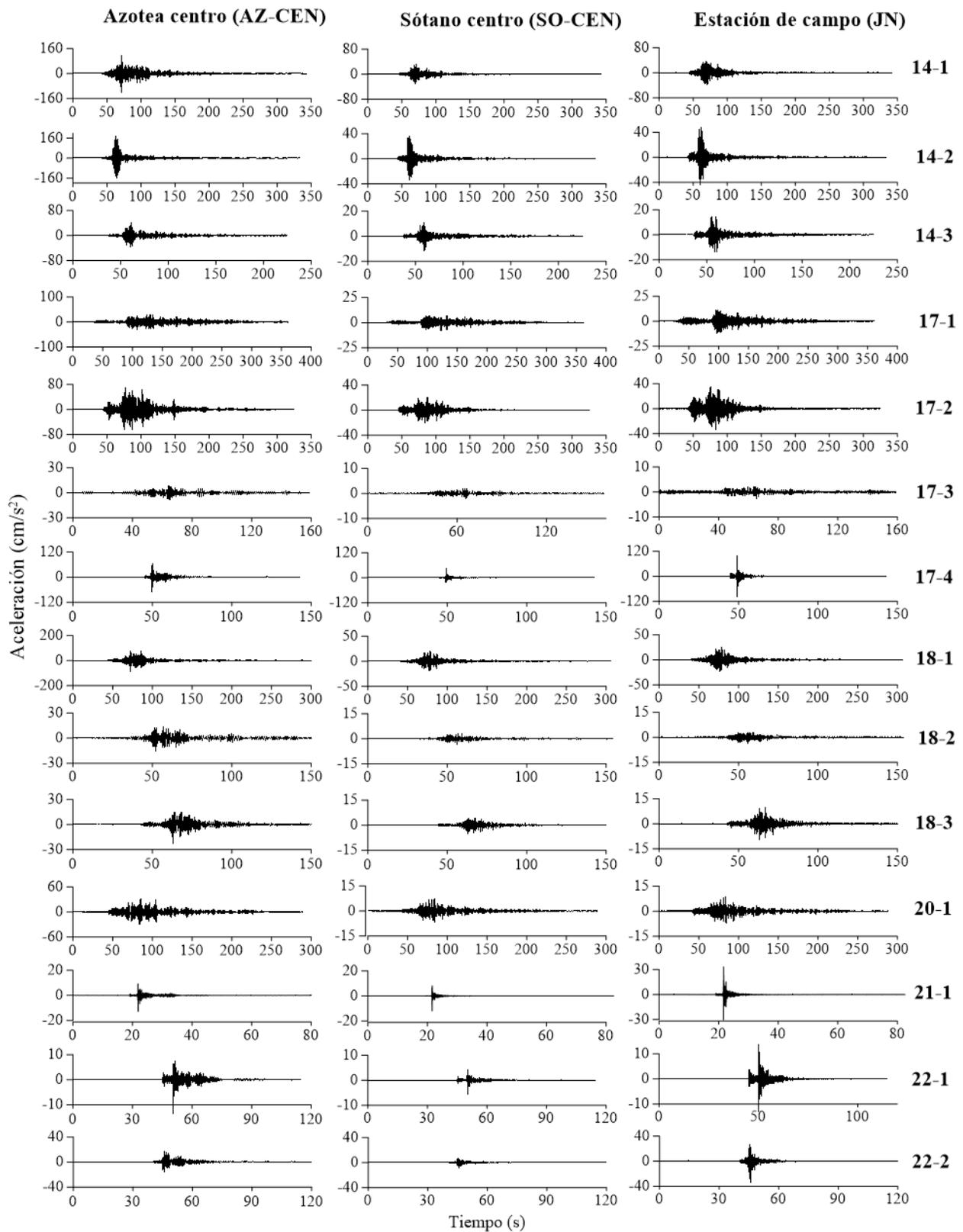


Figura 8. Historia de aceleraciones de los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en la dirección T del evento 14-1 al 22-2

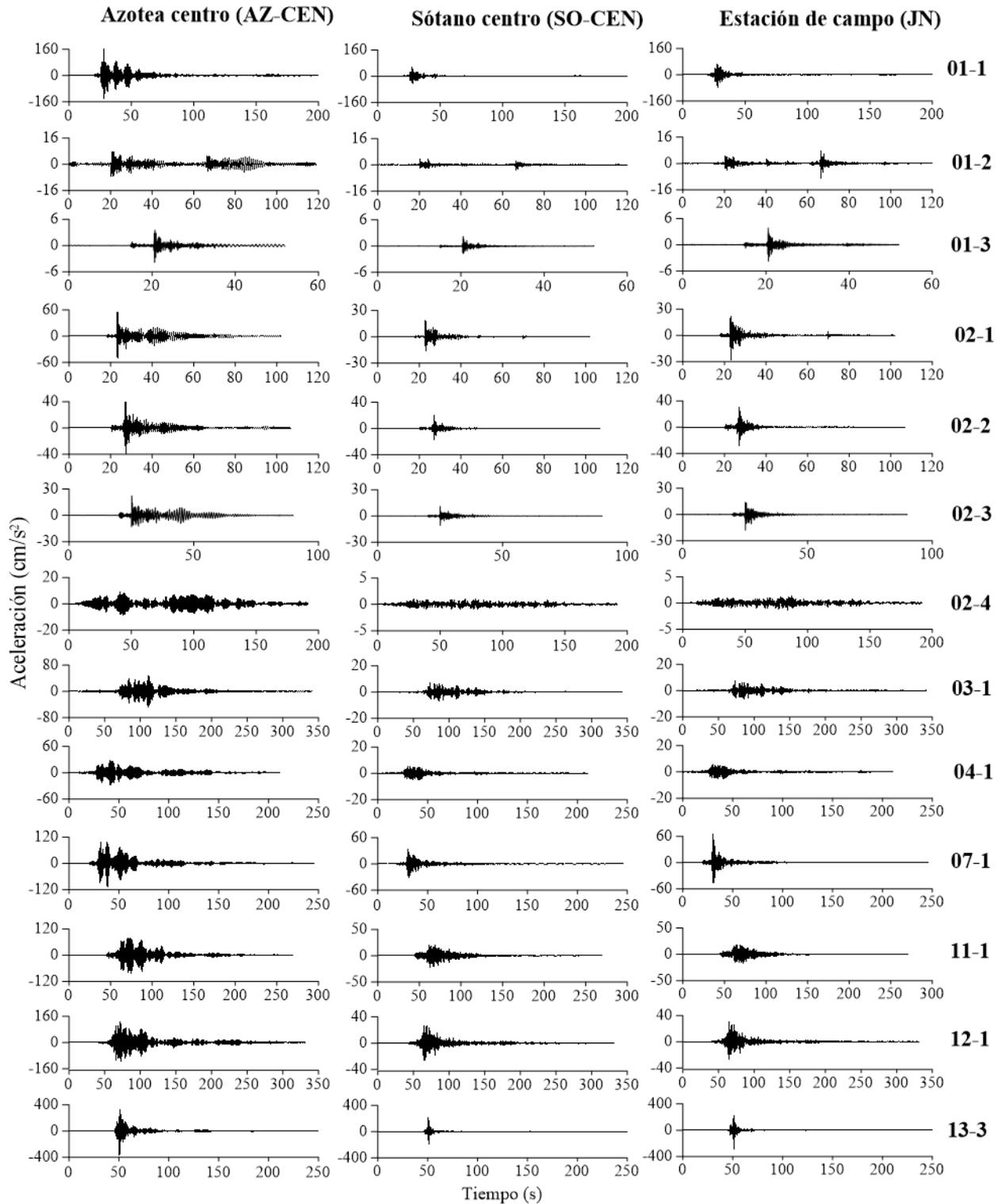


Figura 9. Historia de aceleraciones de los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en la dirección L del evento 01-1 al 13-3

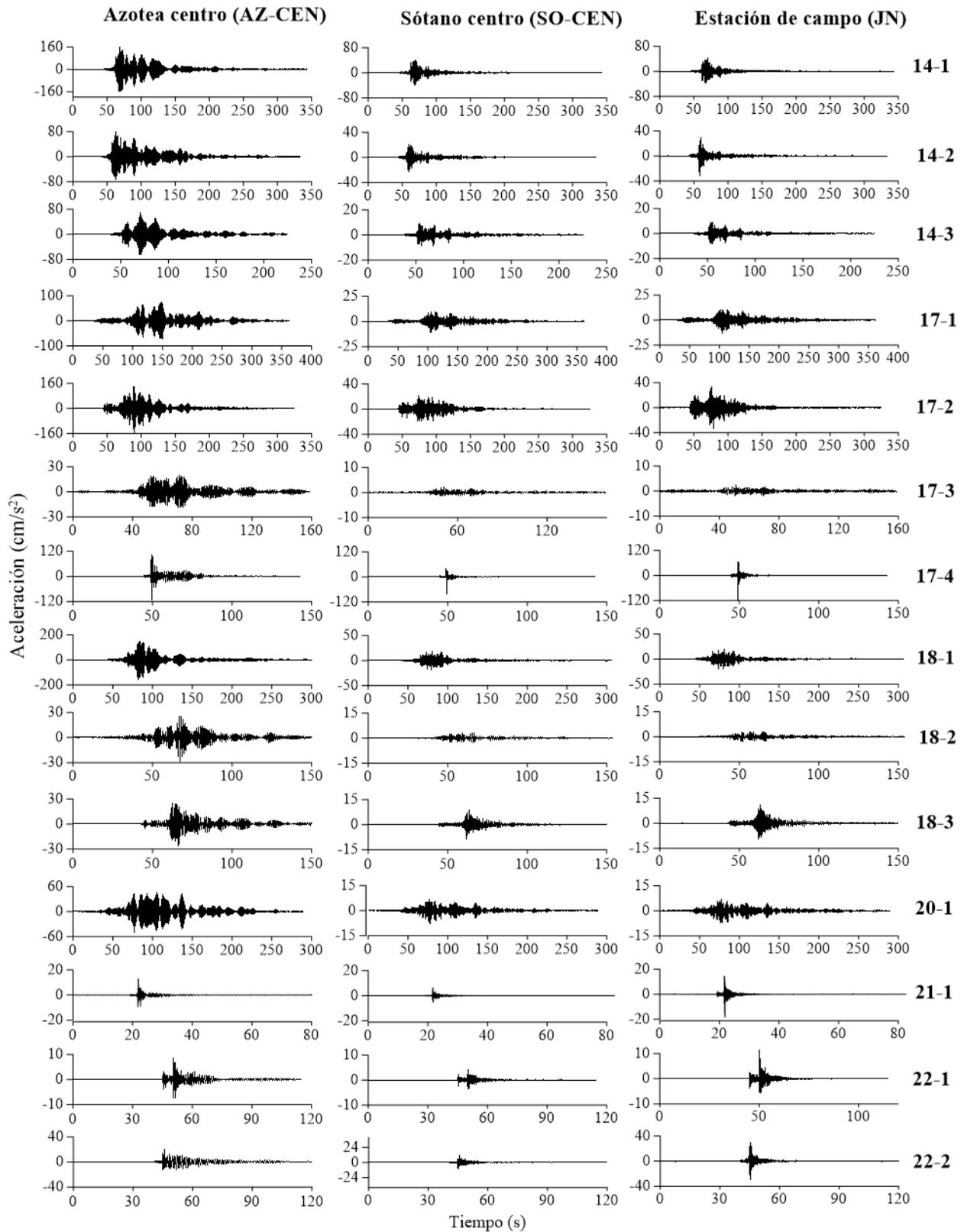


Figura 10. Historia de aceleraciones de los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en la dirección L del evento 14-1 al 22-2

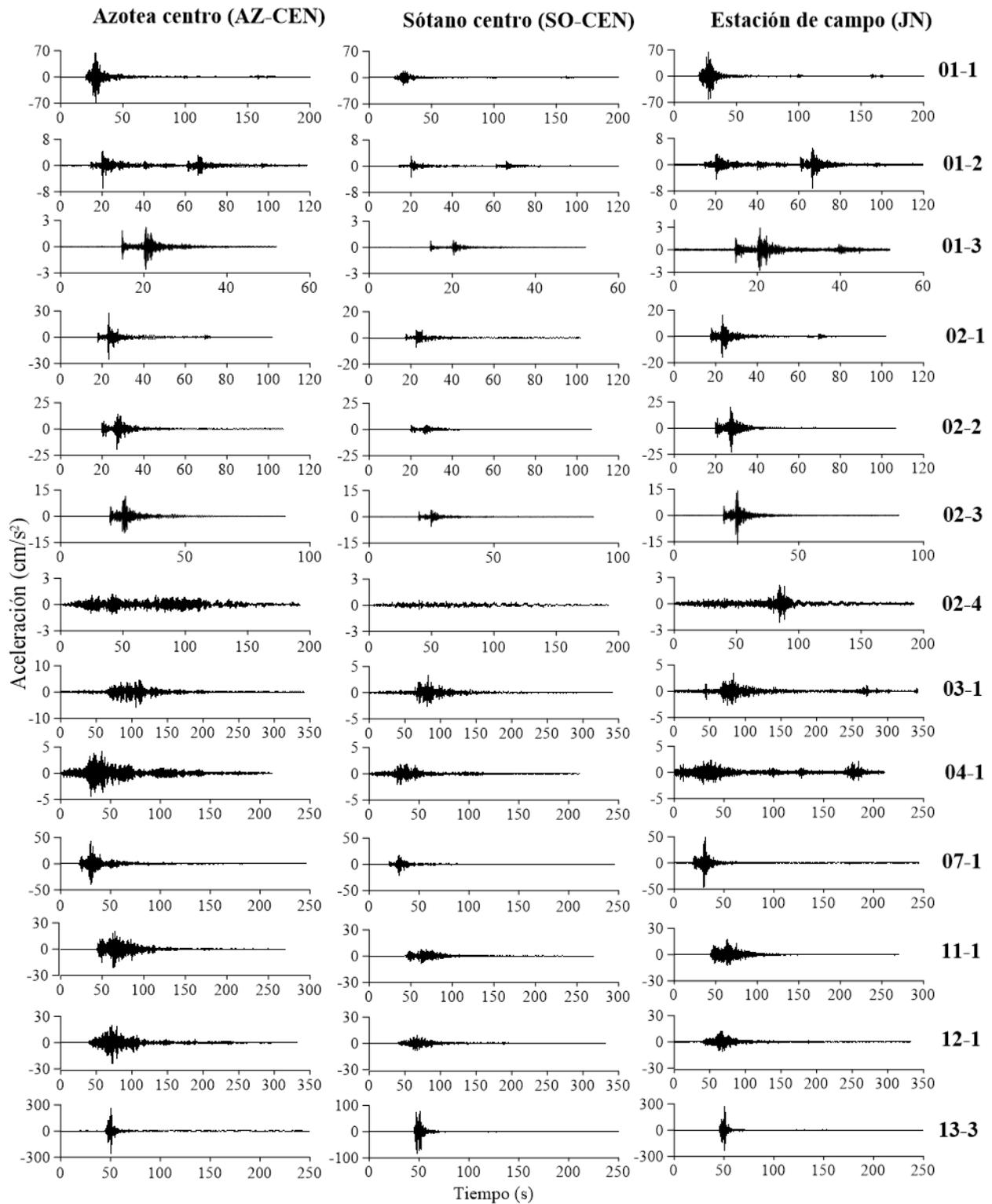


Figura 11. Historia de aceleraciones de los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en la dirección V del evento 01-1 al 13-3

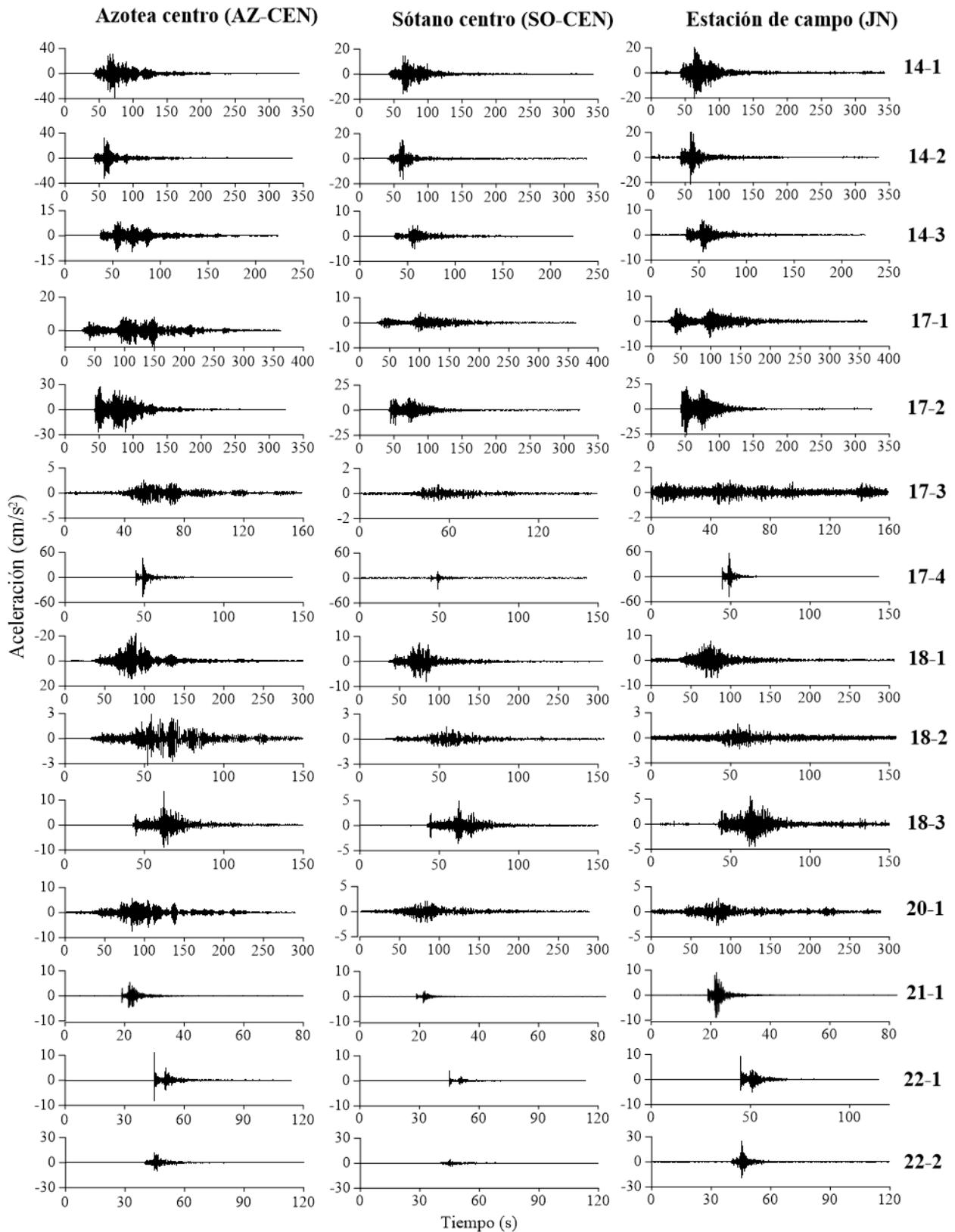


Figura 12. Historia de aceleraciones de los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en la dirección V del evento 14-1 al 22-2

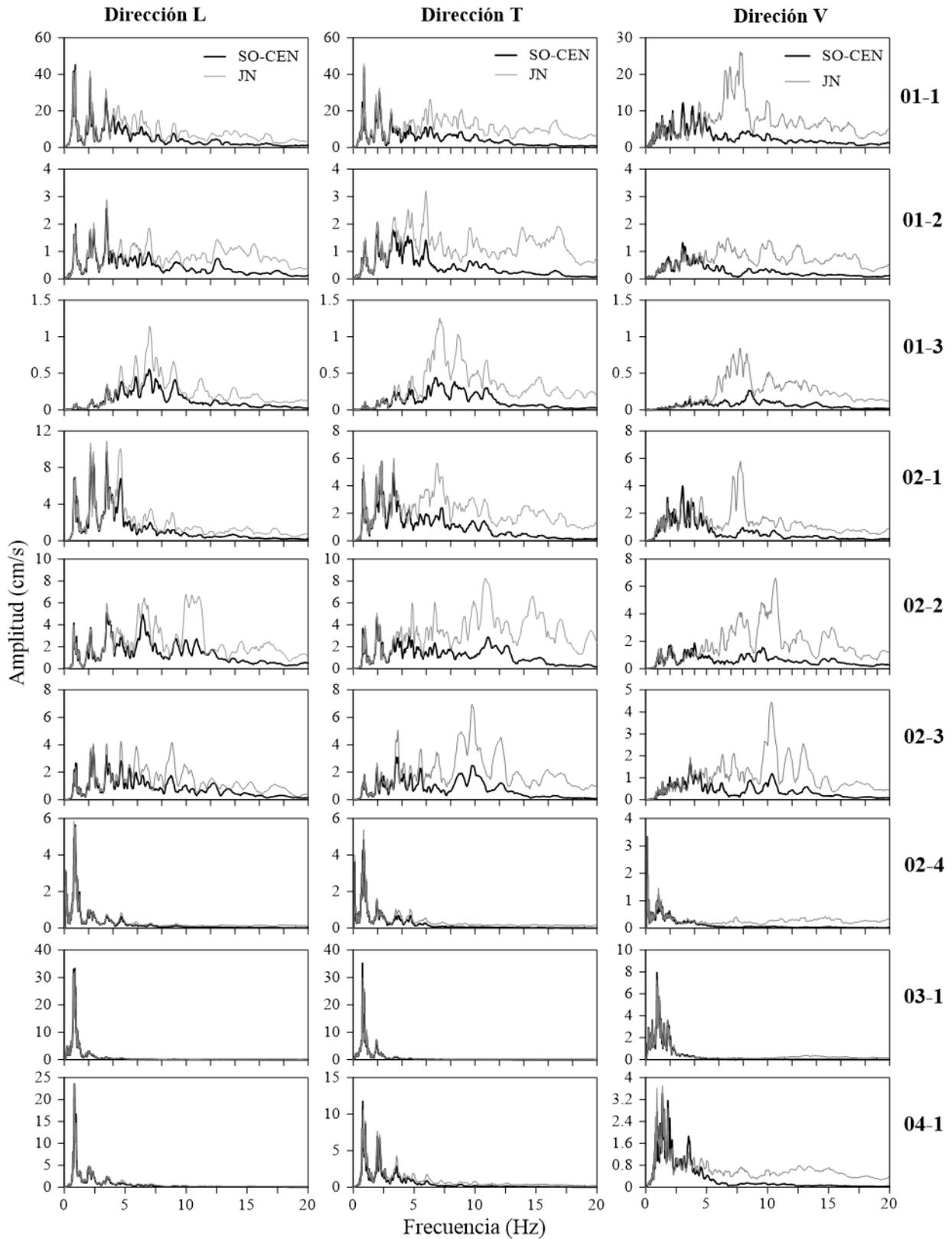


Figura 13. Espectros de Fourier de las aceleraciones registrada en el sótano centro (SO-CEN) y en la estación de campo (JN) del evento 01-1 al 04-1

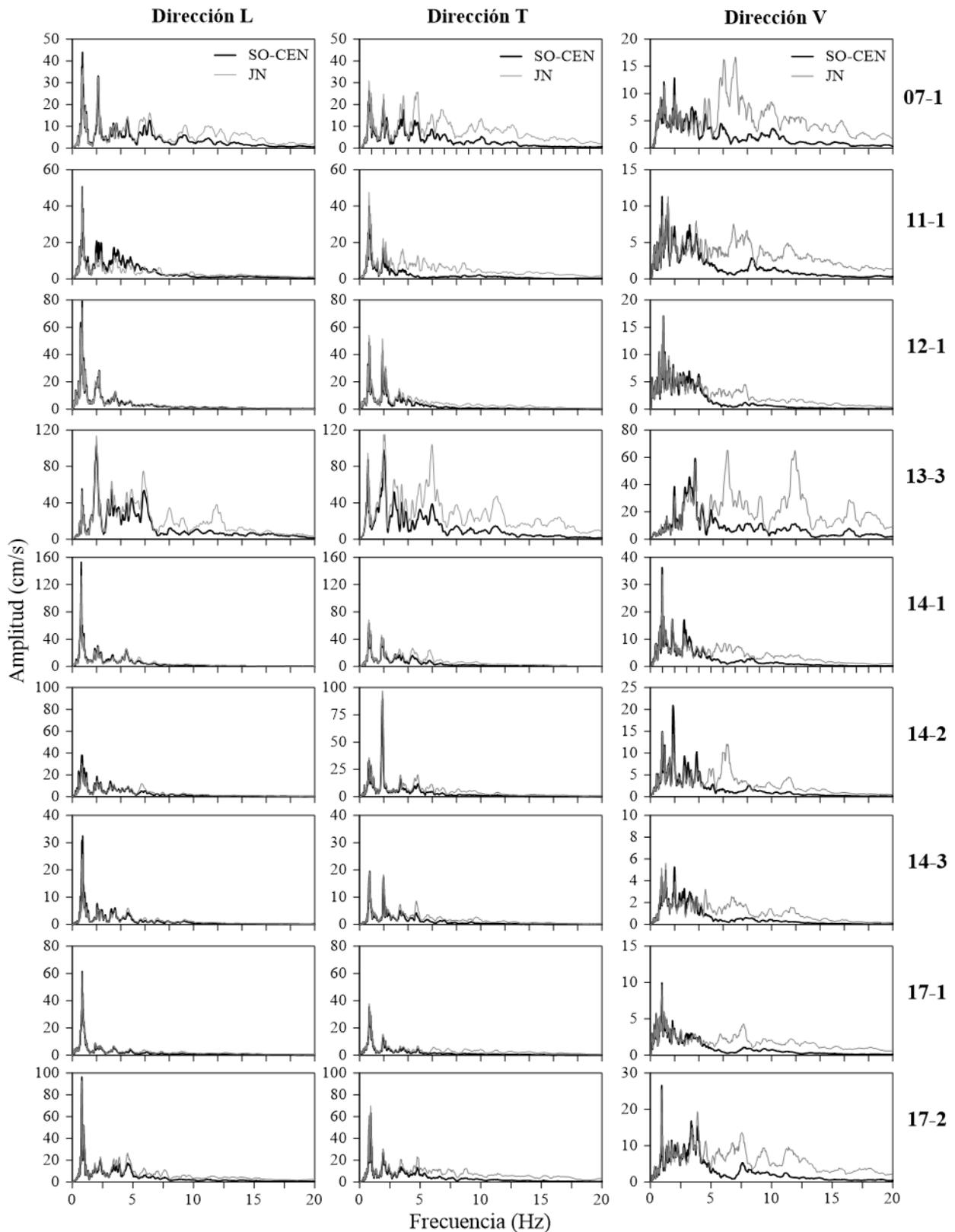


Figura 14. Espectros de Fourier de las aceleraciones registrada en el sótano centro (SO-CEN) y en la estación de campo (JN) del evento 07-1 al 17-2

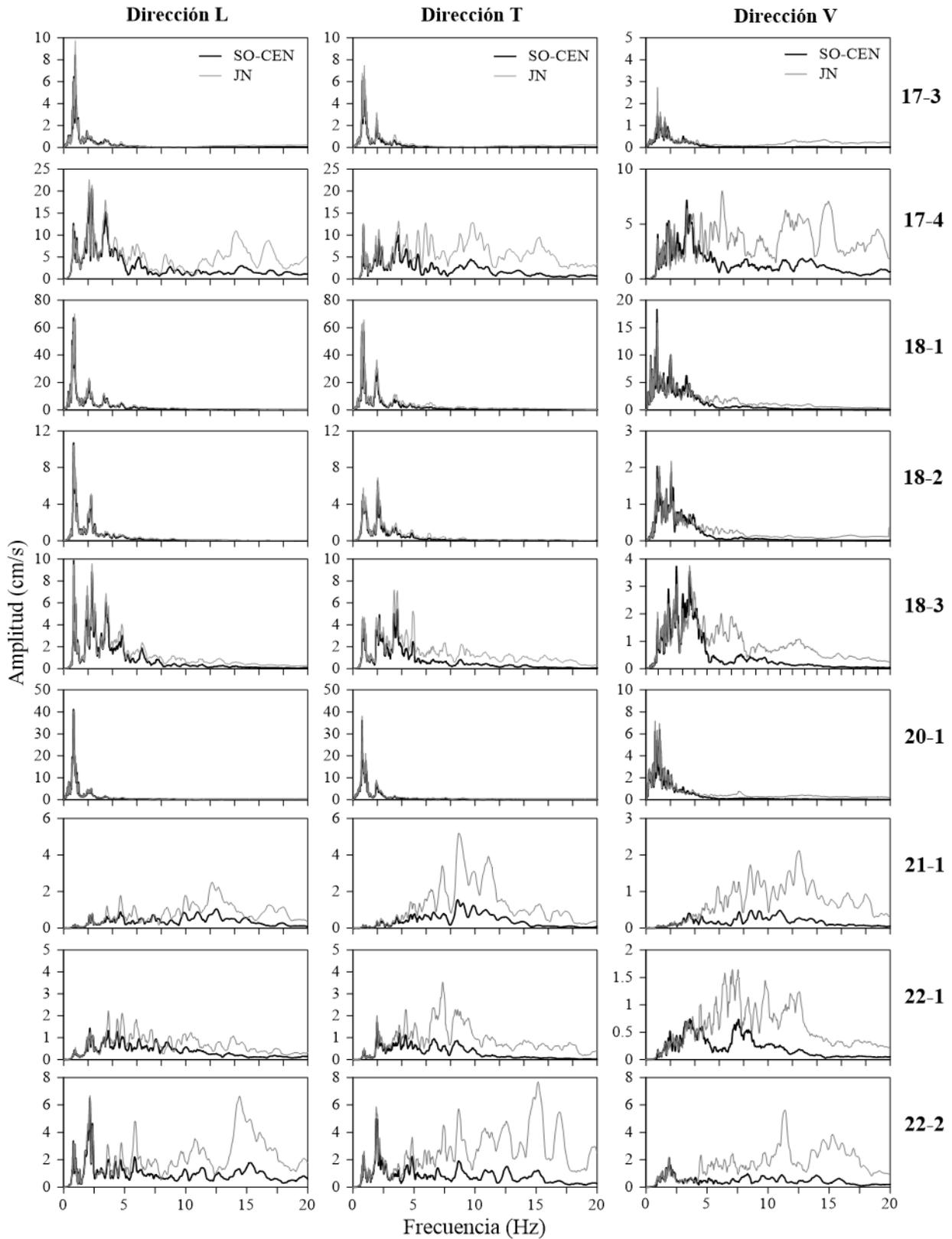


Figura 15. Espectros de Fourier de las aceleraciones registrada en el sótano centro (SO-CEN) y en la estación de campo (JN) de evento 17-3 al 22-2

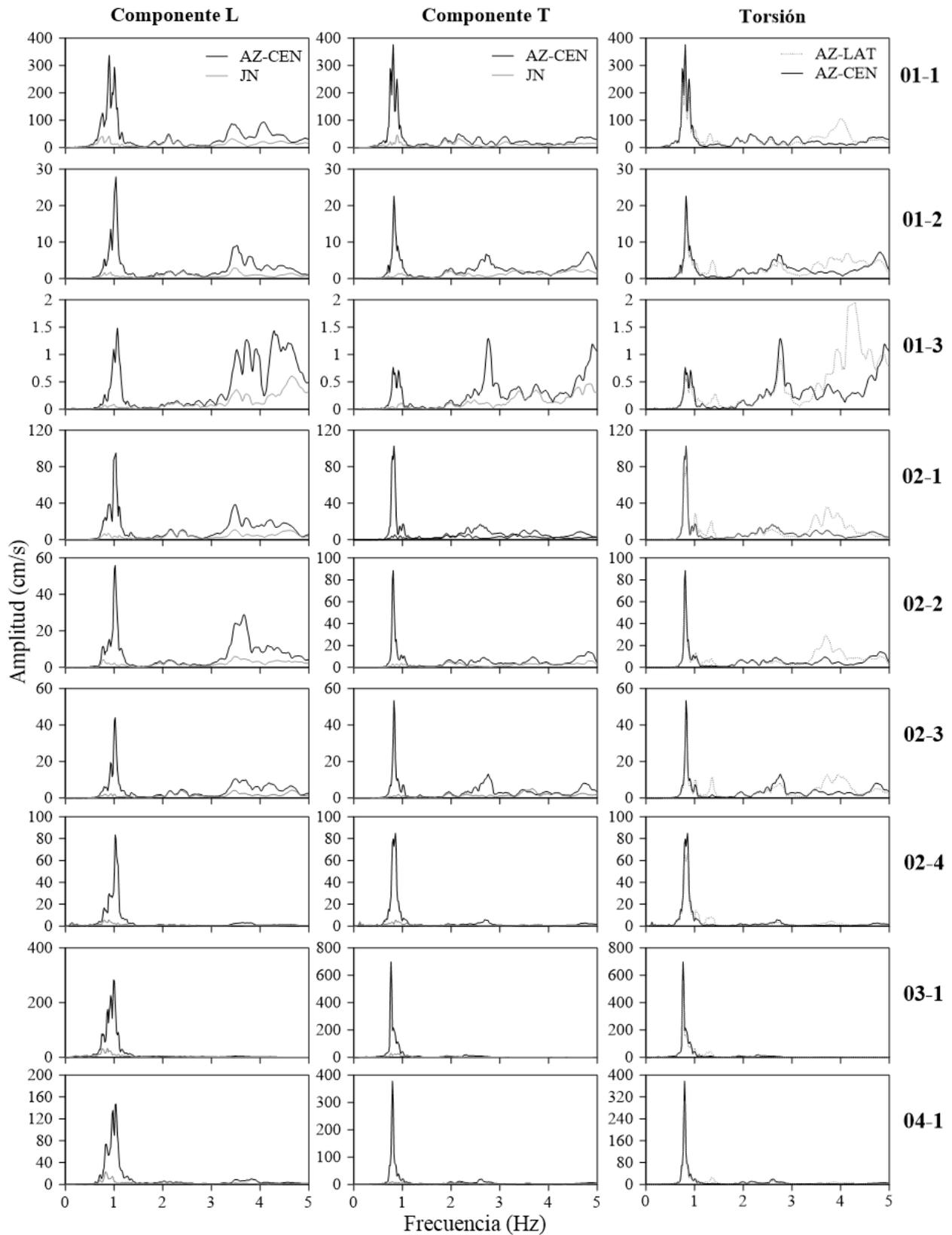


Figura 16. Espectros de Fourier de las aceleraciones registrada en la azotea centro (SO-CEN), azotea lateral (AZ-LAT) y en la estación de campo (JN) de evento 01-1 al 04-1

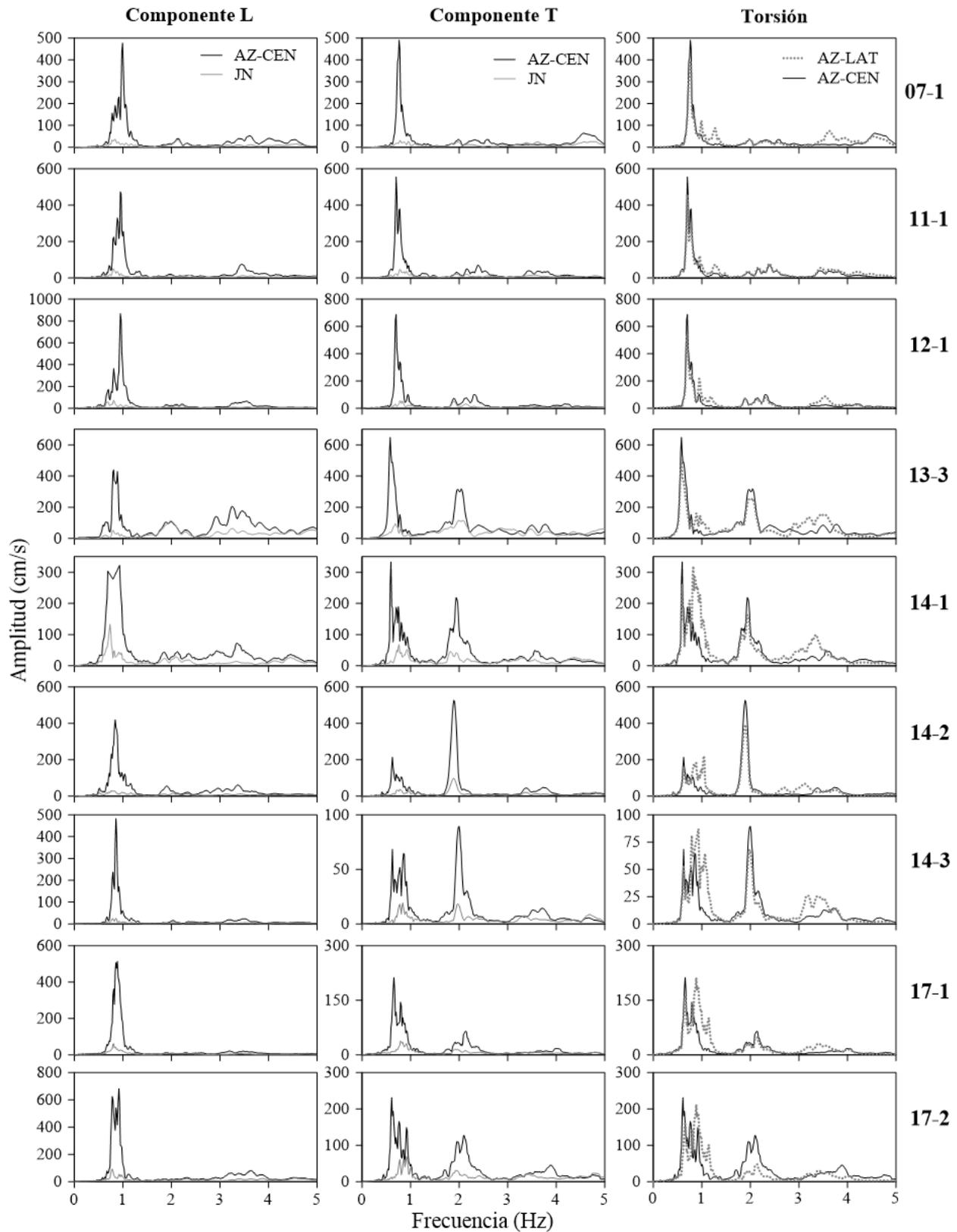


Figura 17. Espectros de Fourier de las aceleraciones registrada en la azotea centro (SO-CEN), azotea lateral (AZ-LAT) y en la estación de campo (JN) del evento 07-1 al 17-1

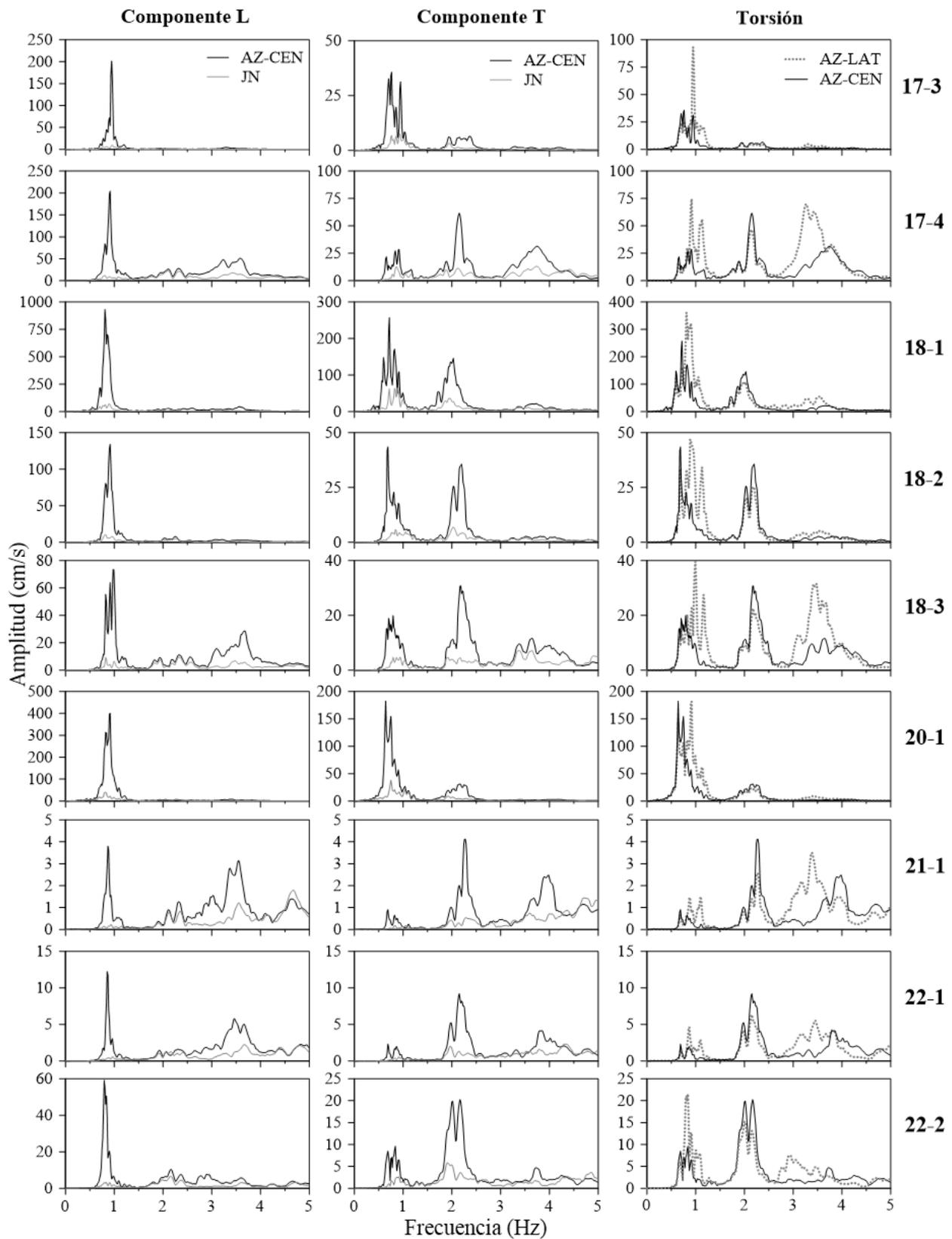


Figura 18. Espectros de Fourier de las aceleraciones registrada en la azotea centro (SO-CEN), azotea lateral (AZ-LAT) y en la estación de campo (JN) del evento 17-3 al 22-2

Capítulo 2. Frecuencias fundamentales del sistema suelo-estructura

Para obtener los efectos de ISE es indispensable estimar las frecuencias del sistema suelo-estructura en los componentes L, T y en torsión del edificio.

En este capítulo se describen brevemente los métodos para identificar las frecuencias del sistema. Uno de ellos es el método de análisis espectral convencional (Bendat y Piersol, 1989), que lo identificamos como el método AE, y cuyos resultados son calculados por el autor. Además del método AE, se abordan dos métodos alternos que emplearon otros autores, estos son el método de minimización modal MM que utilizó Taborda (2003), y el método de N4SID que ha sido empleado en el análisis de otras estructuras, incluida ésta (García-Illescas *et al.*, 2023; Murià-Vila *et al.*, 2021, Murià-Vila *et al.*, 2020a; Murià-Vila *et al.*, 2020b).

La identificación de la frecuencia del sistema ($\bar{f}_{1_{AE}}$) con el método AE consiste en calcular las funciones de transferencia (FT) entre los espectros de Fourier de los registros de la azotea y la estación de campo del edificio. En general, el valor de la frecuencia del sistema está asociado a la máxima amplificación identificada en la FT.

La identificación de las frecuencias del sistema en los componentes L y T, parten de las FT entre los espectros de Fourier del registro generado en el centro de la azotea AZ-CEN (figura 5) y del registro de la estación de campo JN, así la FT se traduce como AZ-CEN/JN.

La frecuencia fundamental de torsión se obtiene con la FT entre los espectros de Fourier de los registros generados en el costado norte de la azotea AZ-LAT del componente T y en el centro de la azotea AZ-CEN del componente T (figura 5), por lo que la FT está dada como AZ-LAT/AZ-CEN.

El método de MM es propuesto por Beck y Jennings (1980) e implementado por Li y Mau (1990) en un programa de cómputo. Taborda (2003) estimó las frecuencias del sistema con el método de MM ($\bar{f}_{1_{MM}}$) de los componentes L, T y torsión del edificio SIS. La estimación de las frecuencias es mediante segmentos de los registros, que tienen una duración de 20 s y con un traslape de 10 s entre ventanas consecutivas, a partir de los registros sísmicos de los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1. Además, se estimaron las frecuencias de la estructura ($f_{1_{MM}}$) de los eventos 01-1, 02-1 y 02-2.

El método de N4SID (*Numerical algorithm for Subspace State Space System Identification*) es una técnica de identificación por subespacios para sistemas lineales invariables en el tiempo (Van Overschee y De Moor, 1994; Oku y Kimura, 1999; Peters y Ventura, 2003). La identificación de las frecuencias del sistema del edificio SIS es parte del trabajo de García-Illescas *et al.*, (2023), en el cual se han logrado obtener las frecuencias en los componentes L, T y torsión del edificio con base en los registros de los eventos sísmicos seleccionados (tabla 2), la estimación de las frecuencias con el método N4SID ($\bar{f}_{1_{N4SID}}$) se obtiene con una resolución de un segundo.

Los valores de las frecuencias obtenidas con el método N4SID y el método AE en los componentes L, T y torsión, se comparan durante la fase intensa y la fase final de los registros sísmicos de cada evento seleccionado (tabla 2), con el fin de conocer la proximidad que hay entre estos dos métodos. Después se comparan las frecuencias del sistema obtenidos con los métodos N4SID y MM por ventanas de los eventos 01-1, 02-1, 02-1 y 03-1.

Además, se analizan las frecuencias del sistema N4SID por ventanas calculadas con el evento 13-3, que es el más intenso registrado en el edificio SIS, con el fin de conocer la variación de las frecuencias del sistema en las fases inicial, intensa y final, en los componentes L, T y torsión.

2.1 Frecuencias del sistema del método AE y N4SID en la fase intensa

Los valores de la frecuencia del sistema que se identifican con el método AE ($\bar{f}_{1_{AE}}$) es a partir de las FT con los espectros de Fourier de los registros completos de un sismo dado. En el apéndice A sección A.1 se presentan las curvas de las FT para la identificación de la frecuencia en los componentes L, T y torsión. El valor de la frecuencia obtenido con este procedimiento coincide con la fase intensa, debido a que las aceleraciones y movimientos de esta fase predomina sobre las fases inicial y final.

Los valores de las frecuencias del sistema de los componentes L, T y torsión identificadas con el método AE se presentan en la tabla 3.

Por otro lado, García-Illescas *et al.*, (2023) determina las frecuencias del sistema con método N4SID ($\bar{f}_{1_{N4SID}}$) a partir de los registros sísmicos (tabla 2), obteniendo valores a cada segundo transcurrido en un evento dado. La frecuencia $\bar{f}_{1_{N4SID}}$ de la fase intensa, se obtiene con el promedio de hasta 5 valores consecutivos identificados en esta fase, que corresponden a los mínimos valores y cuyo coeficiente de variación (CV) es menor de 2 %. Esto permite identificar y eliminar valores mínimos de frecuencias que no corresponden al sistema, valores espurios.

En la figura 19 se comparan los valores de las frecuencias $\bar{f}_{1_{AE}}$ y $\bar{f}_{1_{N4SID}}$ durante las fases intensas de los eventos sísmicos (tabla 2), que están contenidos en la tabla 3, con el fin de mostrar la proximidad entre ambos métodos. Los puntos sólidos son los valores $\bar{f}_{1_{N4SID}}$ y las cruces corresponden a las frecuencias $\bar{f}_{1_{AE}}$.

En los eventos mostrados, los valores de las frecuencias $\bar{f}_{1_{AE}}$ y $\bar{f}_{1_{N4SID}}$ de la tabla 3 difieren en promedio en 1.4 y 1.1 % en los componentes L y T, respectivamente. En torsión, la diferencia entre las frecuencias $\bar{f}_{1_{t_{N4SID}}}$ y $\bar{f}_{1_{t_{AE}}}$ en promedio es de 2.0 %.

Para conocer el cambio de la frecuencia del sistema durante cierto evento, se toman de referencia los valores obtenidos en el evento 01-3, ya que, en este evento es de pequeña intensidad, y en el instante en el que ocurre este evento, el edificio no presentaba daño alguno.

Entre los eventos 01-1 y 07-1, de baja intensidad, las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} y \bar{f}_{1_AE} tienen poca variación entre eventos, los valores de las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} en los componentes L, T y en torsión en promedio son de 1.02, 0.81 y 1.33 Hz, respectivamente, con las desviaciones estándar (DE) de 0.03, 0.30 y 0.06 Hz, y los coeficientes de variación (CV) son 3.0, 3.7 y 4.5 %, respectivamente a los componentes L, T y torsión.

En el evento 13-3, de moderada intensidad, se tienen las reducciones de las frecuencias en los componentes L, T y en torsión, las cuales son las mayores detectadas hasta la fecha. Los valores de las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} en el evento 13-3 son de 0.85, 0.58 y 1.03 Hz en los componentes L, T y en torsión, respectivamente, lo que implica reducciones de 21.5, 32.9 y 30.3 % con respecto al evento 01-3. Estas reducciones coinciden con las obtenidas con las frecuencias \bar{f}_{1_AE} , que son de, 20.8, 31.1 y 31.3 %, en los componentes L, T y en torsión, respectivamente.

Tabla 3. Comparación de las frecuencias fundamentales del sistema en Hz, estimadas con los métodos AE y N4SID (García-Illescas, 2023) en la fase intensa

Evento	Componente L		Componente T		Torsión	
	\bar{f}_{1_AE}	\bar{f}_{1_N4SID}	\bar{f}_{1_AE}	\bar{f}_{1_N4SID}	\bar{f}_{1_AE}	\bar{f}_{1_N4SID}
01-1	0.989	0.989	0.784	0.790	1.303	1.291
01-2	1.038	1.031	0.818	0.822	1.373	1.367
01-3 ⁽¹⁾	1.074	1.074	0.842	0.859	1.440	1.440
02-1	1.019	1.018	0.806	0.805	1.349	1.325
02-2	1.038	1.027	0.824	0.814	1.361	1.329
02-3	1.050	1.037	0.824	0.825	1.361	1.357
02-4	1.044	1.040	0.827	0.820	1.337	1.312
03-1	0.993	0.993	0.781	0.773	1.329	1.285
04-1	1.056	1.049	0.793	0.797	1.370	1.345
07-1	1.007	0.979	0.751	0.750	1.254	1.257
11-1	0.946	0.959	0.723	0.713	1.263	1.247
12-1	0.961	0.944	0.716	0.701	1.221	1.203
13-3	0.870	0.848	0.580	0.576	0.989	1.026
14-1	0.853	0.840	0.595	0.598	1.019	1.049
14-2	0.876	0.854	0.620	0.603	1.024	1.025
14-3	0.888	0.856	0.647	0.621	1.056	1.084
17-1	0.896	0.884	0.645	0.646	1.151	1.105
17-2	0.885	0.862	0.626	0.621	1.102	1.080
17-3	0.922	0.917	0.677	0.674	1.123	1.142
17-4	0.916	0.895	0.659	0.651	1.129	1.131
18-1	0.845	0.835	0.610	0.616	1.102	1.043
18-2	0.909	0.888	0.671	0.671	1.135	1.127
18-3	0.958	0.932	0.668	0.674	1.144	1.162
20-1	0.891	0.893	0.638	0.640	1.151	1.115
21-1 ⁽²⁾	0.842	0.838	0.659	n.d.	1.111	1.111
22-1	0.854	0.853	0.659	0.691	1.099	1.085
22-2	0.812	0.803	0.653	0.656	1.062	1.035

⁽¹⁾Evento de referencia para la evaluación del estado físico del edificio.

⁽²⁾Réplica del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 de M 7.1, que no se registró en la red acelerográfica del edificio.

n.d.-Dato no disponible porque hay problemas con los registros

Entre el evento 14-1 al 18-3 hay una recuperación parcial de los valores de las frecuencias del sistema \bar{f}_{1_N4SID} . En el evento 17-4 las recuperaciones con respecto al evento 13-3 son de 7.8, 11.4 y 9.2 % para los componentes L, T y torsión, respectivamente. En el evento 18-3, las reducciones con respecto al evento 01-3 son de 13.7, 21.5 y 21.0 % en los componentes L, T y torsión, respectivamente. Las recuperaciones de las frecuencias del sistema se pueden entender en parte por las reparaciones que los agrietamientos en los muros y por las variaciones en la intensidad del evento sísmico (Murià-Vila *et al.*, 2020).

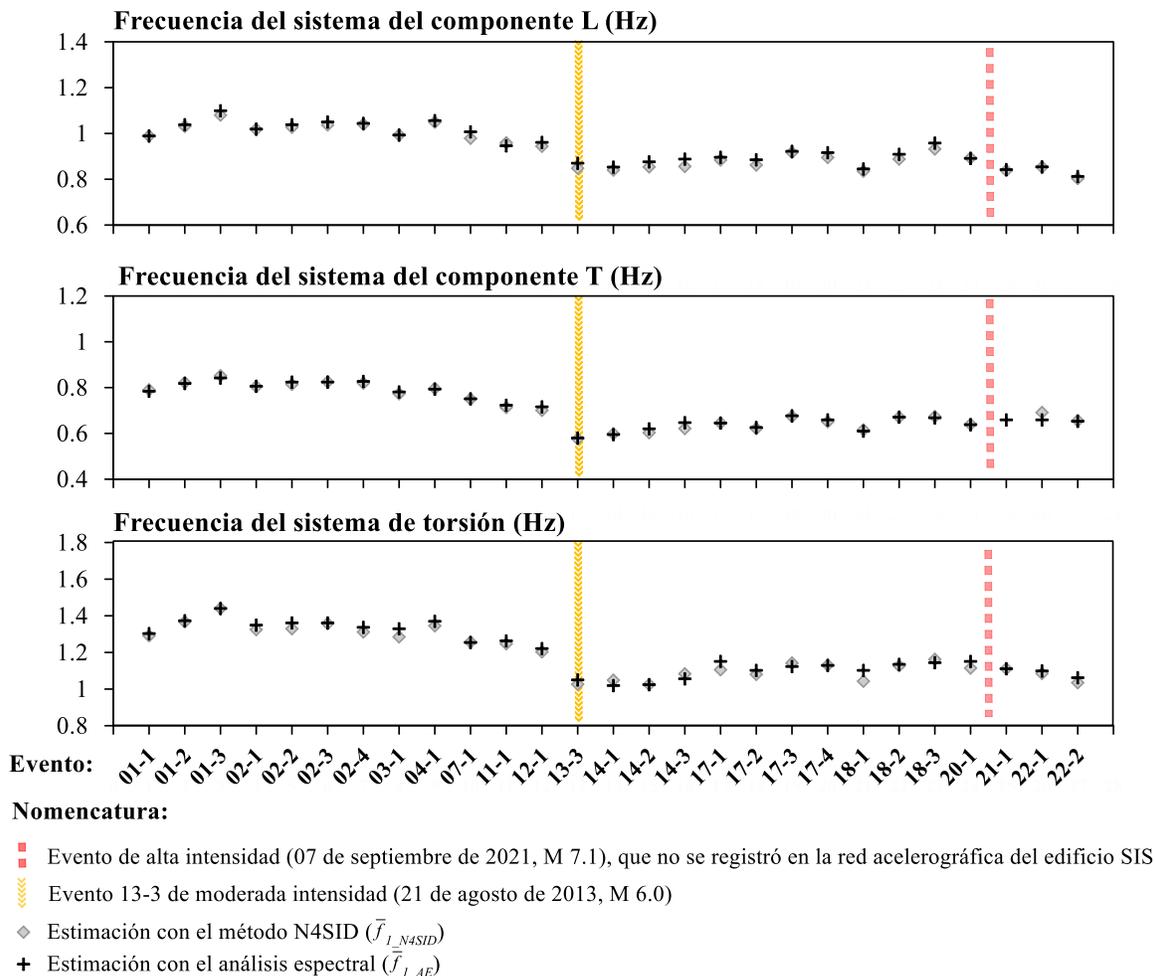


Figura 19. Frecuencias del sistema estimadas con los métodos AE y N4SID (García-Illescas, 2023) en los componentes L, T y en torsión en la fase intensa

La segunda reducción más relevante se refleja en el evento 21-1, que es después de la ocurrencia del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021, evento que no se capturó en la red del edificio SIS. Con el método N4SID no se logró la estimación de la frecuencia en la fase intensa en los componentes T y torsión del evento 21-1 y con el método AE se obtienen los valores de 0.84, 0.66 y 1.12 Hz en los componentes L, T y torsión son, respectivamente, que son menores en 23.4, 21.7 y 22.8 % con respecto al evento 01-3.

En el último evento 22-2, los valores de las frecuencias $\bar{f}_{1,N4SID}$ de los componentes L, T y torsión (0.80, 0.65 y 1.04 Hz, respectivamente) son menores en 25.6, 23.6 y 28.1 % con respecto al evento 01-3, reducciones que se asemejan a las reducciones obtenidas con las frecuencias $\bar{f}_{1,AE}$ (0.81, 0.65 y 1.04 Hz, respectivamente), que son de 26.1, 22.4, 26.3 %, en los componentes L, T y en torsión.

2.2 Frecuencias del sistema de los métodos AE y N4SID en la fase final

Los valores de la frecuencia del sistema en la fase final están asociadas a bajas amplitudes de aceleración, que son equiparables en cada sismo registrado. En la fase final se obtienen valores que describen un cambio físico del edificio en términos de frecuencias, después haber estado sometido a las máximas aceleraciones de un sismo dado.

Los valores de las frecuencias de la fase final con el método AE, estimados a partir de las funciones de transferencia anteriormente mencionadas, se obtienen entre los puntos AZ-CEN/JN para la identificación de las frecuencias en los componentes L y T, y entre los puntos AZ-LAT/AZ-CEN para la identificación de las frecuencias de torsión. En el Apéndice A se presentan las FT que se emplearon para la identificación de los valores de las frecuencias fundamentales.

El cálculo de la frecuencia se realiza con segmentos de los registros con una duración de 20 s, y traslapes de 10 s entre ventanas consecutivas, es decir se hace un análisis por ventanas de los registros, implementando el cálculo espectral que está descrito en el Apéndice A. El valor de la frecuencia del sistema en la fase final de un evento dado se obtiene con el promedio de la últimas una a dos ventanas.

Las frecuencias con el método N4SID corresponden a los valores que se estiman en la fase final de un evento dado. Debido a que se tienen valores a cada segundo, se estima un promedio tomando en cuenta alrededor de 10 valores consecutivos, caracterizados por tener una baja variación ($CV < 2\%$).

En la tabla 4 se presentan los valores de las frecuencias en los componentes L, T y torsión en la fase final de cada sismo, estimados con los métodos AE y N4SID. Las diferencias entre las frecuencias $\bar{f}_{1,AE}$ y $\bar{f}_{1,N4SID}$ son menores de 2.0 % en los eventos mostrados.

En la figura 20 se muestran las frecuencias en los componentes L, T y torsión, obtenidos en las fases finales de los eventos sísmicos a partir de los métodos N4SID y AE.

Análisis de las frecuencias del sistema en el componente L

El valor de la frecuencia del sistema $\bar{f}_{1,N4SID}$ del evento 13-3 se recupera parcialmente, pasando de 0.85 en la fase intensa a 0.94 Hz en la fase final, con una reducción de 12.3 % con respecto al evento 01-3.

Entre los eventos 14-1 al 20-1 la frecuencia $\bar{f}_{1,N4SID}$ en el componente L en promedio es de 0.94 Hz, ($DE = 0.01$ Hz, un $CV = 1.5\%$). Del evento 20-1 al 21-1, la frecuencia se reduce de 0.94 a 0.86 Hz, teniendo a una reducción 20.0 % con respecto al evento 01-3, y en los eventos sucesivos al 21-1 no hay una recuperación de la frecuencia en este componente, sino la reducción permanece similar en los eventos 22-1 y 22-2.

En el último evento 22-2, el valor de la frecuencia es de 0.83 Hz, con una reducción de 23.2 % con respecto al evento 01-3.

Es evidente que la reducción de la frecuencia en el componente L es ocasionada principalmente por la ocurrencia de los eventos 13-3 y por el sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 que no fue registrado.

Tabla 4. Comparación de las frecuencias fundamentales del sistema en Hz, estimadas con los métodos AE y N4SID (García-Illescas, 2023) en la fase final

Evento	Componente L		Componente T		Torsión	
	$\bar{f}_{1, AE}$	$\bar{f}_{1, N4SID}$	$\bar{f}_{1, AE}$	$\bar{f}_{1, N4SID}$	$\bar{f}_{1, AE}$	$\bar{f}_{1, N4SID}$
01-1	1.050	1.028	0.838	0.811	1.383	1.367
01-2	1.062	1.034	0.806	0.822	1.392	1.369
01-3 ⁽¹⁾	1.099	1.074	0.806	0.856	1.465	1.460
02-1	1.025	1.024	0.818	0.810	1.404	1.332
02-2	1.062	1.042	0.818	0.823	1.404	1.340
02-3	1.058	1.044	0.838	0.826	1.367	1.356
02-4	1.050	1.070	0.818	0.823	1.343	1.395
03-1	1.038	1.040	0.810	0.804	1.322	1.344
04-1	1.074	1.070	0.842	0.823	1.392	1.395
07-1	1.050	1.035	0.793	0.790	1.355	1.340
11-1	1.050	1.026	0.781	0.762	1.306	1.355
12-1	1.034	1.005	0.757	0.737	1.278	1.279
13-3	0.958	0.945	0.653	0.670	1.154	1.147
14-1	0.928	0.934	0.671	0.663	1.117	1.139
14-2	0.947	0.931	0.674	0.664	1.172	1.145
14-3	0.933	0.929	0.669	0.671	1.108	1.142
17-1	0.968	0.947	0.684	0.685	1.188	1.196
17-2	0.977	0.954	0.677	0.688	1.239	1.223
17-3	0.952	0.941	0.675	0.696	1.208	1.175
17-4	0.964	0.977	0.667	0.702	1.213	1.167
18-1	0.944	0.924	0.659	0.673	1.172	1.170
18-2	0.940	0.919	0.659	0.681	1.148	1.157
18-3	0.983	0.961	0.696	0.712	1.160	1.197
20-1	0.972	0.952	0.693	0.688	1.230	1.211
21-1 ⁽²⁾	0.854	0.861	0.690	0.692	1.074	1.097
22-1	0.863	0.860	0.671	0.695	1.099	1.104
22-2	0.830	0.835	0.659	0.682	1.066	1.067

⁽¹⁾Evento de referencia para la evaluación del estado físico del edificio.

⁽²⁾Réplica del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 de M 7.1, que no se registró en la red acelerográfica del edificio.

Análisis de las frecuencias del sistema en el componente T

En la fase final del evento 13-3 de moderada intensidad, la frecuencia del sistema es de 0.67 Hz, que es menor en 21.8 % con respecto al evento 01-3.

Posterior al evento 13-3, entre los eventos 14-1 al 14-3 no hay una recuperación de la frecuencia $\bar{f}_{1, N4SID}$ del componente T, entre estos eventos se mantiene 0.66 Hz. Entre los eventos 17-1 a 20-1 la frecuencia en promedio varía en 0.69 Hz (DE= 0.01 Hz, CV= 1.5 %), en el evento 20-1 previo al sismo de alta intensidad de 07 de septiembre de 2021, la reducción de la frecuencia es de 18.4 %, con respecto al evento 01-3.

La reducción de las frecuencias del edificio está relacionada con el daño que se produjo en la ocurrencia del evento 13-3. En la inspección visual (Chávez y Ochoa, 2014) realizada posterior a este evento, se evidenció el agrietamiento de muros de mampostería. El daño más común fue el agrietamiento sobre la interfaz de los muros de mampostería con las traveses y columnas que los confinan. El agrietamiento se identificó en los muros del cubo de escaleras y elevadores, en todos los niveles. En la misma inspección no se detectaron daños visibles en columnas, traveses y muros de concreto, además que no fue posible inspeccionar en el interior de los departamentos, por lo que hay incertidumbre si hubo algún daño adicional en los elementos estructurales y no estructurales.

En el evento 21-1 (después del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021) se esperaba una reducción de la frecuencia en el componente T, pero la frecuencia estimada en este evento es similar a la del evento previo 20-1, es decir la frecuencia se mantiene alrededor de 0.69 Hz en los eventos 21-1, 22-1 y 22-2 posteriores al sismo de alta intensidad.

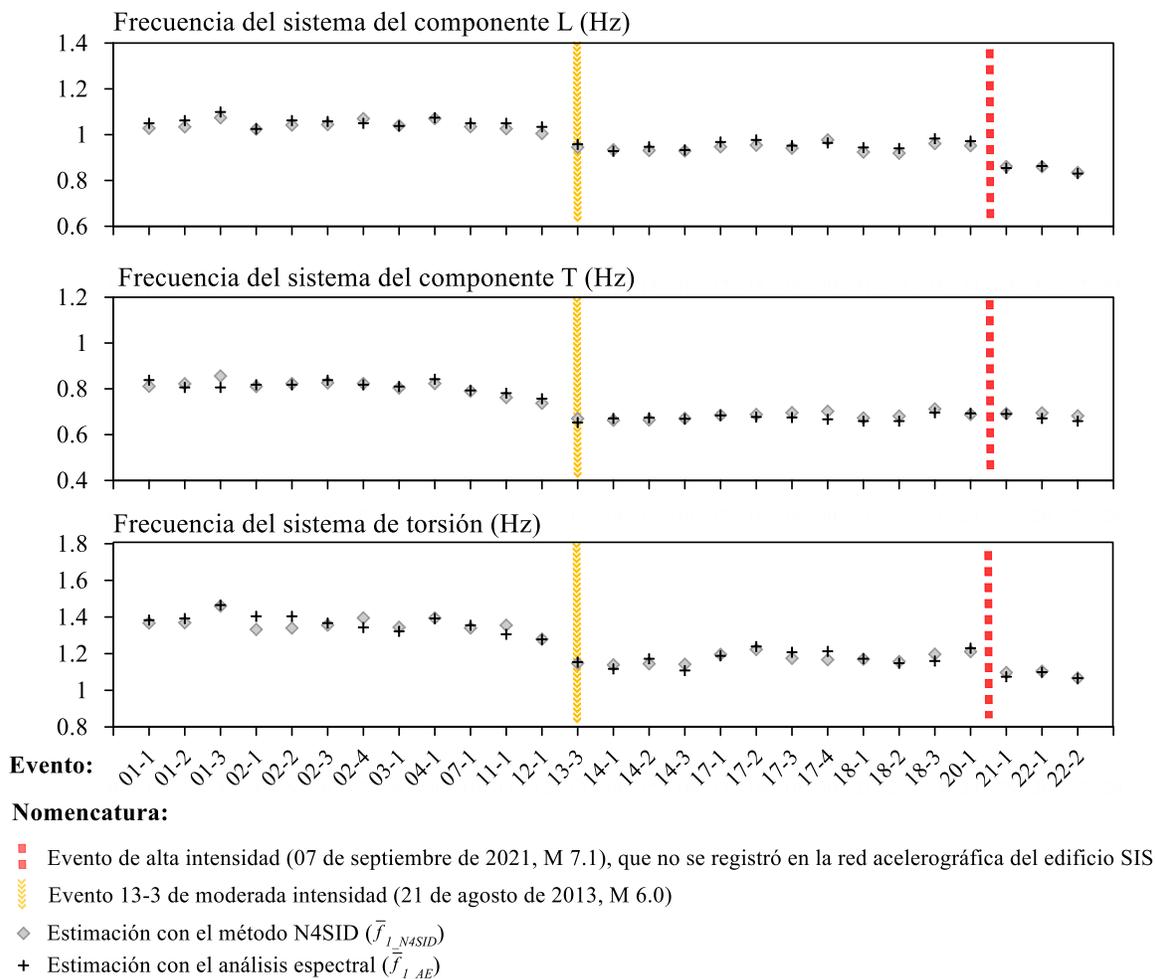


Figura 20. Frecuencias del sistema estimadas con los métodos AE y N4SID (García-Illescas, 2023) en los componentes L, T y en torsión en la fase final

Análisis de las frecuencias del sistema en torsión

Los valores de las frecuencias de torsión \bar{f}_{1t_N4SID} no varían de manera importante entre los eventos 01-1 a 12-1, en promedio es de 1.36 Hz (DE = 0.05 Hz, CV = 3.4 %).

La reducción de la frecuencia en torsión se observa principalmente en la ocurrencia de los eventos 13-3 y del evento de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 que no fue registrado por la red del edificio.

En el evento 13-3, la frecuencia de torsión \bar{f}_{1t_N4SID} en la fase final es de 1.15 Hz, con una reducción de 21.8 % con respecto al evento 01-3.

En el evento 21-1 (después del sismo de alta intensidad) la reducción es de 24.0 %, que es aproximadamente la misma reducción (23.8 %) estimada en la fase intensa de este evento, debido a que se trata de un evento de muy baja intensidad.

En el último evento 22-2, las reducciones de las frecuencias N4SID (con respecto al evento 01-3) en los componentes L, T y torsión son 23.1 %, 19.6 %, y 26.8 %, respectivamente, en comparación con los valores estimados con el método AE, las reducciones son de 23.5, 22.8, 27.2 %, respectivamente a los componentes L, T y torsión, lo que resulta obtener una aproximación adecuada entre ambos métodos.

2.3 Frecuencias del sistema por ventanas

Con el fin de valorar el grado de aproximación que tienen las frecuencias del sistema estimadas con el método de N4SID (García-Illescas *et al.*, 2023), éstas se comparan con las frecuencias obtenidas con el método de MM (Taborda, 2003; Correa, 2005).

Con el método de MM se estimaron las frecuencias del sistema (\bar{f}_{1_MM}) en los componentes L, T, y en torsión, con ventanas de tiempo extraídos de los registros de los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1. Por lo general, las ventanas extraídas tienen una duración de 10 s, dada una ventana, el valor obtenido de la frecuencia \bar{f}_{1_MM} es asociado al instante del tiempo de media ventana.

En la estimación de las frecuencias con el método de N4SID (\bar{f}_{1_N4SID}) se tienen valores a cada segundo en los componentes L, T y en torsión.

En la figura 21 se ilustra la variación de las frecuencias del sistema \bar{f}_{1_MM} y \bar{f}_{1_N4SID} en los componentes L, T y torsión, durante los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1, representando a las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} con puntos sólidos y las frecuencias \bar{f}_{1_MM} con rombos. En la parte superior se incluye el registro de aceleración en el terreno, indicando las fases inicial, intensa y final con una franja de color, verde, rojo y amarillo, respectivamente, los instantes de tiempo que definen las fases de un evento se obtienen con los criterios descritos en la sección 1.3.

En la tabla 5 se resumen los valores promedio de las frecuencias del sistema \bar{f}_{1_MM} y \bar{f}_{1_N4SID} en las fases inicial, intensa y final, de los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1. Los valores promedio de las frecuencias \bar{f}_{1_MM} en la fase inicial toma en cuenta la primera o las primeras dos ventanas, en las fases intensas se promedian los valores de dos ventanas asociadas a esta fase, y en la fase final se promedian los valores de las últimas dos o tres ventanas. Los valores promedio de las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} de cada fase son obtenidos con la selección de datos que cumplen las características mencionadas en los subcapítulos 2.1 y 2.2.

Entre los valores mostrados en la tabla 5, hay diferencias promedio entre las frecuencias \bar{f}_{1_MM} y \bar{f}_{1_N4SID} de 3.1, 3.9 y 9.3 % en el componente L, T y en torsión, respectivamente. En la fase intensa las diferencias promedio entre las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} y \bar{f}_{1_MM} son de 0.9, 1.0 y 6.1 % en los componentes L, T y torsión, respectivamente. En las fases finales, las diferencias promedio entre ambos métodos son de 0.2, 2.7 y 5.2 % en los componentes L, T y torsión, respectivamente.

Tabla 5. Comparación de frecuencias fundamentales del sistema en Hz de los métodos de MM y N4SID

Evento	Fase	Componente L		Componente T		Torsión	
		\bar{f}_{1_MM}	\bar{f}_{1_N4SID}	\bar{f}_{1_MM}	\bar{f}_{1_N4SID}	\bar{f}_{1_MM}	\bar{f}_{1_N4SID}
01-1	Inicial	1.070	1.103	0.846	0.880	1.420	1.586
	Intensa	0.987	0.990	0.790	0.790	1.316	1.291
	Final	1.020	1.028	0.810	0.811	1.349	1.367
02-1	Inicial	1.084	1.072	0.819	0.836	1.419	n.d.
	Intensa	1.019	1.018	0.803	0.805	1.352	1.325
	Final	1.047	1.024	0.832	0.810	1.381	1.332
02-2	Inicial	1.085	1.074	0.865	0.868	1.450	1.484
	Intensa	1.025	1.027	0.810	0.814	1.410	1.329
	Final	1.045	1.042	0.825	0.823	1.410	1.340
03-1	Inicial	1.056	1.080	0.837	0.848	1.520	1.474
	Intensa	1.002	0.993	0.781	0.773	1.321	1.285
	Final	1.020	1.040	0.787	0.804	1.328	1.344

n.d.-Dato no disponible porque no se tienen problemas de estimación.

En los componentes L y T se observa una similitud entre las frecuencias \bar{f}_{1_MM} y \bar{f}_{1_N4SID} en la fase intensa y final. Sin embargo, en el evento 01-1 el cual es de mayor intensidad de los cuatros sismos comparados en la tabla 5, con ambos métodos se observa que las frecuencias en su fase intensa presentan los mínimos valores con respecto frecuencias que se presentan en las fases inicial y final de este evento. Lo anterior es debido a las diferencias de las amplitudes de aceleraciones entre las fases del evento 01-1. En cambio, en los eventos 02-1, 02-2, 03-1 que son menos intensos ($I_{h-Arias} < 1.50$ -cm/s), el valor de las frecuencias del sistema prácticamente no cambia entre las tres fases.

La variación que tienen los valores de las frecuencias del sistema con los métodos N4SID y MM son semejantes entre sí, en los tres componentes mostrados. Como se podrá notar ambos métodos tienen una aproximación adecuada en las fases intensa y final, la ventaja que tienen el método N4SID es que se puede conocer la variación con mayor detalle en estas fases y sin perder la consistencia entre una ventana y otra.

Los valores de las frecuencias \bar{f}_{1_MM} (Taborda, 2003; Correa, 2005) y de las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} (García-Illescas *et al.*, 2023) de los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1 en los componentes L, T y en torsión que se ilustran en la figura 21, están contenidos en las tablas B.15 a B.18 del Apéndice B.

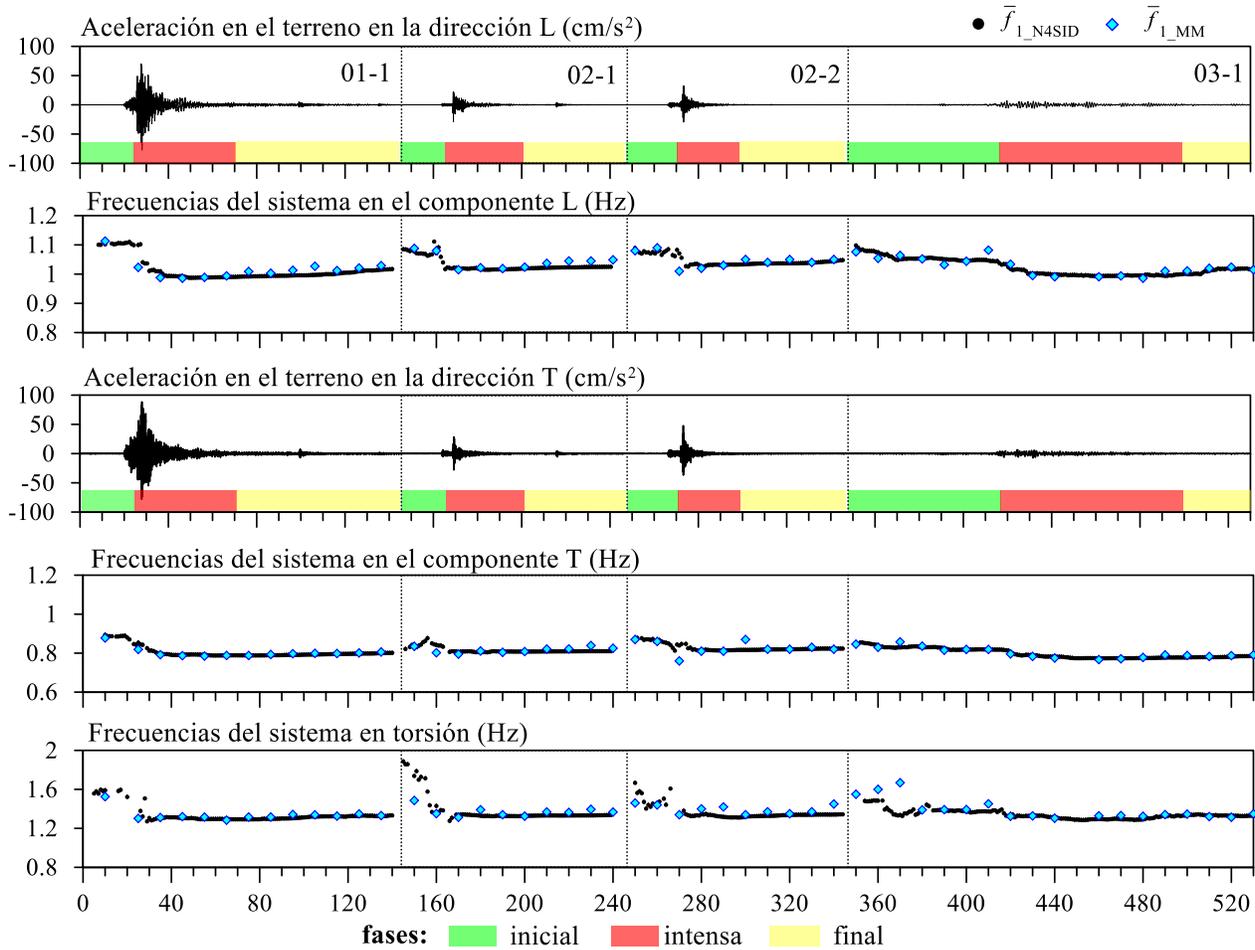


Figura 21. Frecuencias del sistema \bar{f}_{1_N4SID} (García-Illescas, 2023) y \bar{f}_{1_MM} (Taborda, 2003) por ventanas de los componentes L, T y torsión, de los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1

Análisis de frecuencias del sistema del evento 13-3 de moderada intensidad

Para el caso se analiza el evento 13-3 de moderada intensidad, presentando la variación de las frecuencias N4SID a cada segundo en los componentes L, T y en torsión en las fases inicial, intensa y final, valores que son obtenidos por García-Illescas *et al.*, (2023).

En resumen, la Tabla 6 contiene los valores promedio de las frecuencias del sistema \bar{f}_{1_N4SID} de los componentes L, T y torsión en las fases inicial, intensa y final del evento 13-3, y en la tabla 7 contiene los porcentajes de reducción y recuperación de la frecuencia entre las distintas fases.

En la figura 22 se ilustran los valores de las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} en los componentes L, T y torsión del evento 13-3 de moderada intensidad a cada segundo, y en la parte superior se incluyen las aceleraciones registradas en el terreno en la dirección L. Los valores de las frecuencias y el acelerograma se delimitan con líneas punteadas para indicar los intervalos de las fases inicial, intensa y final.

En el acelerograma se observa que las amplitudes en la fase inicial son muy pequeñas, la fase intensa tiene una duración de 30 s, aproximadamente, y la duración de la fase final es más prolongada, permitiendo conocer a detalle la recuperación de la frecuencia del sistema.

En la tabla 7 y en la figura 22 se aprecia que la frecuencia del sistema varía en función de la intensidad que hay en cada fase del sismo. En el componente L, la frecuencia en la fase inicial en promedio es de 1.07 Hz, en la fase intensa se reduce a 0.85 Hz, que es menor en 20.5 % con respecto al valor de la fase inicial (1.07 Hz). En el componente T, el valor de la frecuencia en promedio es de 0.81 Hz en la fase inicial y en la fase intensa se reduce a 0.58 Hz, que es menor en 29.2 % con respecto a la fase inicial. En torsión, el valor de la frecuencia inicia en 1.33 Hz y desciende en la fase intensa a 1.03 Hz, lo que corresponde a una disminución de 22.7 %. Ahora bien, las recuperaciones parciales que ocurren en la fase final son de 11.2, 16.8 y 12.7 % en los componentes L, T y torsión, lo que resulta en una reducción con respecto a la fase inicial de 11.4, 17.7 y 13.6 % en los componentes L, T y torsión, respectivamente.

Tabla 6. Valores promedio de las frecuencias del sistema $\bar{f}_{1,N4SID}$ (García-Illescas, 2023) en Hz, estimado en las fases inicial, intensa y final del evento de moderada intensidad

Evento	Fase	Componente		
		L	T	torsión
13-3	Inicial	1.067	0.814	1.327
	Intensa	0.847	0.576	1.026
	Final	0.947	0.677	1.159

Tabla 7. Variación de las frecuencias del sistema entre las fases del evento 13-3 de moderada intensidad, en porcentajes

Evento	Fase de referencia → Fase		Componente			Observación
			L	T	Torsión	
13-3	inicial	intensa	-20.5	-29.2	-22.7	Reducción
	inicial	final	-11.8	-17.5	-13.0	Reducción
	intensa	final	+11.2	+16.8	+12.7	Recuperación

En la figura 22 se observa la consistencia de las frecuencias del sistema del componente L y T obtenidos en la fase inicial, este hecho no ocurre con las frecuencias de torsión, apreciando que no hay valores con una alta variabilidad, habiendo una discontinuidad entre los instantes de 15 y 25 s.

En la tabla B.13 del apéndice B contiene los valores de las frecuencias $\bar{f}_{1,N4SID}$ que se ilustran en la figura 22.

Como se ha observado en los eventos analizados con ventanas, los valores de las frecuencias asociados a las fases iniciales se evidencia una notable variación independientemente del método de estimación o de la intensidad del evento. En algunas ventanas se identifican valores anormales en los distintos componentes, debido a que las amplitudes de aceleración son muy pequeñas y por el efecto de vibración forzada, en donde aún no prevalece la vibración, bajo estas condiciones, el presente trabajo omite la estimación de fase inicial para el estudio de los efectos de ISE.

Debido a que los valores de las frecuencias estimados con el método N4SID tienen una mayor resolución (a cada s.), y una consistencia entre las fases intensa y final, se tiene la confiabilidad de los resultados obtenidos con este método. De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se utilizan solamente los valores de las frecuencias del sistema obtenidos con el método N4SID para el cálculo de los efectos ISE.

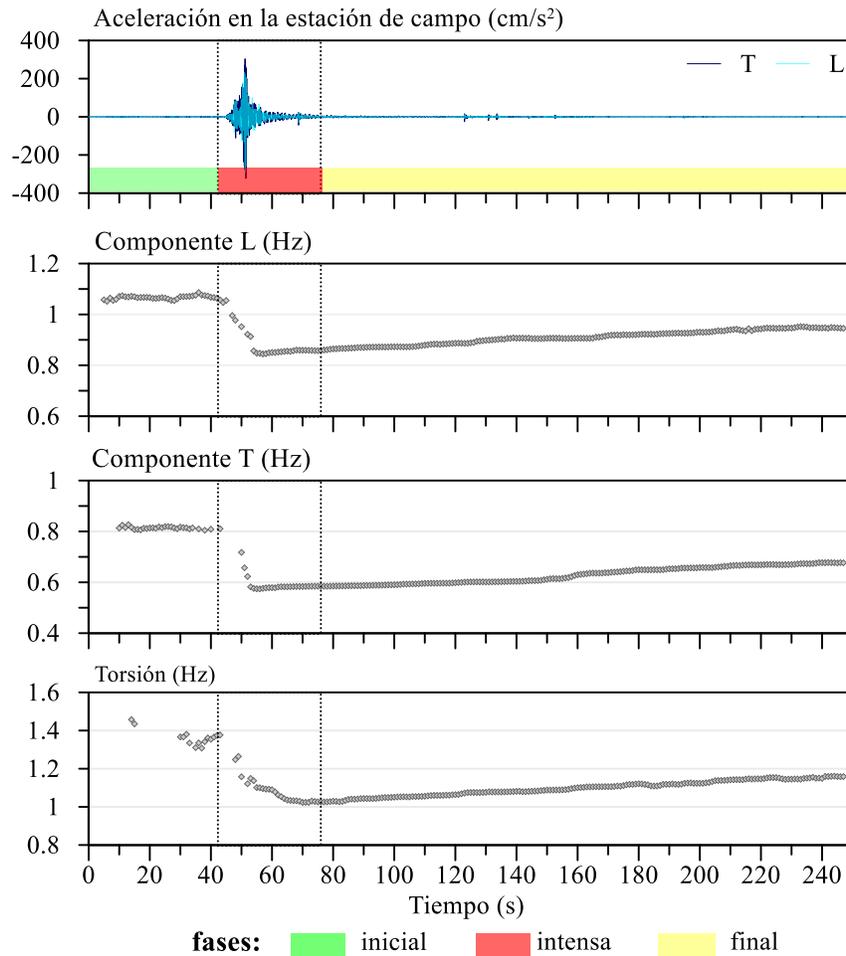


Figura 22. Variación de las frecuencias del sistema en los componentes *L*, *T* y en torsión, estimadas con el método N4SID (García-Illescas, 2023) durante el evento 13-3 de moderada intensidad

Capítulo 3. Estimación de los efectos de interacción suelo-estructura (ISE)

En este capítulo se presenta el procedimiento para la estimación de los efectos ISE con el método de Luco, describiendo la formulación y los criterios para el cálculo de las frecuencias y rigideces de ISE en los componentes L, T y torsión.

El análisis de los efectos ISE se realiza con las frecuencias y rigideces de ISE en las fases intensas y final de cada evento sísmico seleccionado (tabla 2), la estimación es partir de los valores de las frecuencias del sistema \bar{f}_{1N4SID} (tablas 3 y 4). Con los resultados obtenidos, se presenta la variación de un evento a otro de las frecuencias de la estructura, de cabeceo y de traslación de la base, y sus respectivas rigideces, así mismo, se indican los porcentajes de participación de la respuesta de traslación y de cabeceo de la base en la respuesta total en la azotea, durante la ocurrencia de cada evento sísmico.

Para entrar a detalle con los efectos de ISE, se presentan las frecuencias y rigideces de ISE por ventanas en los componentes L, T y en torsión, con los registros de los eventos 01-1, 01-3, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4, 18-1, 20-1 y 22-2.

Los valores obtenidos de las frecuencias de ISE estimados con ventanas se comparan con los valores estimados con los registros completos, para mostrar las coincidencias y disparidades. Las rigideces de ISE estimadas con el método de Luco se comparan con los obtenidos analíticamente por el programa de cómputo Dyna5 (Murià-Vila *et al.* 2004) y con valores estimados con las expresiones del Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE-2017 (MDOC, 2019).

Por otro lado, se comparan las frecuencias de ISE estimadas con el método de Luco por ventanas de los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1 que son calculadas a partir de las frecuencias obtenidas con los métodos N4SID y MM, mismas que se habían obtenido en dos tesis previas (Taborda, 2003 y Correa, 2005) con el fin de mostrar la buena proximidad entre ambas estimaciones.

Por último, se presenta un análisis de los cocientes espectrales estimados con los registros sísmicos del sótano con respecto a la estación de campo ante la ocurrencia de los eventos de baja intensidad y el evento 13-3 de moderada intensidad.

3.1. Método simplificado de Luco

El método simplificado de Luco (Luco, 1980) se basa en la descomposición modal de las ecuaciones de movimiento idealizando la estructura y los efectos de interacción. En la estimación con este método se requiere tener valores de entrada de las frecuencias fundamentales del sistema suelo-estructura.

Con el método de Luco se idealiza al sistema suelo-estructura en los componentes L, T y torsión de manera independiente. En los componentes L y T se describe el movimiento de traslación, simplificando al sistema del edificio a un grado de libertad y la interacción con el suelo con dos grados de libertad asociados al movimiento de traslación y el cabeceo de cuerpo rígido del edificio. En torsión se describe el movimiento con un subsistema de dos grados de libertad, uno relacionado con la torsión de la estructura y otro con la torsión de la base.

Bajo las condiciones antes descritas para los subsistemas, en los componentes L y T se requiere determinar la frecuencia de traslación de la estructura suponiendo que la base está empotrada, la frecuencia de traslación y de cabeceo de la base, así como las rigideces asociadas a cada uno de los grados de libertad. En subsistema de torsión se requiere estimar las frecuencias de torsión de la estructura, y de torsión de la base, así como de las rigideces asociadas (figura 23).

Los subsistemas de traslación de los componentes L y T están representados por la figura 23. Lo que indica que la respuesta total en la azotea \bar{x}_{tot} es resultado del movimiento del suelo x_s , la traslación relativa de la base x_b , el desplazamiento debido al cabeceo de la base, que resulta del giro en la base ϕ_r multiplicado por la altura h en el nivel j , y de la deformación propia de la estructura x_e^j en el nivel j . Entonces, el desplazamiento total al centro de un nivel dado j se determina como:

$$\bar{x}_{tot}^j = x_s + x_o + h_j \phi_r + x_e^j \quad Ec. 2$$

Donde

- x_o es el desplazamiento relativo de la base con respecto al terreno
- x_s es el desplazamiento del terreno
- h_j es la altura del nivel j con respecto a la base
- ϕ_r es ángulo de giro debido al cabeceo de la base
- x_e^j es el desplazamiento en el nivel j , debido a la deformación de la estructura

En el movimiento de torsión, la respuesta rotacional total $\bar{\phi}_{tot}^j$ en el nivel j resulta de la suma de las respuestas rotacionales en la base y la estructura.

$$\bar{\phi}_{tot}^j = \phi_{rV} + \phi_{re}^j \quad Ec. 3$$

Donde

- ϕ_{rV} es la respuesta rotacional absoluta de la base
- ϕ_{re}^j es la respuesta rotacional de la estructura en el nivel j

Ahora, considerando la traslación absoluta del terreno como la suma de desplazamiento de la base más la del terreno:

$$x_b = x_s + x_o \quad Ec. 4$$

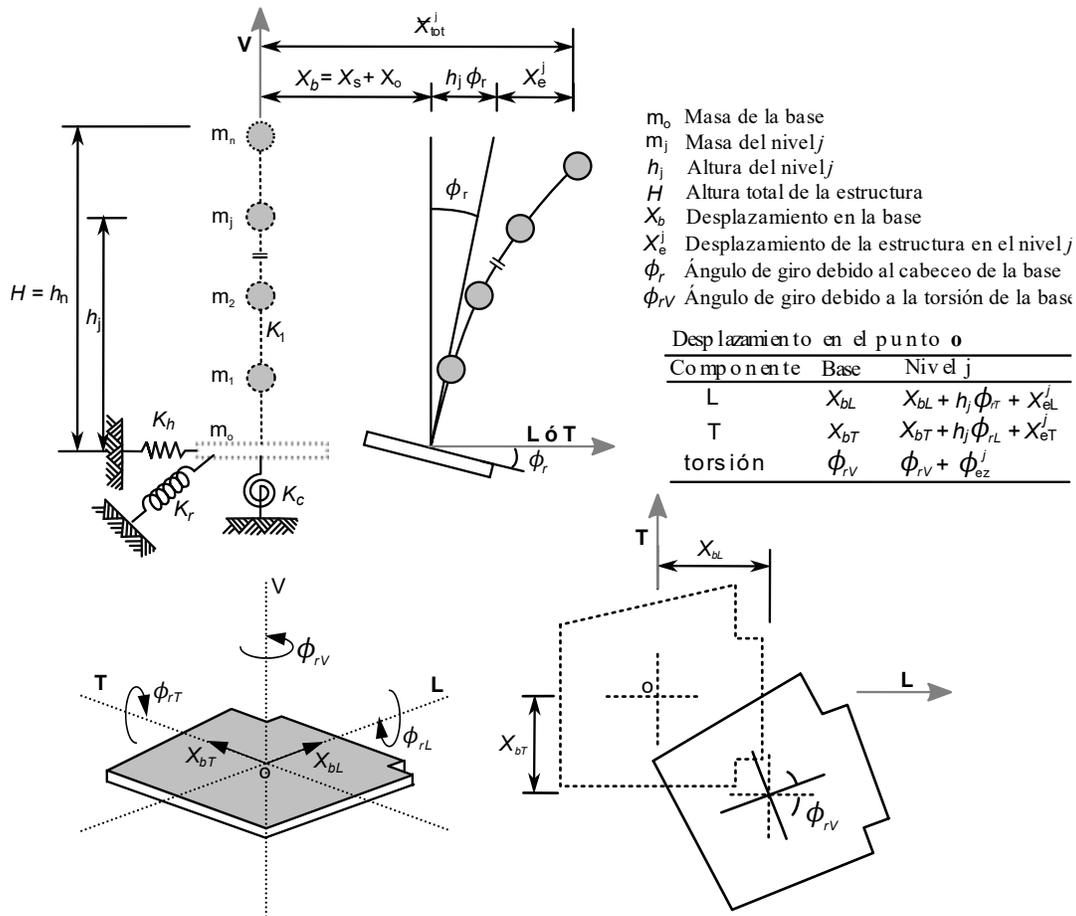


Figura 23. Modelo simplificado para la estimación de los efectos de ISE en los componentes L, T y torsión (figura modificada de Taborda, 2003)

Sustituyendo la ec. 4 en 2 se obtiene

$$\bar{x}_{tot}^j = x_b + h_j \phi_r + x_e^j \quad Ec. 5$$

Las ecs. 3 y 5 describen el movimiento en el dominio del tiempo, pero también pueden expresarse en el dominio de la frecuencia,

$$\bar{X}_{tot}^{az} = X_b + H \Phi_r + X_e^{az} \quad Ec. 6$$

$$\bar{\Phi}_{tot}^{az} = \Phi_{rv} + \Phi_{re}^{az} \quad Ec. 7$$

Los múltiples grados de libertad que posee la estructura se simplifican a un solo grado de libertad, representado por la masa modal del primer modo de vibrar. Bajo esta condición la respuesta total es evaluada en el nivel de la azotea, siendo H la altura total de la estructura, que para el caso del edificio SIS es de 66.15 m.

En los subsistemas de traslación T y L es de interés determinar la frecuencia de traslación de la estructura con base empotrada f_h , la de cabeceo de la base f_c , y la frecuencia de la estructura f_1 suponiendo que se encuentra empotrada en la base.

Suponiendo que la masa de la cimentación, el momento de rotación de la estructura y la contribución de los modos superiores son despreciables (Luco, 1980), la frecuencia fundamental de traslación del sistema suelo-estructura se aproxima a

$$\frac{1}{\bar{f}_1^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_c^2} + \frac{1}{f_h^2} \quad Ec. 8$$

Donde:

\bar{f}_1 es la frecuencia fundamental del sistema suelo-estructura determinada experimentalmente

f_1 es la frecuencia de la estructura suponiendo que esta se encuentra empotrada en la base

f_c es la frecuencia de cabeceo de la base, suponiendo que sólo puede girar alrededor del eje perpendicular a la dirección de análisis y que la estructura es infinitamente rígida

f_h es la frecuencia natural de traslación de la base suponiendo que sólo puede trasladarse en la dirección de análisis y que la estructura es infinitamente rígida.

La forma aproximada para obtener la frecuencia de cabeceo y de traslación de la base es:

$$f_c = \bar{f}_1 \left(\gamma_1 \frac{H\Phi_r}{\bar{X}_{tot}^{az}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad Ec. 9$$

$$f_h = \bar{f}_1 \left(\beta_1 \frac{X_b}{\bar{X}_{tot}^{az}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad Ec. 10$$

Donde

\bar{X}_{tot}^{az} es la respuesta total medida en la azotea para la frecuencia fundamental del sistema

X_b es la respuesta total medida en la base para la frecuencia fundamental del sistema

Φ_r es la respuesta rotacional en la base para la frecuencia fundamental del sistema.

Los factores β_1 y γ_1 son parámetros modales correspondientes al primer modo de la estructura considerando que la base está empotrada, analíticamente se pueden estimar con las siguientes expresiones.

$$\beta_1 = \frac{1}{M_1} \{\phi_1\}^T [M] \{1\} \quad Ec. 11$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{HM_1} \{\phi_1\}^T [M] \{h\} \quad Ec. 12$$

Donde

H es la altura total de la estructura con respecto a la base igual a 66.15 m

M_1 es la masa modal correspondiente al primer modo de vibrar de la estructura cuando ésta se supone con base empotrada

$[M]$ matriz de masas de la estructura

$\{\phi_1\}$ es un vector que define la forma modal correspondiente al primer modo de vibrar de la estructura suponiendo que la base está empotrada, normalizada de forma tal que la amplitud en la azotea sea igual a uno

$\{h\}$ es el vector que posee las alturas de cada nivel de la estructura con respecto a la base.

Reemplazando las ecs. 9 y 10 en la ec. 8, se despeja la frecuencia de la estructura f_1 , obteniendo lo siguiente:

$$f_1 = \bar{f}_1 \left(1 - \gamma_1 \frac{H\Phi_r}{\bar{X}_{tot}^{az}} - \beta_1 \frac{X_b}{\bar{X}_{tot}^{az}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad Ec. 13$$

El método de Luco permite obtener las rigideces asociadas a las frecuencias de cabeceo y de traslación que corresponden a la contribución de los efectos ISE.

$$K_c = \gamma_1^2 M_1 H^2 (2\pi f_c)^2 \quad Ec. 14$$

$$K_h = \beta_1^2 M_1 (2\pi f_h)^2 \quad Ec. 15$$

De manera aproximada, la rigidez del sistema resulta:

$$K_1 = M_1 (2\pi \bar{f}_1)^2 \left(1 - \gamma_1 \frac{H\Phi_r}{\bar{X}_{tot}^{az}} - \beta_1 \frac{X_b}{\bar{X}_{tot}^{az}} \right)^{-1} \quad Ec. 16$$

A partir de las expresiones establecidas es posible estimar la contribución tanto del movimiento de traslación como el de cabeceo en la base con respecto a la respuesta total que hay en la azotea, dado por los siguientes cocientes:

$$\frac{X_b}{\bar{X}_{tot}^{az}} \quad y \quad \frac{H\Phi_r}{\bar{X}_{tot}^{az}}$$

Ahora, para caracterizar el movimiento de torsión, se recurre a un procedimiento similar al descrito anteriormente. Conociendo las frecuencias fundamentales de torsión del sistema, esta se puede expresar como la combinación de la frecuencia de torsión de la estructura y la frecuencia de torsión de la base.

$$\frac{1}{\bar{f}_{1t}^2} = \frac{1}{f_{1t}^2} + \frac{1}{f_r^2} \quad Ec. 17$$

Donde

\bar{f}_{1t} es la frecuencia fundamental de torsión del sistema determinada experimentalmente

f_{1t} es la frecuencia de torsión de la estructura suponiendo que esta se encuentra empotrada en la base

f_r es la frecuencia fundamental de torsión en la cimentación, suponiendo que la estructura es infinitamente rígida y que la base solo pudiera girar en su plano.

La frecuencia de rotación de la base f_r se determina aproximadamente con las siguientes ecs.

$$f_r = \bar{f}_{1t} \left(\beta_{1t} \frac{\Phi_{rV}}{\bar{\Phi}_{tot}^{az}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad Ec. 18$$

$$\beta_{1t} = \frac{1}{I_1} \{\phi_{r1}\}^T [I] \{1\} \quad Ec. 19$$

Donde

- Φ_{rV} es la respuesta rotacional medida en la base para la frecuencia fundamental del sistema
- $\bar{\Phi}_{tot}^{az}$ es la respuesta rotacional medida en la azotea para la frecuencia fundamental de torsión del sistema
- β_{1t} es el parámetro modal en torsión
- $\{\phi_{r1}\}$ es el vector de la forma modal en torsión asociada a la frecuencia fundamental de la estructura con base empotrada
- I_1 es la masa modal rotacional correspondiente al primer modo de vibrar de la estructura con base empotrada

La frecuencia de torsión de la estructura se deduce de las ecs. 17 y 18, resultado lo siguiente.

$$f_{1t} = \bar{f}_{1t} \left(1 - \beta_{1t} \frac{\Phi_{rV}}{\bar{\Phi}_{tot}^{az}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad Ec. 20$$

Ahora, conociendo las frecuencias de cada grado de libertad, se pueden estimar las rigideces equivalentes de torsión de la base K_r y de la estructura K_{1t} con las siguientes ecs.

$$K_r = (2\pi \bar{f}_{1t})^2 \beta_{1t} I_1 \frac{\bar{\Phi}_{tot}^{az}}{\Phi_{rV}} \quad Ec. 21$$

$$K_{1t} = (2\pi \bar{f}_{1t})^2 \frac{I_1}{1 - \beta_{1t} \Phi_{rV} / \bar{\Phi}_{tot}^{az}} \quad Ec. 22$$

También es importante conocer la contribución de la respuesta en torsión de la base con respecto a la respuesta total en la azotea, esto se puede saber estimando el cociente de la rotación en la base con respecto a la de la azotea.

$$\frac{\Phi_{rV}}{\bar{\Phi}_{tot}^{az}} \quad Ec. 23$$

El aporte de torsión de la estructura a la respuesta total en la azotea está dado con la ec.24

$$\frac{\Phi_{rV}^e}{\bar{\Phi}_{tot}^{az}} = 1 - \frac{\Phi_{rV}}{\bar{\Phi}_{tot}^{az}} \quad Ec. 24$$

Con lo anterior se caracteriza el subsistema que representa los efectos ISE en el movimiento de torsión para un modelo simplificado propuesto por Luco (1980).

Las expresiones definidas para los movimientos de traslación horizontal y de torsión del sistema se pueden aplicar en un análisis con los registros completos o por ventanas de tiempo, permitiendo evaluar los efectos de interacción en determinados instantes de un evento sísmico.

El cálculo de las frecuencias y rigideces de ISE con el método de Luco es a partir de la respuesta obtenida experimentalmente, el cual puede estar en el dominio del tiempo o de la frecuencia (Mendoza *et al.*, 1991). En este trabajo, la estimación de la respuesta se hace en el dominio de la frecuencia, ya que es más simple, y se obtienen resultados confiables (Murià-Vila *et al.*, 2001 y Tabora, 2003).

El procesamiento de la respuesta del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia consiste en aplicar la transformada rápida de Fourier (Vendar y Piersol, 1989) a los registros de aceleración (figura 5) que describen el movimiento del sistema en los componentes L, T y torsión, este cambio de dominio de la respuesta se describe en el Apéndice A.

Para la estimación de las frecuencias y rigideces de ISE de los subsistemas de traslación supone que la composición del movimiento ($\bar{X}_{tot}^{az}, X_b, H\Phi_r$) establecida por la ec. 2 están en fase y que alcanzan las amplitudes máximas en la vecindad de la frecuencia fundamental del sistema (Luco, 1980), lo que permite estimar de manera independiente las frecuencias de traslación y de cabeceo de la base, así como de la estructura supuesta con base empotrada.

Para obtener las amplitudes asociadas a las frecuencias del sistema se generan los registros de aceleración en puntos estratégicos y posteriormente se realiza su transformada de Fourier, para la identificación de las amplitudes \bar{X}_{tot}^{az}, X_b y Φ_r .

Previamente se requiere de la identificación de la frecuencia del sistema a partir del método AE, N4SID o de MM mencionados en el capítulo 2, o con algún otro método conocido.

Para estimar la frecuencia de traslación de la base (f_h), ya sea en el componente L o T, se requiere del espectro de Fourier del registro generado en el centro del sótano SO-CEN (figura 5), de éste se identifica la amplitud asociada a la frecuencia del sistema \bar{f}_1 que corresponde a la traslación de la base (X_b). Así mismo, en el espectro de Fourier del registro generado en el centro de la azotea AZ-CEN se obtiene la amplitud asociada a la frecuencia \bar{f}_1 , la cual representa la traslación total del sistema (\bar{X}_{tot}^{az}).

En la estimación de la frecuencia de cabeceo de la base se requiere obtener la respuesta rotacional medido en la base (Φ_r) el cual está asociado a la frecuencia del sistema (\bar{f}_1). Este parámetro se identifica de los espectros de Fourier de los registros verticales del sótano que describen su balanceo sobre los ejes L y T.

En el componente L, se requiere del giro sobre el eje T, el cual está descrito con los registros verticales ubicadas en los puntos sótano norte (SO-NOR) y sótano sur (SO-SUR), que están distanciados 24.6 m, de tal modo que el registro generado que describe el balanceo se obtiene de la diferencia de estos registros verticales entre la distancia (SO-NOR – SO-SUR)/24.6. Mientras que el registro generado que describe el movimiento de cabeceo de la base del componente T (giro sobre el eje L) se obtiene de los registros verticales ubicados en el sótano oeste (SO-OES) y sótano este (SO-EST), que están distanciados 23.4 m, o bien, operando los registros como (SO-OES – SO-EST)/23.4.

Las amplitudes \bar{X}_{tot}^{az}, X_b y Φ_r asociadas al valor de la frecuencia del sistema \bar{f}_1 también se utilizan para el cálculo de la frecuencia de la estructura f_1 (ec. 13) y de las rigideces K_c, K_h y K_1 (ecs. 14 a 16, respectivamente).

Por otro lado, para el cálculo de las frecuencias de torsión de la estructura f_{1t} y torsión de la base f_r se requiere de las amplitudes que describen el movimiento de torsión en la azotea y de torsión en el sótano, las cuales están asociadas a la frecuencia de torsión del sistema \bar{f}_{1t} . Las amplitudes de torsión se identifican en los espectros de Fourier de los registros generados con los registros horizontales ubicados en la azotea y sótano en la fachada norte (AZ-LAT y SO-LAT, AZ-OPTO y SO-OPTO, respectivamente) y distanciados 23.4 m, la ubicación de estos puntos se ilustran con detalle en la figura 5.

El movimiento de torsión total en la azotea $\bar{\Phi}_{tot}^{az}$ está definido por el registro generado con (AZ-LAT – AZ-OPTO)/23.4, y movimiento de torsión en la base Φ_{rV} está definido por el registro generado con (SO-LAT – SO-OPTO)/23.4.

Los valores de los parámetros modales β_1 , γ_1 y M_1 e I_1 que aparecen en la tabla 8, fueron actualizados a partir de las masas y de las formas modales del edificio SIS, por medio de modelos analíticos calibrados con distintos programas de cálculo estructural (Rodríguez-Gastelum, 2022; Zúñiga-Ontiveros, 2021; Pérez-Liévano, 2019) con respecto a los utilizados en Murià-Vila *et al.*

Tabla 8. Parámetros modales para la estimación de los efectos de ISE con el método de Luco

Parámetro	Componente L	Componente T	Torsión
M_1 (kg.s ² /m)	413939	326106	-
I_1 (kg.m ²)	-	-	52183971
β_1	1.427	1.613	1.378
γ_1	1.001	1.127	-

3.2 Estimación espectral de las frecuencias y rigideces de ISE con el método de Luco

3.2.1 Estimación en la fase intensa

El cálculo de los efectos de ISE se realiza para cada evento sísmico (tabla 2), tomando en cuenta los valores de las frecuencias del sistema estimadas con el método N4SID de la tabla 3.

Las amplitudes que describen el movimiento de cabeceo (Φ_r), de traslación X_b y de torsión de la base Φ_{rV} son obtenidas de los espectros de Fourier calculados con registros completos, en los cuales se identifican los valores asociados a la frecuencia del sistema en los componentes L, T y torsión.

Análisis de las frecuencias y rigideces de ISE en el componente L

La tabla 9 contiene los valores de las frecuencias y rigideces de ISE para los eventos sísmicos en el componente L del edificio SIS, misma que incluye los valores de las frecuencias de cabeceo f_c y de traslación de la base f_h , la frecuencia de la estructura f_1 , así como de las respectivas rigideces K_c , K_h y K_1 , también se indican los cocientes de la frecuencia de la estructura entre la frecuencia del sistema f_1/\bar{f}_1 , y los porcentajes de participación en la respuesta total en la azotea del edificio del movimiento de traslación de la base (X_b/\bar{X}_{tot}^{az}) y del cabeceo de la base ($H\Phi_{rT}/\bar{X}_{tot}^{az}$).

En la figura 24 se grafican los valores de las frecuencias y rigideces de ISE contenidos en la tabla 9, además se incluye la intensidad $I_{h-Arias}$ de cada evento, debido a que la variación de las frecuencias del sistema y de la estructura están correlacionadas con este parámetro (Murià-Vila *et al.*, 2001). Los valores de la $I_{h-Arias}$ son los que se indican en la tabla 2.

En todos los eventos analizados el valor de la frecuencia de la estructura es mayor que el valor de la frecuencia del sistema y por ende los cocientes f_1/\bar{f}_1 resultan mayores que la unidad. Entre los eventos 01-1 a 12-1 la frecuencia f_1 en promedio es de 1.23 Hz (DE = 0.03 Hz, CV = 2.4 %), entre estos eventos el cociente f_1/\bar{f}_1 es igual o mayor que 1.20. En cuanto a la rigidez K_1 , se obtienen valores comprendidos entre 1.53 y 1.93 N/m x10⁸ de estos eventos. Se podrá notar que durante este periodo se tiene una variación moderada de la rigidez K_1 , que es similar a la variación de la frecuencia f_1 .

En la ocurrencia del evento 13-3, de moderada intensidad ($I_{h-Arias} = 119$ cm/s) con el valor de la frecuencia del sistema de 0.85 Hz se obtiene la frecuencia f_1 de 1.07 Hz, y el cociente $f_1/\bar{f}_1 = 1.26$, que es mayor en 3.4 % con respecto al valor estimado en el evento 01-3 (1.22). Es deseable conocer la variación de este valor durante el evento con la estimación por ventanas que se presenta en la siguiente sección.

En la figura 24 se aprecia la reducción de la frecuencia $\bar{f}_{1,N4SID}$ en el evento 13-3, situación que se repite con la frecuencia f_1 . El valor obtenido de f_1 es 1.07 Hz, el cual representa una reducción de 17.9 % con respecto al valor de 1.31 Hz de referencia, mientras que la rigidez K_1 es de 1.33 N/m x10⁸, que es menor en 31.2 % en comparación con el valor de referencia 1.93 N/m x10⁸.

Entre los eventos 14-1 al 20-1, el valor promedio de la frecuencia f_1 es de 1.03 Hz, el cual tiene una baja variabilidad (DE = 0.04 Hz, CV = 3.4 %), con ello, el cociente f_1/\bar{f}_1 varía entre 1.16 y 1.18. De igual manera, la rigidez K_1 tiene una baja variación entre dichos eventos, en promedio es de 1.35 N/m x10⁸, la DE es de 0.09 N/m x10⁸ y el CV es 6.6 %. En la figura 24 se observa que los valores de frecuencia f_1 y rigidez K_1 obtenidos en estos eventos son equiparables con los obtenidos en el evento 13-3 de moderada intensidad (1.07 Hz y 1.33 N/m x10⁸).

En el evento 20-1 previo al sismo de alta intensidad, con el valor de la frecuencia $\bar{f}_{1,N4SID}$ de 0.89 Hz se obtiene la frecuencia f_1 de 1.04 Hz y el cociente f_1/\bar{f}_1 de 1.16. En comparación con el valor de 1.31 Hz obtenido en el evento 01-3, hay una reducción de 20.3 %, similar a la reducción obtenida en la fase intensa del evento 13-3.

En el evento 21-1 registrado después del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021, la frecuencia del sistema es de 0.84 Hz. Con este valor se obtiene la frecuencia f_1 de 0.96 Hz, que es menor de 26.6 % con respecto al valor de referencia 1.31 Hz. Mientras que el valor de la rigidez K_1 de 1.81 N/m x10⁸ obtenido en este evento representa una reducción de 39.9 % con respecto al evento 01-3 (1.93 N/m x10⁸).

En el último evento 22-2, la frecuencia $\bar{f}_{1,N4SID}$ es de 0.80 Hz, del cual se obtiene el valor de la frecuencia f_1 de 0.92 Hz, que es menor en 29.3 % con respecto al valor 1.32 Hz de referencia, en cuanto al cociente f_1/\bar{f}_1 es 1.15, que es menor en 5.6 % con respecto al valor de referencia 1.22. La rigidez K_1 es de 1.12 N/m x10⁸, con una reducción de 42.2 % con respecto al evento 01-3.

Por otro lado, en la figura 24 se aprecia que el menor valor de la frecuencia de cabeceo de la base es en el evento 13-3, que es de 1.75 Hz, el cual es menor de 14.9 % con respecto al evento 01-3, en cambio, la rigidez K_c resulta de 2.14 Nm/rad x10¹², valor que es 27.7 % menor con respecto al valor de referencia 2.83 Nm/rad x10¹².

Entre los eventos 01-1 a 12-1, la frecuencia f_c varía entre 1.84 y 2.03 Hz, y entre los eventos 14-1 al 20-1, la frecuencia f_c varía entre 1.90 y 2.11 Hz, asimilando una tendencia creciente antes y después del evento de moderada intensidad 13-3. El valor de la frecuencia f_c de 2.10 Hz obtenido en el evento

20-1 previo al sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 que no se registró, es mayor en 3.9 % con respecto al valor de referencia 2.01 Hz. Después de sismo de alta intensidad, la frecuencia f_c es igual o menor de 2.0 Hz, teniendo la aproximación con el valor de obtenido en el evento de referencia.

Tabla 9. Frecuencias y rigideces de ISE en el componente L estimadas con el método de Luco en la fase intensa

Evento	$\bar{f}_{1,N4SID}$	f_h	f_c	f_1	f_1/\bar{f}_1	$\frac{X_b}{\bar{X}_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{\bar{X}_{tot}^{az}}$	K_h	K_c	K_1
	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	(%)	(%)	N/m x10 ¹⁰	Nm/rad x10 ¹²	N/m x10 ⁸
01-1	0.989	3.671	1.839	1.238	1.25	5.1	28.9	0.44	2.38	1.70
01-2	1.031	4.651	1.955	1.257	1.22	3.4	27.8	0.71	2.69	1.80
01-3 ⁽¹⁾	1.074	5.458	2.005	1.308	1.22	2.7	28.7	0.97	2.83	1.93
02-1	1.018	4.613	1.938	1.238	1.22	3.4	27.5	0.69	2.64	1.75
02-2	1.027	4.165	1.958	1.260	1.23	4.3	27.5	0.57	2.70	1.81
02-3	1.037	4.218	1.964	1.276	1.23	4.2	27.8	0.58	2.71	1.84
02-4	1.040	4.165	1.997	1.274	1.22	4.4	27.1	0.57	2.80	1.85
03-1	0.993	4.130	1.896	1.215	1.22	4.1	27.4	0.56	2.53	1.68
04-1	1.049	4.468	2.029	1.274	1.21	3.9	26.7	0.65	2.90	1.87
07-1	0.979	3.933	1.947	1.182	1.21	4.3	25.2	0.50	2.67	1.64
11-1	0.959	3.696	1.968	1.150	1.20	4.7	23.7	0.45	2.73	1.58
12-1	0.944	3.793	1.928	1.129	1.20	4.3	23.9	0.47	2.62	1.53
13-3	0.848	2.312	1.746	1.068	1.26	9.4	23.5	0.17	2.14	1.33
14-1	0.840	2.937	1.936	0.983	1.17	5.7	18.8	0.28	2.64	1.23
14-2	0.854	2.746	2.005	1.005	1.18	6.8	18.1	0.25	2.83	1.30
14-3	0.856	2.821	2.009	1.005	1.17	6.5	18.2	0.26	2.84	1.30
17-1	0.884	2.836	2.048	1.045	1.18	6.8	18.6	0.26	2.95	1.39
17-2	0.862	3.041	2.001	1.007	1.17	5.6	18.6	0.30	2.82	1.30
17-3	0.917	3.762	2.069	1.062	1.16	4.2	19.6	0.46	3.01	1.43
17-4	0.895	3.185	2.026	1.050	1.17	5.5	19.5	0.33	2.89	1.40
18-1	0.835	2.959	1.897	0.980	1.17	5.6	19.4	0.29	2.53	1.22
18-2	0.888	3.183	2.067	1.034	1.16	5.5	18.4	0.33	3.01	1.37
18-3	0.932	3.263	2.107	1.096	1.18	5.7	19.5	0.35	3.12	1.52
20-1	0.893	3.300	2.073	1.037	1.16	5.1	18.5	0.36	3.02	1.38
21-1 ⁽²⁾	0.838	3.834	1.965	0.955	1.14	3.4	18.2	0.48	2.72	1.18
22-1	0.853	3.872	2.003	0.972	1.14	3.4	18.1	0.49	2.82	1.23
22-2	0.803	2.916	1.998	0.920	1.15	5.3	16.1	0.28	2.81	1.12

⁽¹⁾Evento de referencia para la evaluación del estado físico del edificio.

⁽²⁾Réplica del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 de M 7.1, que no se registró en la red acelerográfica del edificio.

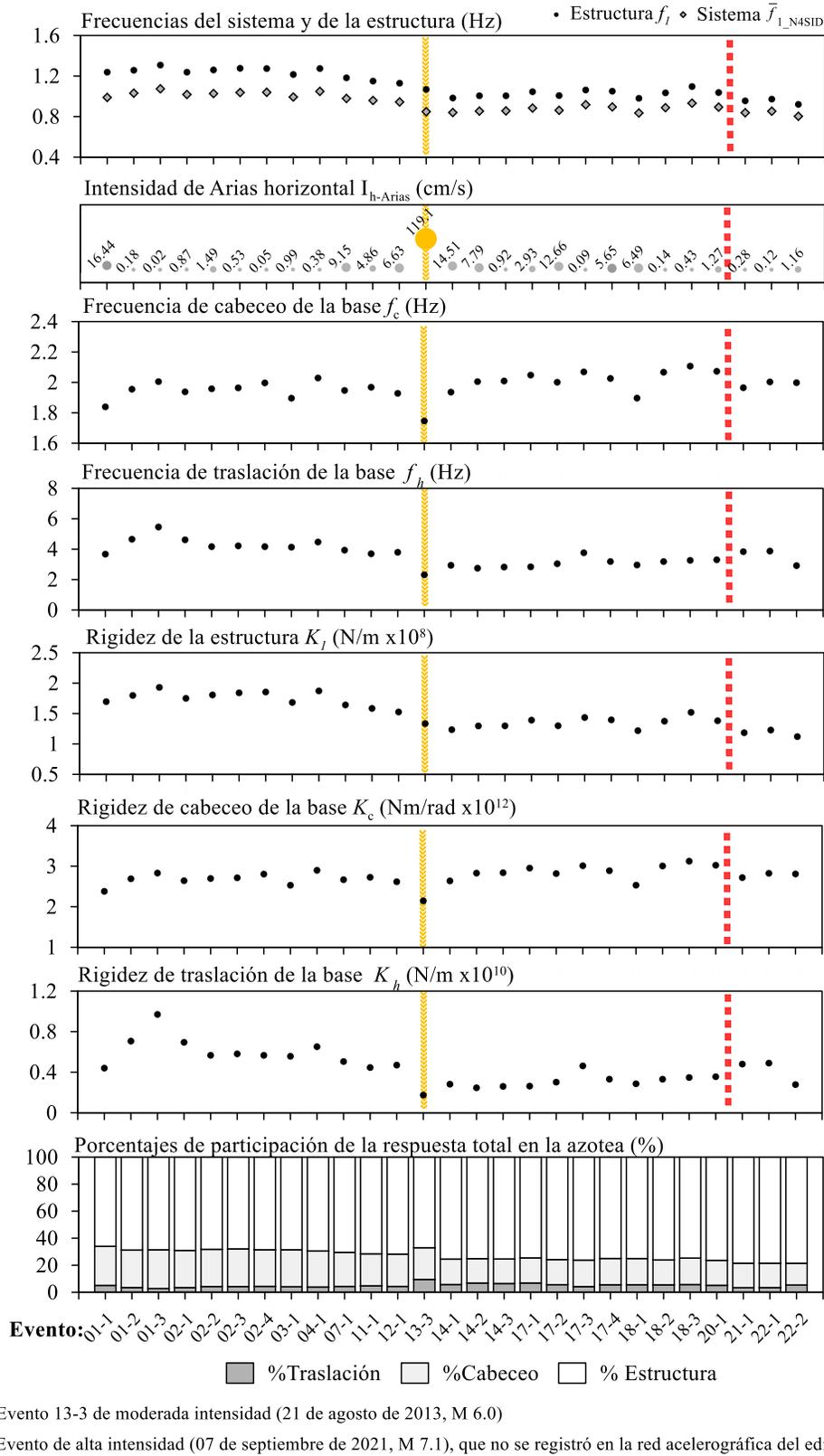


Figura 24. Frecuencias y rigideces de ISE en el componente L obtenidas con el método de Luco en la fase intensa

En la figura 24 también se observa que la variación de la rigidez K_c , es similar a la de frecuencia f_c , destacando una tendencia creciente entre los eventos 01-1 al 20-1. En el evento 20-1, la rigidez K_c es de $3.02 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$, que es mayor de 5.0 % con respecto al valor de referencia $2.83 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$. Después del sismo de alta intensidad, la rigidez K_c disminuye a $2.81 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$ en el último evento, aproximándose al valor de referencia.

El porcentaje de participación en la respuesta total en la azotea debido al cabeceo en la base $H\Phi_{rT}/\bar{X}_{tot}^{az}$ es mayor al inicio del monitoreo del edificio, siendo del orden de 28 %. Se observa que a medida que la frecuencia f_c aumenta, el porcentaje de participación de $H\Phi_{rT}/\bar{X}_{tot}^{az}$ disminuye, teniendo el último evento 22-2 un porcentaje de participación $H\Phi_{rT}/\bar{X}_{tot}^{az}$ de 16.1 % en la respuesta total en la azotea.

La reducción del porcentaje de participación de $H\Phi_{rT}/\bar{X}_{tot}^{az}$ se atribuye a la ocurrencia del evento 13-3 y del sismo de alta intensidad de 07 de septiembre de 2021, tal como se distingue en el gráfico de barras de la figura 24.

En la figura 24 se observa que entre los eventos 01-1 al 12-1, se tiene una alta variación de la frecuencia f_h y rigidez K_h , y entre los eventos 14-1 al 20-1, los valores de f_h y K_h disminuyen después del evento 13-3. Entre los eventos 01-1 al 12-1 la frecuencia f_h varía entre 3.67 y 4.85 Hz, y la rigidez K_h entre 0.44 y $0.77 \text{ N/m} \times 10^{10}$. En cambio, entre los eventos 14-1 a 20-1, los valores de f_h y K_h están comprendidos entre 2.75 y 3.83 Hz, y entre 0.25 y $0.48 \text{ N/m} \times 10^{10}$, respectivamente.

En los eventos con una intensidad $I_{h-Arias}$ menor de 1 cm/s, se obtienen los máximos valores de la frecuencia f_h y rigidez K_h , en cambio en los eventos con una mayor intensidad, los valores de f_h y K_h son menores (figura 24), tal como se aprecia en los eventos 01-1 y 13-3. Se podrá notar que la correlación de f_h y K_h con la intensidad $I_{h-Arias}$ es más destacable en los eventos previos al sismo de moderada intensidad.

En el evento 13-3 se obtienen los valores de f_h y K_h de 2.31 Hz y $0.17 \text{ N/m} \times 10^{10}$, que son los mínimos valores en comparación con el resto de los eventos. Dichos valores difieren en 57.4 y 81.1 % con respecto a los valores de referencia 5.46 Hz y $0.97 \text{ N/m} \times 10^{10}$, respectivamente. Posteriormente, entre los eventos 14-1 al 20-1, las reducciones de f_h son entre 31 y 49 %, y las de las rigideces K_h son entre 50 y 73 % con respecto al evento 01-3.

En los eventos de baja intensidad, el porcentaje de participación en la respuesta en la azotea debido a la traslación en la base X_0/\bar{X}_{tot}^{az} varía entre 2.7 y 6.8 %, en cambio, en el evento 13-3 se obtiene el porcentaje de participación de X_0/\bar{X}_{tot}^{az} es 9.4 %.

Análisis de las frecuencias y rigideces de ISE en el componente T

Los valores de las frecuencias y rigideces de ISE del componente T se muestran en la tabla 10, mientras que en la figura 25 se grafican estos valores.

En el evento 01-1 se obtienen frecuencias y rigideces de ISE menores a las frecuencias estimadas para el evento de referencia 01-3, debido a que la intensidad $I_{h-Arias}$ del evento 01-1 es mayor.

Entre los eventos 01-1 al 12-1 la frecuencia f_1 en promedio es de 0.89 Hz, (DE = 0.06 Hz, CV = 6.6 %), los cocientes f_1/\bar{f}_1 varían entre 1.10 y 1.15, y la rigidez K_1 en promedio es de $0.84 \text{ N/m} \times 10^8$ (DE = 0.09, CV = 11.3 %), teniendo una variabilidad moderada de estos parámetros debido a las diferencias de intensidades que hay entre estos eventos.

En la ocurrencia del evento 13-3, la frecuencia \bar{f}_{1_N4SID} es de 0.58 Hz, de lo que se obtiene en valor de la frecuencia f_1 de 0.65 Hz y el cociente f_1/\bar{f}_1 de 1.12, los cuales difieren 33.6 y 0.9 % con respecto al evento 01-3, respectivamente. La rigidez K_1 también se reduce en el evento 13-3, el valor obtenido es de $0.47 \text{ N/m} \times 10^8$, que es menor en 51.7 % con respecto al valor de referencia $0.98 \text{ N/m} \times 10^8$.

Tabla 10. Frecuencias y rigideces de ISE en el componente T estimadas con el método de Luco en la fase intensa

	\bar{f}_{1_N4SID}	f_h	f_c	f_1	f_1/\bar{f}_1	$\frac{X_b}{\bar{X}_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rL}}{\bar{X}_{tot}^{az}}$	K_h	K_c	K_1
Evento	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	(%)	(%)	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
01-1	0.790	3.751	1.895	0.894	1.13	2.8	15.4	0.46	2.52	0.83
01-2	0.822	3.058	2.019	0.942	1.15	4.5	14.7	0.31	2.86	0.92
01-3 ⁽¹⁾	0.859	3.811	2.090	0.972	1.13	3.2	14.9	0.48	3.08	0.98
02-1	0.805	3.535	2.021	0.906	1.13	3.2	14.1	0.41	2.87	0.86
02-2	0.814	3.355	2.086	0.917	1.13	3.7	13.5	0.37	3.06	0.89
02-3	0.825	4.252	2.067	0.921	1.12	2.3	14.1	0.59	3.00	0.90
02-4	0.820	3.728	2.053	0.921	1.12	3.0	14.1	0.46	2.96	0.89
03-1	0.773	2.757	2.033	0.878	1.13	4.9	12.8	0.25	2.90	0.82
04-1	0.797	3.582	2.092	0.887	1.11	3.1	12.9	0.42	3.08	0.84
07-1	0.750	2.993	1.987	0.842	1.12	3.9	12.6	0.29	2.77	0.76
11-1	0.713	2.767	1.988	0.795	1.11	4.1	11.4	0.25	2.78	0.69
12-1	0.701	2.901	2.017	0.773	1.10	3.6	10.7	0.28	2.86	0.66
13-3	0.576	1.806	1.810	0.646	1.12	6.3	9.0	0.11	2.30	0.47
14-1	0.598	2.112	2.153	0.652	1.09	5.0	6.9	0.15	3.26	0.49
14-2	0.603	1.912	2.157	0.665	1.10	6.2	6.9	0.12	3.27	0.51
14-3	0.621	2.057	2.194	0.683	1.10	5.7	7.1	0.14	3.38	0.54
17-1	0.646	2.514	2.081	0.706	1.09	4.1	8.5	0.21	3.04	0.56
17-2	0.621	2.318	2.036	0.680	1.09	4.5	8.3	0.18	2.91	0.53
17-3	0.674	2.359	2.219	0.741	1.10	5.1	8.2	0.18	3.46	0.63
17-4	0.651	2.304	2.111	0.717	1.10	5.0	8.4	0.17	3.13	0.58
18-1	0.616	1.888	1.990	0.689	1.12	6.6	8.5	0.12	2.78	0.54
18-2	0.671	2.164	2.115	0.749	1.12	6.0	8.9	0.15	3.14	0.63
18-3	0.674	2.129	2.105	0.754	1.12	6.2	9.1	0.15	3.11	0.64
20-1	0.640	2.301	2.201	0.699	1.09	4.8	7.5	0.17	3.40	0.56
21-1 ⁽²⁾	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
22-1	0.691	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
22-2	0.656	2.407	2.085	0.721	1.10	4.6	8.8	0.19	3.05	0.59

⁽¹⁾Evento de referencia para la evaluación del estado físico del edificio.

⁽²⁾Réplica del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 de M 7.1, que no se registró en la red acelerográfica del edificio.

n.d.-Dato no disponible porque hay problemas con los registros.

Entre los eventos 14-1 al 14-3, la frecuencia f_1 varía entre 0.65 y 0.68 Hz, teniendo diferencias menores de 3 % con respecto al valor obtenido en el evento 13-3 (0.65 Hz). Posteriormente entre los eventos 17-1 a 20-1, la frecuencia f_1 varía entre 0.68 y 0.75 Hz, asemejando una recuperación parcial con respecto al evento 13-3. En el evento 20-1 previo al sismo de alta intensidad, la frecuencia es de 0.70 Hz, teniendo la recuperación parcial de 5.5 % con respecto al evento 13-3 y una reducción de 28.1 % con respecto al valor de referencia 0.97 Hz. La recuperación parcial de la frecuencia f_1 que

persiste entre los eventos 14-1 al 20-1, es un indicio del daño acumulable, mismo que está reflejado en la reducción de la rigidez de la estructura.

En los eventos 21-1 y 22-1 no se tienen estimaciones coherentes de las frecuencias y rigideces de ISE debido a los problemas con los registros capturados en la base y en la azotea del edificio. Ahora bien, en el último evento 22-2, el valor de la frecuencia f_1 de 0.72 Hz representa una reducción de 25.8 % con respecto al valor de referencia 0.97 Hz, mientras que el cociente f_1/\bar{f}_1 permanece en 1.10, que es 2.7 % menor en comparación al valor de referencia 1.13. La rigidez K_1 obtenida en este último evento es de $0.59 \text{ N/m} \times 10^8$, manteniéndose casi igual al valor obtenido en el evento 20-1 previo al sismo de alta intensidad. Con ello la reducción de la rigidez persiste en 39.6 % con respecto al evento 01-3.

En la figura 25 se aprecia que en el evento 13-3 ocurre la mayor reducción de la frecuencia f_c , y la rigidez K_c obteniendo los valores de 1.81 Hz y $2.30 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$, respectivamente, los cuales difieren en 15.8 y 27.0 % con respecto a los valores de referencia 2.09 Hz y $3.08 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$.

A pesar de que f_c y K_c se reducen en el evento 13-3, se tiene la recuperación en el evento posterior y una tendencia hasta el evento 20-1. En el evento 20-1, el valor de la frecuencia f_c es de 2.20 Hz, que es 3.9 % mayor con respecto al evento 01-3, y en el evento 22-2, después del sismo de alta intensidad de 07 de septiembre de 2021, la frecuencia f_c se reduce a 2.08 Hz, que es prácticamente el mismo valor obtenido en el evento de referencia 01-3. En el evento 20-1, la rigidez K_c es de $3.40 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$, que es 8.0 % mayor con respecto al valor de referencia $3.03 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$ y en el evento 22-2, el valor de K_c de $3.05 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$ es equiparable con el del evento 01-3.

Entre los eventos 01-1 a 12-1 los porcentajes de participación del cabeceo de la base en la respuesta total $H\Phi_{rL}/\bar{X}_{tot}^{az}$ son mayores de 10 %, en los eventos subsecuentes al evento 13-3 los porcentajes varían entre 7.0 y 9.0 %, y en el último evento 22-2 el porcentaje de participación es de 8.8 %, lo que refleja la disminución de los efectos de ISE en este componente.

En la figura 25 se aprecia la aparente correlación que tienen la frecuencia f_c y la rigidez K_c con la intensidad $I_{h-Arias}$. Destaca en los eventos con una $I_{h-Arias}$ mayor de 6 cm/s una reducción significativa de estos parámetros con respecto al valor de referencia. Siendo más notable en los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 17-2 y 18-1.

Se puede apreciar que los valores de la frecuencia de traslación de la base f_h estimados entre los eventos 01-1 al 12-1 tienen una alta variabilidad, siendo en promedio de 3.43 Hz (DE = 0.46 Hz y el CV = 13.4%). Entre los eventos 14-1 a 20-1 la frecuencia f_h en promedio es de 2.19 Hz (DE = 0.19 Hz, CV = 8.8 %). Después del evento de moderada intensidad, en el evento 22-2 la frecuencia f_h es de 2.08 Hz, que es 37.2 % menor con respecto al valor 3.81 Hz de referencia.

Semejante a la variación de la frecuencia f_h , se aprecia la reducción de la rigidez K_h después del evento 13-3. Entre los eventos 01-1 a 12-1, f_h varía entre 0.25 y $0.59 \text{ N/m} \times 10^{10}$. Entre los eventos 14-1 a 22-2 varía entre 0.12 y $0.22 \text{ N/m} \times 10^{10}$, con diferencias entre 57 y 76 % respecto al valor de referencia $0.48 \text{ N/m} \times 10^{10}$. Después del sismo de alta intensidad de 2021, la rigidez K_h es de $0.19 \text{ N/m} \times 10^{10}$, teniendo la reducción de 60.6 % con respecto al evento 01-3.

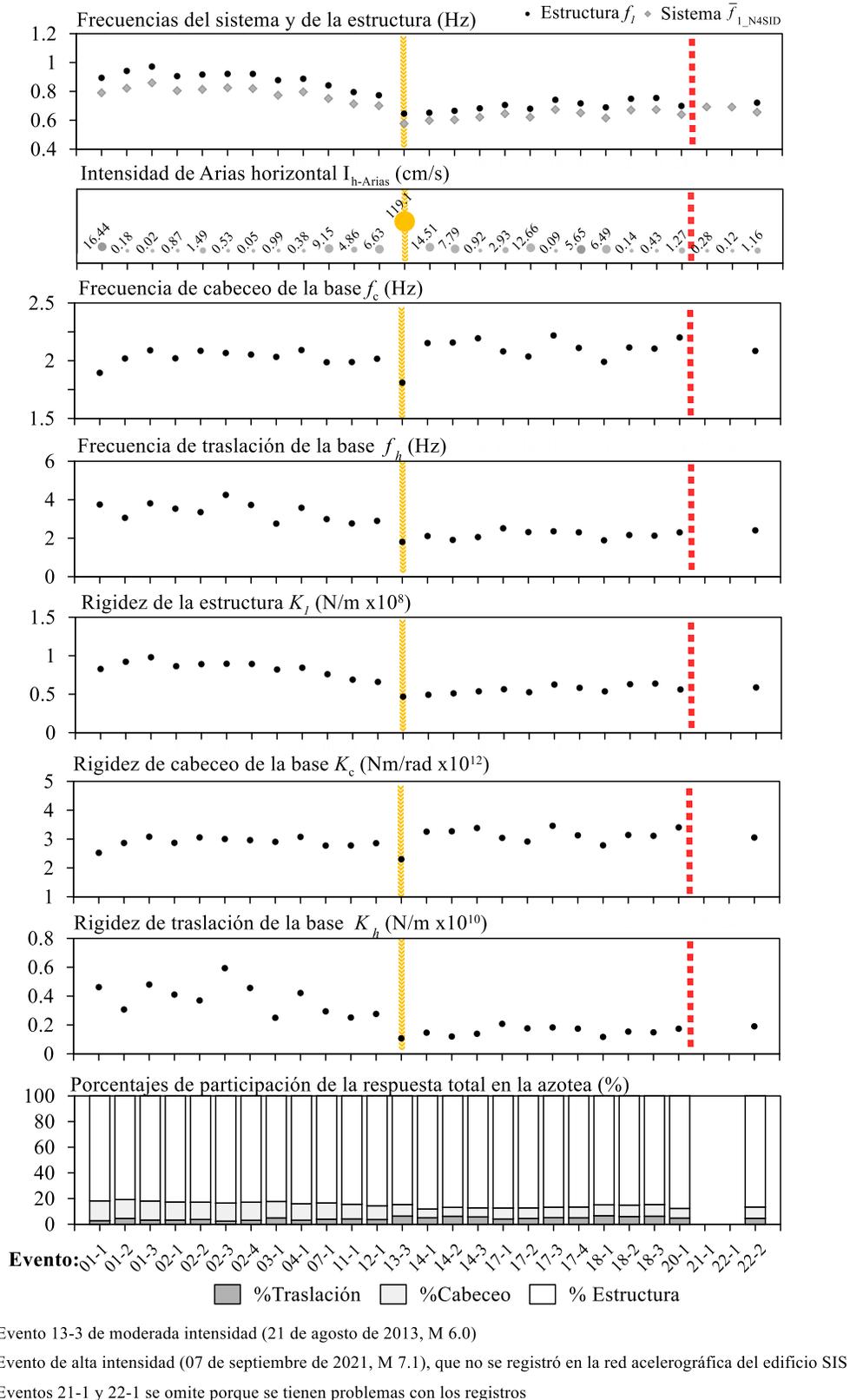


Figura 25. Frecuencias y rigideces de ISE en el componente T estimadas con el método de Luco en la fase intensa

Entre los eventos 01-1 al 12-1 se aprecia la correlación de f_h y K_h con la intensidad $I_{h-Arias}$. En los eventos con una intensidad $I_{h-Arias}$ menor de 1 cm/s se tienen los máximos valores. En los eventos posteriores al evento 13-3, esta correlación con la intensidad $I_{h-Arias}$ es menos apreciable.

En los eventos previos al suceso 13-3, los porcentajes de participación en la respuesta en la azotea debidos a la traslación en la base X_b/\bar{X}_{tot}^{az} varían entre 2.3 y 4.5 % y entre los eventos posteriores los porcentajes varían entre 4.1 y 6.6 %.

Análisis de las frecuencias y rigideces de ISE de torsión

En la tabla 11 se presentan los valores obtenidos de las frecuencias torsión del sistema \bar{f}_{1t} , la frecuencia de torsión la estructura f_{1t} y la frecuencia de torsión de la base f_r , el cociente de frecuencias de torsión f_{1t}/\bar{f}_{1t} y el porcentaje de participación en la respuesta total de la azotea debido a la torsión de la base $\Phi_{rV}/\bar{\Phi}_{tot}^{az}$, además, se tienen los valores de las rigideces de torsión de la estructura K_{1t} y de torsión de la base K_r . En la figura 26 se grafican los parámetros mencionados.

Se puede apreciar que los valores obtenidos del cociente f_{1t}/\bar{f}_{1t} se aproximan a la unidad (tabla 11), lo que significa que el movimiento de torsión de la base tiene poca contribución en el movimiento total del sistema suelo-estructura.

La respuesta total de torsión en la azotea está asociada en mayor porcentaje a la torsión de la estructura, mientras que la contribución de la torsión en la base a la respuesta total en la azotea es menor de 3 %. En los eventos 02-2, 14-1, 14-2, 14-3, 18-2, 18-3 y 21-1, los porcentajes de participación debido a la torsión en la base $\Phi_{rV}/\bar{\Phi}_{tot}^{az}$ son menores de 1 %, que corresponden a eventos con intensidades $I_{h-Arias}$ menores de 1.50 cm/s.

En la figura 26 se distingue la reducción de la frecuencia de torsión de la estructura f_{1t} en relación con la reducción de la frecuencia $f_{1t,N4SID}$ que se muestra en la sección 2.1. La reducción de la frecuencia f_{1t} así como de la rigidez K_{1t} se aprecia principalmente entre los eventos 14-1 al 20-1, después del suceso 13-3 de moderada intensidad, y entre los eventos 21-1 al 22-2, se distingue la reducción de f_{1t} y K_{1t} con respecto al evento 20-1 a causa del sismo de alta intensidad (07 de septiembre de 2021, M 7.1).

En el evento 13-3, el valor de la frecuencia f_{1t} es de 1.04 Hz, es menor en 28.4 % con respecto al evento 01-3, mientras que el cociente f_{1t}/\bar{f}_{1t} es de 1.014, es prácticamente el igual al valor estimado en el evento 01-3 (1.011). En este evento la rigidez K_{1t} es de $2.19 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$, con una reducción de 48.9 % con respecto al evento 01-3.

Entre los eventos 14-1 al 20-1, la frecuencia de torsión f_{1t} varía entre 1.03 y 1.17 Hz, y en promedio es de 1.10 Hz (DE = 0.05 Hz, CV = 4.5 %), es decir se mantienen sin cambios durante estos eventos. En el evento 20-1 la frecuencia f_{1t} es de 1.13 Hz, teniendo una recuperación parcial de 6.0 % con respecto al evento 13-3, y con respecto al evento 01-3 hay una reducción de 22.4 %, mientras que la rigidez K_{1t} es de $2.57 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$, es 31.9 % menor con respecto al valor de referencia $4.28 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$, y en 8.9 % mayor con respecto al evento 13-3.

En el último evento 22-2, el valor de la frecuencia f_{1t} es de 1.04 Hz, el cual es 28.2 % menor con respecto al evento 01-3, y la rigidez K_{1t} es de $2.20 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$, que es 40.1 % menor con respecto al evento 01-3. Dichos valores se aproximan con los obtenidos en el evento 13-3 de moderada intensidad.

La frecuencia de torsión de la base f_r presenta una variación considerable, fluctuando entre 6.25 y 11.45 Hz, con un valor promedio de 9.16 Hz, (DE =1.65 Hz, CV = 18.0 %). En la figura 26, se observa que no existe una tendencia de los valores de la frecuencia f_r y rigidez K_r , ni una correlación con la intensidad $I_{h-Arias}$.

En el evento 13-3, el valor de la frecuencia f_r es de 6.25 Hz, el cual es menor en 43.1 % en comparación con el valor de referencia 9.92 Hz, mientras que la rigidez K_r es de 1.50 Nm/rad x10¹² que es 60.3% menor con respecto al evento 01-3.

Entre los eventos 14-1 y 14-2 se obtienen porcentajes de participación de torsión de la base en la respuesta total en la azotea, dando como resultado valores de la frecuencia f_r y rigidez K_r altos en comparación con los valores de referencia, si bien no queda claro a qué se debe ya que no corresponden a eventos de muy baja intensidad.

Tabla 11. Frecuencias y rigideces de ISE de torsión estimadas con el método de Luco en la fase intensa

Evento	\bar{f}_{1t_N4SID}	f_r	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	$\frac{\Phi_{rV}}{\Phi_{tot}^{az}}$	K_r	K_{1t}
	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	(%)	Nm/rad x10 ¹²	Nm/rad x10 ¹⁰
01-1	1.291	8.585	1.306	1.012	1.6	2.83	3.45
01-2	1.367	9.933	1.380	1.010	1.4	3.79	3.85
01-3 ⁽¹⁾	1.440	9.922	1.456	1.011	1.5	3.78	4.28
02-1	1.325	9.777	1.337	1.009	1.3	3.67	3.61
02-2	1.329	11.447	1.338	1.007	1.0	5.03	3.62
02-3	1.357	10.885	1.368	1.008	1.1	4.55	3.78
02-4	1.312	9.570	1.324	1.010	1.4	3.52	3.54
03-1	1.285	8.377	1.300	1.012	1.7	2.69	3.42
04-1	1.345	10.603	1.356	1.008	1.2	4.31	3.72
07-1	1.257	9.934	1.267	1.008	1.2	3.79	3.25
11-1	1.247	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
12-1	1.203	7.355	1.220	1.014	1.9	2.08	3.01
13-3	1.026	6.250	1.041	1.014	2.0	1.50	2.19
14-1	1.049	11.303	1.053	1.004	0.6	4.90	2.24
14-2	1.025	10.762	1.029	1.005	0.7	4.45	2.14
14-3	1.084	9.757	1.090	1.006	0.9	3.65	2.40
17-1	1.105	6.674	1.121	1.014	2.0	1.71	2.54
17-2	1.080	7.503	1.092	1.011	1.5	2.16	2.41
17-3	1.142	6.576	1.160	1.015	2.2	1.66	2.72
17-4	1.131	7.385	1.144	1.012	1.7	2.09	2.65
18-1	1.043	6.927	1.055	1.012	1.1	1.84	2.25
18-2	1.127	11.151	1.133	1.005	0.7	4.77	2.59
18-3	1.162	10.592	1.169	1.006	0.9	4.31	2.76
20-1	1.115	7.455	1.127	1.011	1.6	2.13	2.57
21-1 ⁽²⁾	1.111	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
22-1	1.085	7.776	1.096	1.010	1.4	2.32	2.43
22-2	1.035	8.487	1.043	1.008	1.1	2.76	2.20

⁽¹⁾Evento de referencia para la evaluación del estado físico del edificio SIS.

⁽²⁾Réplica del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 de M 7.1, que no se registró en la red acelerográfica del edificio SIS.

n.d.-Dato no disponible porque hay problemas con los registros.

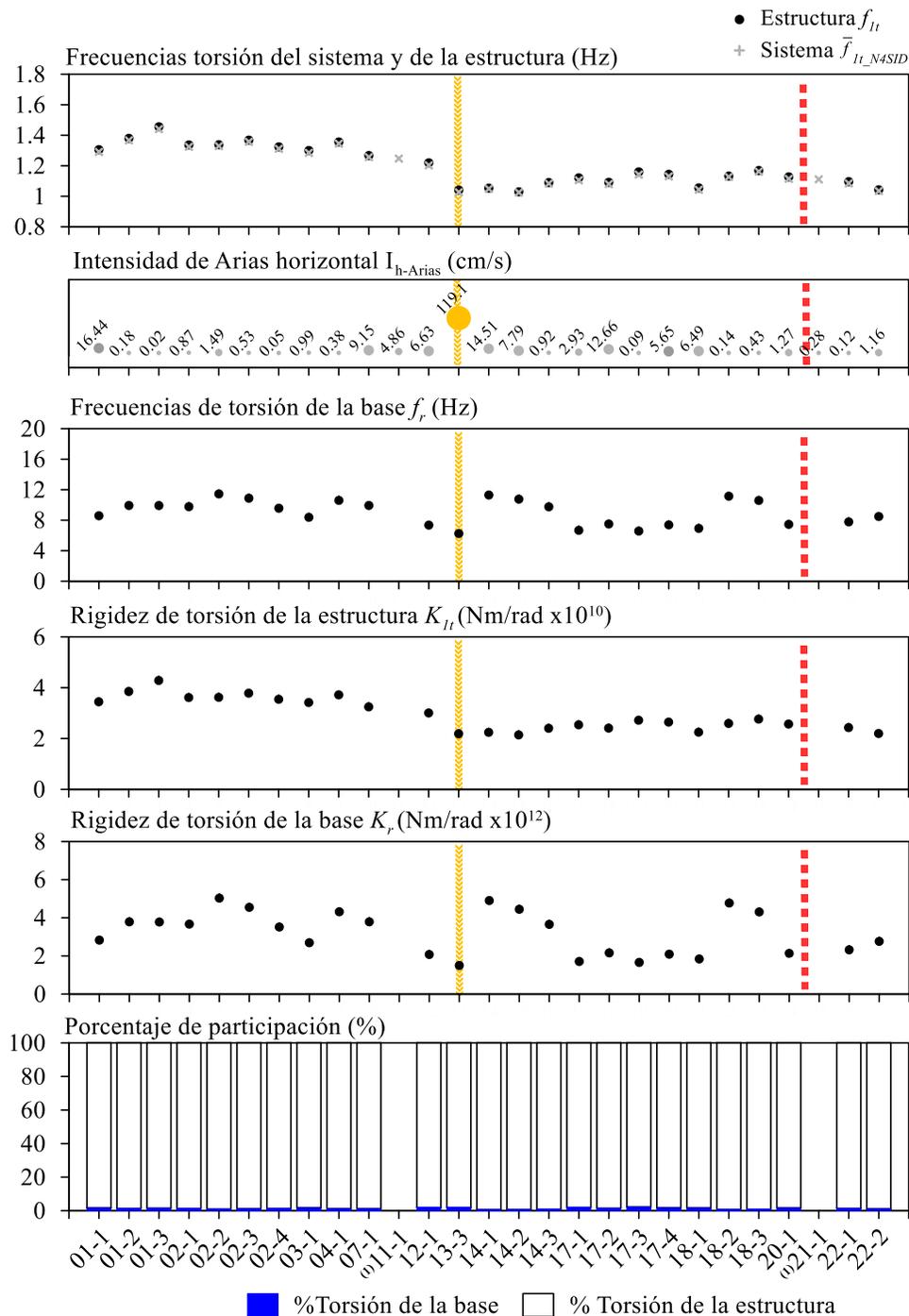


Figura 26. Frecuencias y rigideces de ISE de torsión estimadas con el método de Luco en la fase intensa

3.2.2 Estimación en la fase final

Los resultados de los efectos de ISE utilizando los tramos de la fase final de los registros sísmicos se encuentran en las tablas 12 a 14, correspondientes a los componentes L, T y torsión, respectivamente. El cálculo de las frecuencias y rigideces de ISE en la fase final parte de los valores de frecuencias de sistema $\bar{f}_{1_{N4SID}}$ que se presentan en la tabla 4 del subcapítulo 2.3.

Las tablas 12 y 13 muestran los valores de las frecuencias de la estructura f_1 , cabeceo de la base f_c y traslación de la base f_h en los componentes L y T, junto a las correspondientes las rigideces K_1 , K_c y K_h , respectivamente. Además, las tablas contienen los porcentajes de participación en la respuesta total en la azotea debido al cabeceo en la base $H\Phi_r/\bar{X}_{tot}^{az}$, y los porcentajes de traslación en la base X_b/\bar{X}_{tot}^{az} .

La tabla 14 contiene los valores de la frecuencia de torsión de la estructura f_{1t} , la frecuencia de torsión de la base f_r , así como las rigideces asociadas K_{1t} y K_r , que se obtienen a partir de los valores de frecuencias del sistema $\bar{f}_{1t_{N4SID}}$. Además, se indican los cocientes de frecuencias de torsión $f_{1t}/f_{1t_{N4SID}}$ y los porcentajes de la participación de torsión en la base ($\Phi_{rv}/\bar{\Phi}_{tot}^{az}$) en la respuesta total en la azotea.

Análisis de las frecuencias y rigideces de ISE en el componente L

Entre los eventos 01-1 al 12-1, la frecuencia f_1 en promedio varía en 1.26 Hz (DE = 0.03 Hz y el CV = 2.4 %) habiendo una baja variación al inicio del monitoreo, los valores de los cocientes f_1/\bar{f}_1 varían entre 1.18 y 1.23. La rigidez K_1 promedio es de $1.83 \text{ N/m} \times 10^8$ (DE = $0.06 \text{ N/m} \times 10^8$ y el CV = 3.4 %).

En el evento 13-3, el valor de la frecuencia f_1 es de 1.12 Hz, con respecto al evento 01-3 hay una reducción de 14.5 %. El valor del cociente f_1/\bar{f}_1 es de 1.18, que es 2.9 % menor con respecto al valor de 1.22 obtenido en el evento 01-3, y la rigidez K_1 es de $1.56 \text{ N/m} \times 10^8$, que es menor en 19.6 % con respecto al evento 01-3.

Entre los eventos 14-1 al 20-1, la frecuencia f_1 varía entre 1.07 y 1.15 Hz, obteniendo cocientes f_1/\bar{f}_1 entre 1.15 y 1.18, y la rigidez K_1 varía entre 1.45 y $1.62 \text{ N/m} \times 10^8$, difiriendo entre 16 y 25 % con respecto al evento 01-3. En la figura 27 se observa que, en estos eventos los valores de la frecuencia f_1 y la rigidez K_1 se mantienen similares a los obtenidos en el evento 13-3.

En el evento 21-1, después del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 de M 7.1, el valor de la frecuencia f_1 es de 0.98 Hz, que corresponde a una reducción de 25.1 % con respecto al evento 01-3, mientras que la rigidez K_1 es de $1.23 \text{ N/m} \times 10^8$, que es menor en 36.7 % con respecto al evento de referencia 01-3.

En los eventos 22-1 y 22-2 también se tiene la reducción de f_1 con respecto al evento 20-1 a causa de la ocurrencia del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021. En el último evento 22-2, la frecuencia f_1 es de 0.95 Hz, teniendo una reducción de 27.4 % con respecto al evento 01-3, la relación de f_1/\bar{f}_1 disminuye a 1.14, difiriendo en 6.6 % con respecto al evento 01-3, y la rigidez K_1 es de $1.20 \text{ N/m} \times 10^8$, que es menor en 39.3 % con respecto al evento 01-3.

En cuanto a la frecuencia de cabeceo de la base (f_c), entre los eventos 01-1 al 12-1, el valor promedio de f_c es de 2.0 Hz (DE = 0.06 Hz, CV = 2.9 %), habiendo diferencias inferiores al 5.2 % con respecto al valor de 2.02 Hz de referencia. Mientras que entre los eventos 14-1 y 20-1, la frecuencia f_c en

promedio es 2.07 Hz (DE = 0.04 Hz, CV = 2.1 %), obteniendo frecuencias f_c mayores hasta 7.3 % con respecto al valor de referencia 2.02 Hz.

Tabla 12. Frecuencias y rigideces de ISE en el componente L estimadas en la fase final con el método de Luco

Evento	\bar{f}_{1_N4SID}	f_h	f_c	f_1	f_1/\bar{f}_1	$\frac{X_b}{\bar{X}_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{\bar{X}_{tot}^{az}}$	K_h	K_c	K_1
	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	(%)	(%)	N/m x10 ¹⁰	Nm/rad x10 ¹²	N/m x10 ⁸
01-1	1.028	5.240	1.917	1.252	1.22	2.7	28.7	0.90	2.59	1.77
01-2	1.034	4.639	1.935	1.268	1.23	3.5	28.5	0.70	2.63	1.81
01-3 ⁽¹⁾	1.074	5.281	2.023	1.308	1.22	3.0	28.2	0.92	2.88	1.94
02-1	1.024	4.704	1.946	1.246	1.22	3.3	27.7	0.72	2.66	1.77
02-2	1.042	5.654	1.965	1.258	1.21	2.4	28.0	1.04	2.72	1.81
02-3	1.044	5.562	1.977	1.261	1.21	2.5	27.9	1.01	2.75	1.82
02-4	1.070	5.493	1.999	1.302	1.22	2.7	28.6	0.99	2.81	1.91
03-1	1.040	5.137	1.959	1.263	1.21	2.9	28.1	0.86	2.70	1.81
04-1	1.070	5.493	1.999	1.302	1.22	2.7	28.6	0.99	2.81	1.91
07-1	1.035	4.727	2.076	1.234	1.19	3.4	24.8	0.73	3.03	1.81
11-1	1.026	4.755	2.090	1.216	1.18	3.3	24.1	0.74	3.07	1.77
12-1	1.005	3.456	2.069	1.219	1.21	5.9	23.5	0.39	3.01	1.77
13-3	0.945	3.357	2.084	1.118	1.18	5.6	20.6	0.37	3.06	1.56
14-1	0.934	4.717	2.075	1.073	1.15	2.7	20.2	0.73	3.03	1.46
14-2	0.931	4.740	2.017	1.075	1.16	2.7	21.3	0.73	2.86	1.45
14-3	0.929	3.591	2.021	1.094	1.18	4.7	21.1	0.42	2.87	1.49
17-1	0.947	4.593	2.088	1.092	1.15	3.0	20.5	0.69	3.07	1.50
17-2	0.954	4.601	2.050	1.108	1.16	3.0	21.6	0.69	2.96	1.53
17-3	0.941	3.880	2.097	1.095	1.16	4.1	20.1	0.49	3.09	1.51
17-4	0.977	4.140	2.068	1.150	1.18	3.9	22.3	0.56	3.01	1.62
18-1	0.924	3.438	2.047	1.086	1.18	5.1	20.4	0.39	2.95	1.48
18-2	0.919	3.368	2.047	1.080	1.18	5.2	20.1	0.37	2.95	1.47
18-3	0.961	3.928	2.171	1.114	1.16	4.2	19.6	0.50	3.32	1.58
20-1	0.952	4.613	2.088	1.100	1.16	3.0	20.8	0.69	3.07	1.52
21-1 ⁽²⁾	0.861	4.911	1.945	0.979	1.14	2.2	19.6	0.79	2.66	1.23
22-1	0.860	3.888	2.021	0.980	1.14	3.4	18.1	0.49	2.87	1.25
22-2	0.835	3.759	1.982	0.949	1.14	3.5	17.7	0.46	2.76	1.18

⁽¹⁾Evento de referencia para la evaluación del estado físico del edificio SIS.

⁽²⁾Réplica del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 de M 7.1, que no se registró en la red acelerográfica del edificio SIS.

En el evento 20-1 previo al sismo de alta intensidad, el valor de f_c es 2.09 Hz, que es 3.9 % menor con respecto al valor del evento 01-3, y el valor de la rigidez K_c es 2.66 Nm/rad x10¹² representa una reducción de 3.8 % con respecto al evento 01-3.

En el último evento 22-2 también muestra una reducción con respecto al evento 01-3, aunado a la ocurrencia del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021. El valor de la frecuencia f_c obtenido es de 1.97 Hz, que es 2.5 % con respecto al valor de referencia 2.02 Hz, mientras que la rigidez K_c es de 2.74 Nm/rad x10⁸, que es 5.0 % menor con respecto al valor de 2.95 Nm/rad x10¹² obtenido en el evento 01-3.

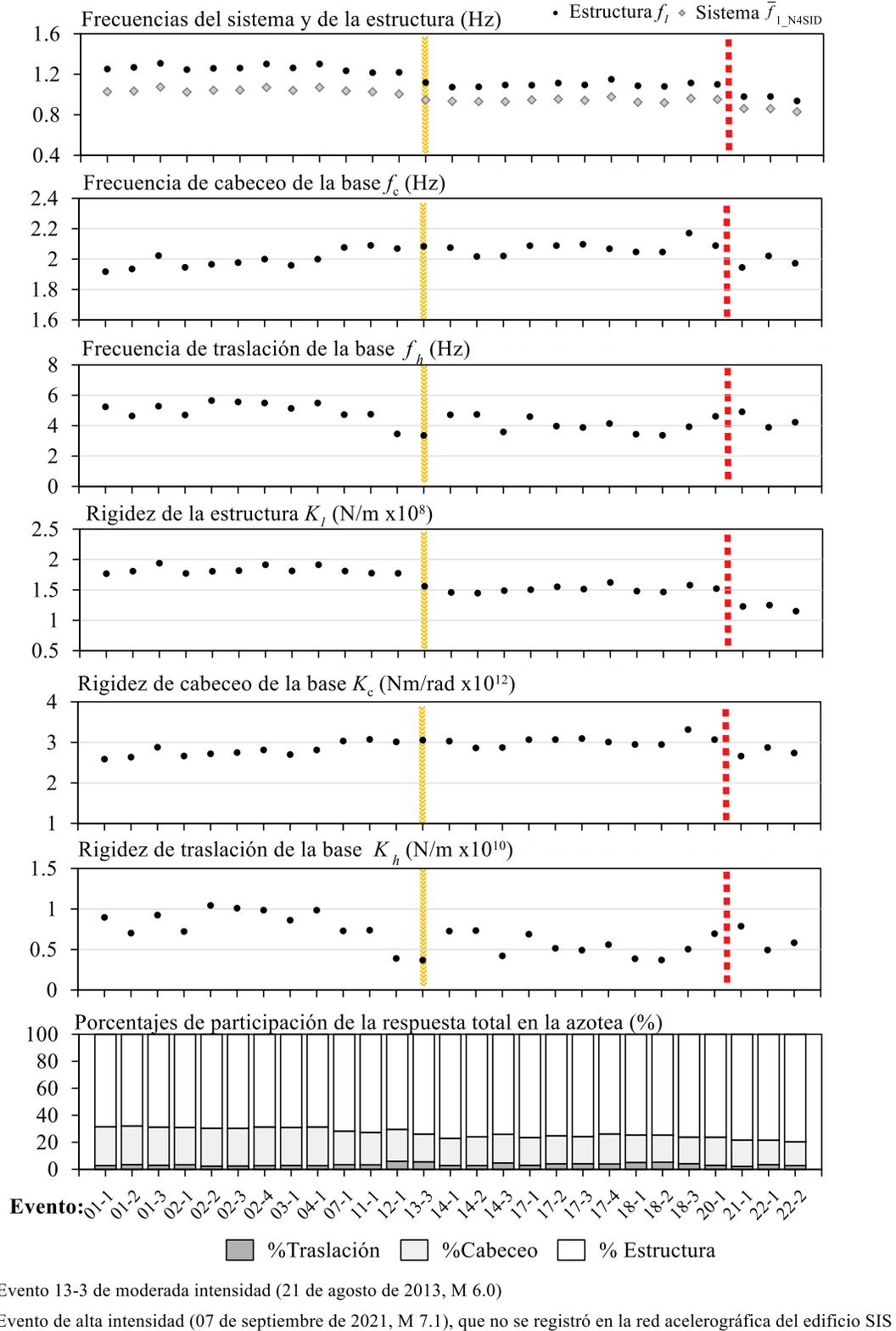


Figura 27. Frecuencias y rigideces de ISE en el componente L estimadas con el método de Luco utilizando el tramo de la fase final

El porcentaje de participación en la respuesta total en la azotea debido al cabeceo en la base ($H\Phi_{rT}/\bar{X}_{tot}^{az}$) obtenido entre los eventos 01-1 al 12-1 varía entre 23.5 y 28.7 %, en el evento 13-3 el porcentaje de participación desciende a 20.5 %, entre los eventos posteriores 14-1 al 20-1, el porcentaje varía entre 19.6 y 22.3 %, y en los eventos 22-1 al 22-2 los porcentajes de participación son del orden de 18 %. Con lo que se deduce la reducción de la contribución de la relación $H\Phi_{rT}/\bar{X}_{tot}^{az}$ en 36.9 % con respecto a la contribución de 28.1 % que se obtuvo en el evento 01-3.

Con referencia a la frecuencia de traslación de la base (f_h), entre los eventos 01-1 a 12-1, los valores de f_h varían entre 3.46 y 5.65 Hz, posteriormente en el evento 13-3 se obtiene el valor de 3.36 Hz, observado en la figura 27, este valor corresponde al mínimo valor en comparación con el resto de los eventos. En los eventos subsecuentes 14-1 al 20-1, los valores de f_h varían entre 3.37 y 4.91 Hz, teniendo diferencias entre 7 y 36 % con respecto al valor de referencia 5.28 Hz. En los eventos 21-1 y 22-1, las diferencias son menores del 9 % en comparación del evento 01-3, mientras que en el último evento 22-2, el valor obtenido es de 4.23 Hz, con una reducción de 20.0 % con respecto al valor de referencia 5.28 Hz.

En cuanto a las rigideces de traslación de la base (K_h), los valores obtenidos entre los eventos 01-1 al 12-1 varían en entre 0.39 y 1.04 N/m x 10¹⁰. En el evento 13-3, el valor de K_h es de 0.37 N/m x 10¹⁰, que es 60.2 % menor con respecto al evento 01-3. Posteriormente, entre los eventos 14-1 a 20-1 varía entre 0.37 y 0.79 N/m x 10¹⁰, con reducciones entre 15 y 60 % con respecto al valor de referencia 0.92 N/m x 10¹⁰. En el evento 22-2 el valor de K_h es de 0.58 N/m x 10¹⁰, que es 36.9 % menor con respecto al valor 0.92 N/m x 10¹⁰ obtenido en el evento 01-3 de referencia.

Análisis de las frecuencias y rigideces de ISE en el componente T

Entre los eventos 01-1 y 04-1, la frecuencia f_1 tiene un valor promedio de 0.93 Hz (DE = 0.02 Hz, CV = 2.2 %), el cociente f_1/\bar{f}_1 varía entre 1.11 y 1.14. Referente a la rigidez K_1 , el valor promedio es de 0.90 N/m x 10⁸ (DE = 0.03 N/m x 10⁸, CV = 3.6 %) en estos primeros eventos. En la figura 28 se aprecia la baja variabilidad de f_1 y K_1 entre estos primeros eventos.

Posteriormente entre los eventos 07-1 al 12-1, la recuperación f_1 y K_1 es parcial, teniendo una evidente reducción de estos parámetros en comparación con el evento 01-3. En particular, los valores de f_1 y K_1 obtenidos en el evento 12-1 previo al sismo de moderada intensidad son 0.80 Hz y 0.72 N/m x 10⁸, teniendo reducciones de 17.5 y 27.0 % con respecto a los valores de referencia 0.97 Hz y 0.98 N/m x 10⁸, respectivamente.

En el evento 13-3, de moderada intensidad, el valor de la frecuencia f_1 es de 0.75 Hz, el cual representa una reducción de 22.7 % con respecto al valor de referencia 0.97 Hz. El cociente $f_1/\bar{f}_1 = 1.12$, que es 1.2 % menor con respecto al valor 1.14 de referencia. Por otro lado, el valor de la rigidez K_1 es de 0.63 N/m x 10⁸, que es 35.9 % menor con respecto al valor de referencia 0.98 N/m x 10⁸.

Entre los eventos 14-1 al 20-1, los valores de la frecuencia f_1 varían entre 0.73 y 0.77 Hz, en promedio 0.75 Hz (DE = 0.01 Hz, CV = 1.8 %), teniendo una baja variación entre estos eventos. Los valores del cociente de frecuencias f_1/\bar{f}_1 varían entre 1.08 y 1.12. Entre estos eventos, la rigidez K_1 varía entre 0.61 y 0.68 N/m x 10⁸, en la figura 28 se observa que durante estos eventos no hay una recuperación de la frecuencia f_1 , ni de la rigidez K_1 , con respecto al evento 13-3.

En el evento 20-1, el valor de la frecuencia f_1 es 0.75 Hz, que es 23.5 % menor con respecto al valor de referencia 0.97 Hz, y en los eventos 22-1 y 22-2, posteriores al sismo de alta intensidad (07 de

septiembre de 2021), se obtienen valores muy similares al valor obtenido en el evento 20-1. Entre los eventos 22-1 al 22-2, la rigidez K_1 oscila alrededor de $0.65 \text{ N/m} \times 10^8$. Para el caso del último evento 22-2, las reducciones de f_1 y K_1 son de 24.7 y 37.7 % con respecto a los valores de referencia 0.97 Hz y $0.98 \text{ N/m} \times 10^8$, respectivamente.

En los valores de la frecuencia f_c y de la rigidez K_c que aparecen en la figura 28 se distingue el incremento durante el periodo del monitoreo. Entre los eventos 01-1 a 12-1 la frecuencia en promedio es 2.05 Hz (DE = 0.04 Hz, CV = 1.9 %), entre los eventos 13-3 al 20-1 en promedio es 2.18 Hz (DE = 0.09 Hz, CV = 4.3 %), y en el evento 22-2, el valor obtenido de f_c es 2.26 Hz, el cual es 5.5 % mayor con respecto al valor de referencia 2.09 Hz. En cuanto a la rigidez K_c , del evento 01-1 al 12-1 varía entre 2.77 y $3.08 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$, entre los eventos 13-3 al 20-1 varía entre 2.91 y $3.77 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$, y en el último evento 22-2, el valor de K_c es $3.60 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$, que es 16.7 % mayor con respecto al valor de referencia $3.08 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$.

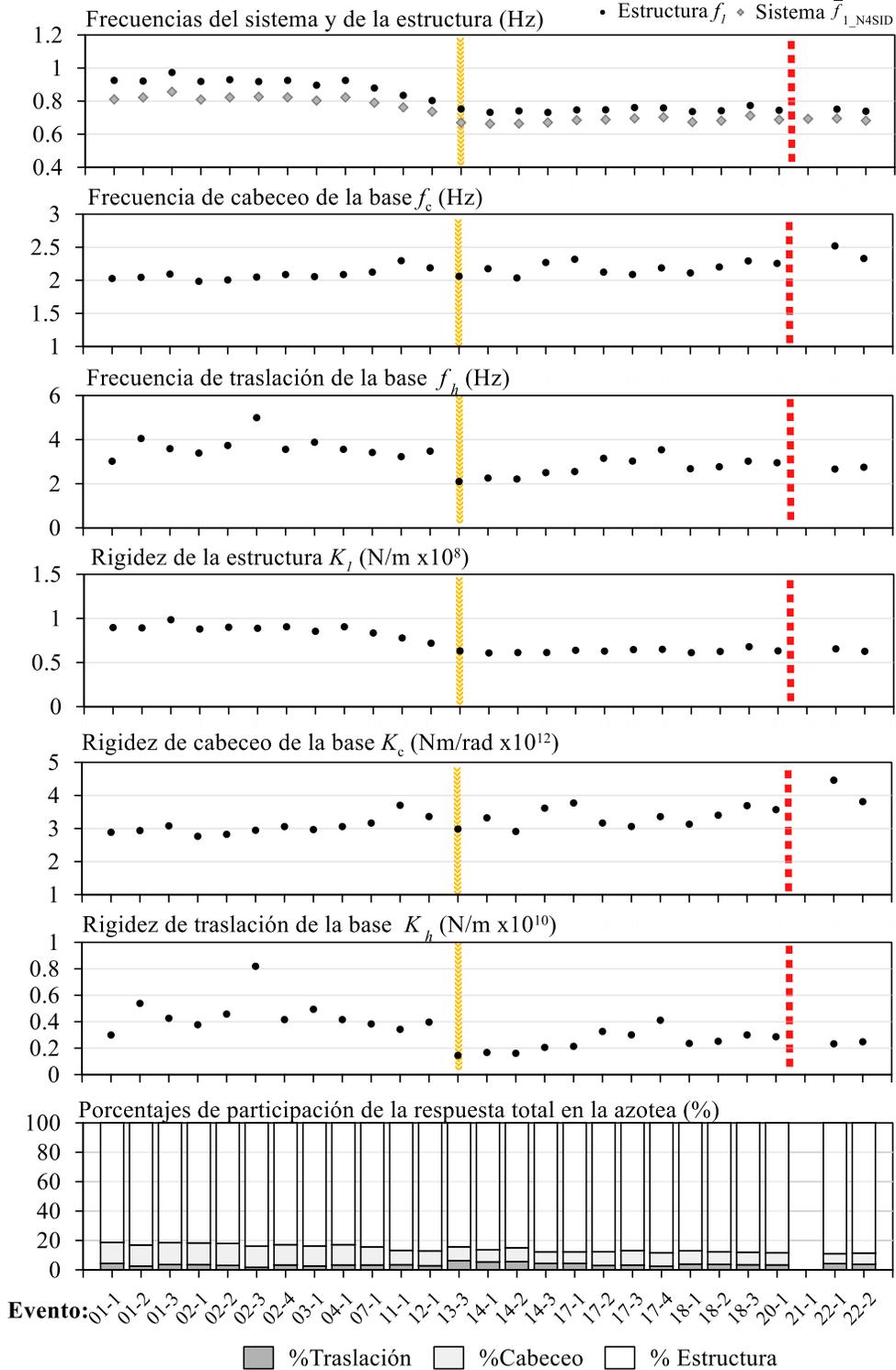
Tabla 13. Frecuencias y rigideces de ISE del componente T estimadas con el método de Luco utilizando el tramo de la fase final

Evento	\bar{f}_{1_NASID}	f_h	f_c	f_1	f_1/\bar{f}_1	$\frac{X_b}{\bar{X}_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rL}}{\bar{X}_{tot}^{az}}$	K_h	K_c	K_1
	(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	(%)	(%)	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
01-1	0.811	3.019	2.027	0.925	1.14	4.5	14.2	0.30	2.89	0.90
01-2	0.822	4.049	2.045	0.921	1.12	2.6	14.3	0.54	2.94	0.89
01-3 ⁽¹⁾	0.856	3.587	2.093	0.973	1.14	3.6	14.9	0.43	3.08	0.98
02-1	0.810	3.389	1.984	0.919	1.13	3.5	14.8	0.38	2.77	0.88
02-2	0.823	3.733	2.005	0.929	1.13	3.0	14.9	0.46	2.82	0.90
02-3	0.826	4.994	2.048	0.918	1.11	1.7	14.4	0.82	2.95	0.89
02-4	0.823	3.558	2.087	0.925	1.12	3.3	13.8	0.42	3.06	0.90
03-1	0.804	3.879	2.055	0.896	1.12	2.7	13.6	0.49	2.97	0.85
04-1	0.823	3.558	2.087	0.925	1.12	3.3	13.8	0.42	3.06	0.90
07-1	0.790	3.416	2.123	0.879	1.11	3.3	12.3	0.38	3.16	0.83
11-1	0.762	3.228	2.296	0.835	1.10	3.5	9.8	0.34	3.70	0.78
12-1	0.737	3.475	2.188	0.803	1.09	2.8	10.1	0.40	3.36	0.72
13-3	0.670	2.100	2.061	0.752	1.12	6.3	9.4	0.14	2.98	0.63
14-1	0.663	2.257	2.175	0.73	1.10	5.4	8.2	0.17	3.32	0.61
14-2	0.664	2.215	2.036	0.74	1.12	5.6	9.4	0.16	2.91	0.61
14-3	0.671	2.503	2.269	0.73	1.09	4.5	7.8	0.21	3.62	0.61
17-1	0.685	2.552	2.317	0.75	1.09	4.5	7.7	0.21	3.77	0.64
17-2	0.688	3.152	2.123	0.75	1.09	3.0	9.3	0.33	3.17	0.63
17-3	0.696	3.026	2.088	0.76	1.09	3.3	9.9	0.30	3.06	0.65
17-4	0.702	3.538	2.187	0.76	1.08	2.4	9.2	0.41	3.36	0.65
18-1	0.673	2.680	2.111	0.74	1.09	3.9	9.0	0.24	3.13	0.61
18-2	0.681	2.769	2.201	0.74	1.09	3.8	8.5	0.25	3.40	0.62
18-3	0.712	3.022	2.292	0.77	1.09	3.4	8.6	0.30	3.69	0.68
20-1	0.688	2.952	2.255	0.74	1.08	3.4	8.2	0.29	3.57	0.63
21-1 ⁽²⁾	0.692	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
22-1	0.695	2.664	2.520	0.751	1.08	4.2	6.7	0.23	4.46	0.66
22-2	0.682	2.748	2.329	0.739	1.08	3.8	7.6	0.25	3.81	0.63

⁽¹⁾Evento de referencia para la evaluación del estado físico del edificio SIS.

⁽²⁾Réplica del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 de M 7.1, que no se registró en la red acelerográfica del edificio SIS.

n.d.-Dato no disponible porque se tienen problemas con los registros



 Evento 13-3 de moderada intensidad (21 de agosto de 2013, M 6.0)
 Evento de alta intensidad (07 de septiembre de 2021, M 7.1), que no se registró en la red acelerográfica del edificio SIS
 El evento 21-1 se omite porque se tienen problemas con los registros

Figura 28. Frecuencias y rigideces de ISE en el componente T estimadas con el método de Luco utilizando el tramo de la fase final

Entre los eventos 01-1 y 12-1 la participación de la respuesta total en la azotea debido al cabeceo en la base $H\Phi_{rL}/X_{tot}^{az}$ es mayor de 10 %, teniendo porcentajes de hasta 14 % al inicio del monitoreo, entre los eventos 13-3 al 20-1, los porcentajes de participación varían entre 7.7 y 9.9 %, y en el último evento 22-2, el porcentaje de participación es de 7.6 % de la respuesta total en la azotea.

En cuanto a la frecuencia y rigidez de traslación de la base, en la figura 28 se observa que la frecuencia f_h se reduce después de la ocurrencia del evento 13-3. En los eventos previos al evento 13-3 la frecuencia f_h varía entre 3.02 y 4.99 Hz, mientras que en los eventos posteriores varía entre 2.21 y 3.07 Hz. Esta variación también se distingue en los valores de las rigideces K_h , apreciando que en los eventos 13-3, 14-1, 14-2 se obtienen las mayores reducciones de la rigidez K_h , las cuales son de hasta 60 % respecto al valor de referencia $0.43 \text{ N/m} \times 10^{10}$. En el último evento 22-2, el valor de la rigidez K_h es de $0.25 \text{ N/m} \times 10^{10}$, que es 41.8 % menor en con respecto al valor de referencia.

Análisis de las frecuencias y rigideces de ISE de torsión

Entre los eventos 01-1 al 12-1, la frecuencia de torsión de la estructura f_{1t} en promedio es de 1.38 Hz (DE = 0.05 Hz, CV = 3.4 %). Los valores de la rigidez de torsión de la estructura K_{1t} obtenidos entre estos eventos varían entre 3.35 y 4.46 Nm/rad $\times 10^{10}$, y en promedio 3.84 Nm/rad $\times 10^{10}$ (DE = 0.27 Nm/rad $\times 10^{10}$, CV = 7.0 %) teniendo una baja variación de f_{1t} y K_{1t} entre estos eventos.

Los valores de f_{1t} y K_{1t} obtenidos en el evento 13-3 son de 1.15 Hz y 2.69 Nm/rad $\times 10^{10}$, respectivamente, los cuales son 22.2 y 39.6 % menores con respecto a los valores de referencia 1.48 Hz y 4.46 Nm/rad $\times 10^{10}$, respectivamente.

En la figura 29 se puede observar que en los eventos subsecuentes 14-1 al 20-1 se tiene una baja la recuperación de la frecuencia f_{1t} y rigidez K_{1t} con respecto al evento 13-3. Entre estos eventos, f_{1t} varía entre 1.14 y 1.23 Hz, en promedio 1.19 Hz, mientras que la rigidez K_{1t} varía entre 2.67 y 3.05 Nm/rad $\times 10^{10}$, con un valor promedio de 2.84 Nm/rad $\times 10^{10}$.

Ante la ocurrencia del evento de alta intensidad se presenta otra reducción en la frecuencia f_{1t} y la rigidez K_{1t} . En el evento 20-1 previo, los valores de f_{1t} y K_{1t} son de 1.23 Hz y 2.83 Nm/rad $\times 10^{10}$, con reducciones de 17.0 y 36.5 % con respecto a los valores de referencia 1.48 Hz y 4.46 Nm/rad $\times 10^{10}$. Mientras que en el evento posterior 22-2, los valores de f_{1t} y K_{1t} son de 1.08 Hz y 2.35 Nm/rad $\times 10^{10}$, los cuales son 27.4 y 47.4 % menores con respecto a los valores de referencia. Dadas estas reducciones, es evidente que no hay una recuperación total de f_{1t} y K_{1t} con respecto al evento de referencia 01-3.

En cuanto a las frecuencias y rigideces de torsión de la base, en la figura 29 se observa una notable fluctuación en los valores obtenidos en los eventos previos y posteriores al evento 13-3. En los eventos 01-1 al 12-1, los valores de la frecuencia f_r y la rigidez K_r varían entre 7.1 y 11.3 Hz, y entre 3.35 y 4.04 Nm/rad $\times 10^{12}$, respectivamente. Por otro lado, en los eventos 13-3 al 22-2, los valores de f_r y K_r varían entre 5.02 y 9.86 Hz, y entre 2.67 y 3.05 Nm/rad $\times 10^{12}$, respectivamente. Debido a la alta variabilidad de f_r y K_r , no se pudo establecer un cambio preciso en comparación con el evento de referencia 13-3.

En los eventos mostrados, los porcentajes de participación en la respuesta total en la azotea debido a la torsión en la base $\Phi_{rv}/\bar{\Phi}_{tot}^{az}$ varían entre 0.90 y 2.6%, y en promedio es de 1.70 %. Evidenciando tener porcentajes de participación de la torsión en la respuesta total semejantes en la mayoría de los eventos.

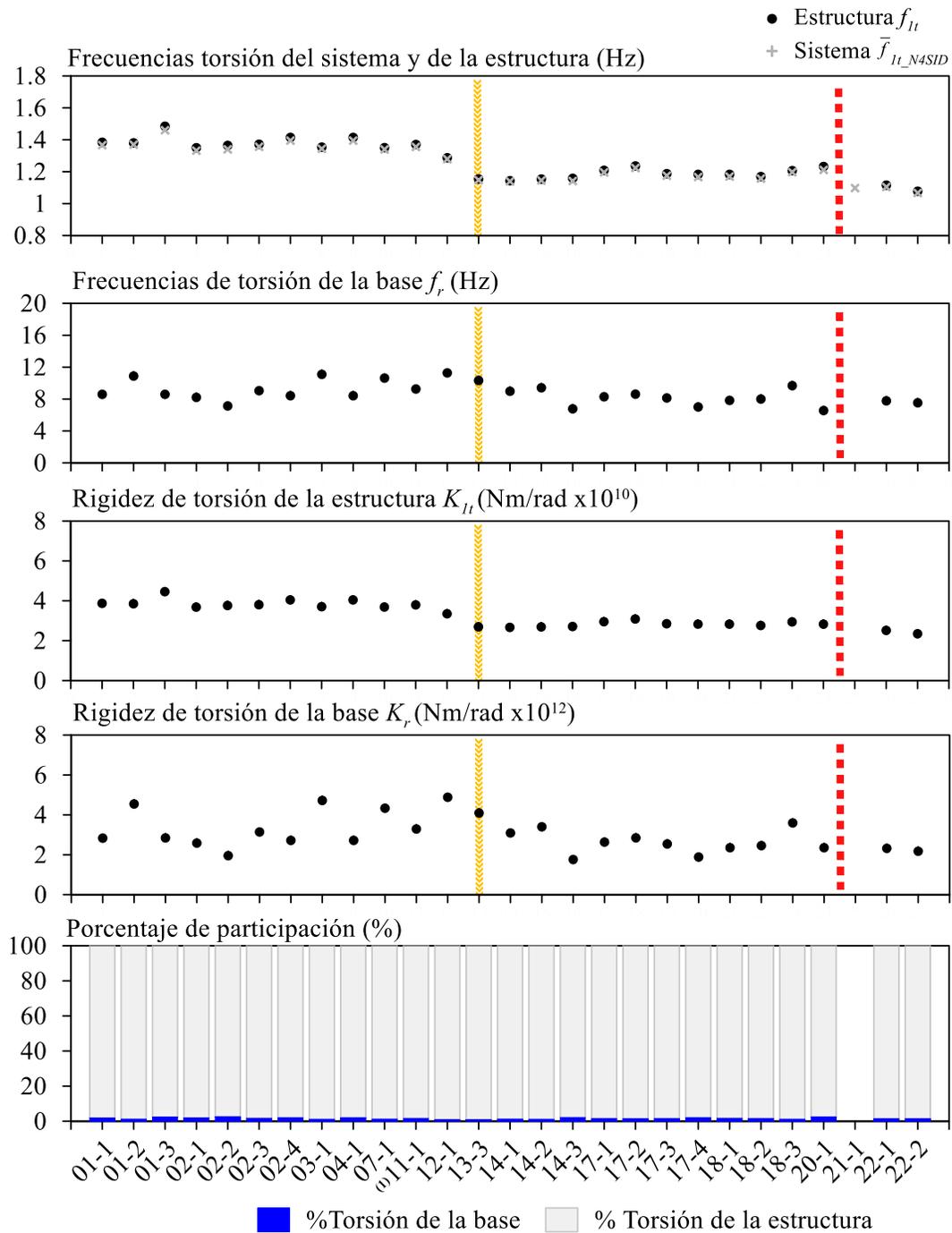
Tabla 14. Frecuencias y rigideces de ISE de torsión estimadas con el método de Luco utilizando el tramo de la fase final

Evento	\bar{f}_{1t_N4SID}	f_r	f_{1t}	f_{1t}/\bar{f}_{1t}	$\frac{\Phi_{rV}}{\Phi_{tot}^{az}}$	K_r	K_{1t}
	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	(%)	Nm/rad x10 ¹²	Nm/rad x10 ¹⁰
01-1	1.367	8.590	1.384	1.013	1.8	2.83	3.87
01-2	1.369	10.882	1.380	1.008	1.1	4.55	3.85
01-3 ⁽¹⁾	1.460	8.592	1.485	1.017	2.4	2.84	4.46
02-1	1.332	8.207	1.350	1.013	1.9	2.59	3.68
02-2	1.340	7.133	1.365	1.018	2.6	1.95	3.76
02-3	1.356	9.046	1.372	1.011	1.6	3.14	3.80
02-4	1.395	8.417	1.414	1.014	2.0	2.72	4.04
03-1	1.344	11.092	1.354	1.007	1.1	4.72	3.70
04-1	1.395	8.417	1.414	1.014	2.0	2.72	4.04
07-1	1.340	10.627	1.350	1.008	1.2	4.33	3.69
11-1	1.355	9.259	1.370	1.011	1.6	3.29	3.79
12-1	1.279	11.280	1.287	1.006	0.9	4.88	3.35
13-3	1.147	10.327	1.154	1.006	0.9	4.09	2.69
14-1	1.139	8.976	1.144	1.008	1.2	3.09	2.67
14-2	1.145	9.413	1.154	1.007	1.1	3.40	2.69
14-3	1.142	6.770	1.158	1.015	2.1	1.76	2.71
17-1	1.196	8.284	1.208	1.011	1.5	2.63	2.95
17-2	1.223	8.611	1.236	1.010	1.5	2.85	3.09
17-3	1.175	8.135	1.187	1.011	1.5	2.54	2.85
17-4	1.167	7.004	1.183	1.014	2.0	1.88	2.83
18-1	1.170	7.829	1.183	1.011	1.6	2.35	2.83
18-2	1.157	8.001	1.169	1.011	1.5	2.46	2.76
18-3	1.197	9.679	1.207	1.008	1.1	3.60	2.94
20-1	1.211	6.558	1.232	1.018	2.5	2.35	2.83
21-1 ⁽²⁾	1.097	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
22-1	1.104	7.773	1.116	1.010	1.5	2.32	2.52
22-2	1.067	7.529	1.078	1.010	1.5	2.18	2.35

⁽¹⁾Evento de referencia para la evaluación del estado físico del edificio SIS.

⁽²⁾Réplica del sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021 de M 7.1, que no se registró en la red acelerográfica del edificio SIS.

n.d.-Dato no disponible porque se tienen problemas con los registros.



- Evento de alta intensidad (07 de septiembre de 2021, M 7.1), que no se registró en la red acelerográfica del edificio SIS
- 👉 Evento 13-3 de moderada intensidad (21 de agosto de 2013, M 6.0)
- El evento 21-1 se omite porque se tienen problemas con los registros

Figura 29. Frecuencias y rigideces de ISE de torsión estimadas con el método de Luco utilizando el tramo de la fase final

3.3 Estimación espectral por ventanas con el método de Luco

Los efectos de ISE analizados en la sección 3.2 sugieren que varían en función de la magnitud de las amplitudes del movimiento, por lo tanto, se considera conveniente realizar un análisis por ventanas para coadyuvar a esclarecer cómo varían ante el evento 13-3 de moderada intensidad y en aquellos eventos cuyos valores no quedaron claros en las estimaciones previas.

El análisis de las frecuencias y rigideces de ISE en los componentes L, T y torsión por ventanas con el método de Luco, se centrará en los eventos 01-1, 01-3, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4, 18-1, 20-1 y 22-2. El objetivo es mostrar detalle con la variación de las frecuencias y rigideces desde la fase intensa hasta la final de estos eventos, así como los cambios de los efectos de ISE que hay de un evento a otro.

La estimación los efectos de ISE por ventanas con el método de Luco es a partir de los valores de las frecuencias del sistema calculados con el método N4SID ($\bar{f}_{1,N4SID}$), estos son tomados del trabajo de García-Illescas *et al.*, (2023), teniendo valores a cada segundo.

La estimación de las frecuencias y rigideces de ISE para los eventos 01-1, 01-3, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4, 18-1, 20-1 y 22-2, se realiza a cada 10 s. Bajo esta condición, se calculan los espectros de Fourier con ventanas de 20 s extraídas de los registros de aceleración, con traslapes de 10 s entre ventanas consecutivas. Además, en el evento 13-3 de moderada intensidad, se realiza la estimación de los efectos de ISE a cada segundo, para mostrar con mayor detalle las variaciones durante este evento.

En el Apéndice A se describe la estimación de los espectros de Fourier utilizando ventanas, mientras que en el subcapítulo 3.1 se detallan los registros sísmicos que se requieren para representar el movimiento del sistema suelo-estructura en los componentes L, T y torsión.

Previo al análisis descrito, se comparan las frecuencias de ISE por ventanas en los componentes L, T y torsión, calculados a partir de las frecuencias del sistema obtenidas con los métodos de MM y N4SID para los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1, con el propósito de mostrar la buena aproximación de los resultados cuando se utilizan las frecuencias obtenidas con el método N4SID. Los valores de las frecuencias del sistema obtenidos con el método de MM se basan en el trabajo de Taborda (2003) y Correa (2005). Además, se comparan las frecuencias de la estructura obtenidas con el método de Luco y con el método de MM (Taborda, 2003; Correa, 2005), para resaltar la proximidad entre estos métodos.

Como se mencionó en la sección 2.3, durante la fase inicial de un evento no se obtienen resultados precisos de las frecuencias del sistema, independientemente del método utilizado. Esto genera incoherencias en las frecuencias de ISE obtenidas en las fases iniciales de los eventos sísmicos. La complejidad en la estimación en la fase inicial se debe a que el sistema se encuentra en vibración forzada, las amplitudes son pequeñas por lo que se encuentran afectadas por el ruido instrumental, además de las incertidumbres inherentes al método de estimación.

Los valores de las frecuencias y rigideces de ISE obtenidos en la estimación con ventanas de los eventos 01-1, 02-1, 02-2, 03-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4, 18-1, 20-1 y 22-2, utilizando las frecuencias del sistema $\bar{f}_{1,N4SID}$ (García-Illescas *et al.*, 2023) se encuentran en las tablas B.1 a B.14 del Apéndice B, respectivamente. Los valores de la frecuencia de ISE de los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1 obtenidos utilizando las frecuencias del sistema $\bar{f}_{1,MM}$ (Taborda, 2003; Correa, 2005) se presentan en las tablas B.15 a B.18.

3.3.1 Estimación de las frecuencias de ISE a partir de las frecuencias del sistema obtenidas con los métodos de MM y N4SID

Teniendo en cuenta que en la estimación de las frecuencias del sistema con el método MM (\bar{f}_{1_MM}) se tienen valores de la frecuencia del sistema a cada 10 s (Taborda, 2003; Correa 2005), y mediante el método N4SID (\bar{f}_{1_N4SID}) se tienen valores a cada segundo (García-Illescas *et al.*, 2022), se seleccionan los valores de las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} a cada 10 s para realizar una comparación equiparable de las frecuencias de ISE. La selección de los valores de \bar{f}_{1_N4SID} coinciden con los instantes asociados a las frecuencias \bar{f}_{1_MM} .

En las figuras 30 a 32 aparecen las frecuencias de ISE en los componentes L, T y torsión, respectivamente, para los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1, estimadas con el método de Luco a partir de las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} y \bar{f}_{1_MM} .

En el componente L (figura 30), los valores de las frecuencias de la estructura (f_1), cabeceo (f_c) y traslación de la base (f_h) obtenidos a partir de las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} y \bar{f}_{1_MM} de las fases intensas difieren en menos de 1.5, 0.7 y 1.5 %, respectivamente. Entre estos valores y los de las fases finales, hay diferencias menores de 6.4, 2.4 y 2.4 % (correspondientes a las frecuencias f_1 , f_c y f_h). En el componente T (figura 31) las frecuencias f_1 , f_c y f_h de las fases intensas difieren en menos de 1.4, 1.4 y 3.5 %, respectivamente, y entre los valores de las fases finales difieren en menos de 3.7, 3.7 y 5.9 % (correspondientes a f_1 , f_c y f_h), entre ambas estimaciones. Las frecuencias de torsión (figura 32) en las fases intensas de la estructura (f_{1t}) y de la base (f_r) obtenidos a partir de las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} y \bar{f}_{1_MM} difieren en menos de 8.3 y 5.8 %, respectivamente, y en las fases finales, las diferencias son menores de 4.8 y 6.5 % (correspondientes a las frecuencias f_{1t} y f_r), entre ambas estimaciones.

En conclusión, puede decirse que se obtiene una adecuada aproximación entre ambas estimaciones, con una variación muy similar de las frecuencias de la estructura, de cabeceo y de traslación de la base, así como de las frecuencias en torsión de la base.

En las mismas figuras 30 a 32 se presentan las frecuencias de la estructura estimadas con el método MM (f_{1_MM}) para los eventos 01-1, 02-1 y 02-2, cuyos valores se tomaron de trabajos previos (Taborda, 2003; Correa 2005).

En el componente L, las diferencias entre los valores de las frecuencias de la estructura f_1 , obtenidas con el método de Luco a partir de las frecuencias \bar{f}_{1_N4SID} o \bar{f}_{1_MM} , y las frecuencias f_{1_MM} son menores al 9.4 %. En el componente T, las diferencias entre los valores de la frecuencia de la estructura obtenidos con los métodos de Luco y MM son menores de 8.2 %. En cuanto a las frecuencias de torsión de la estructura, las diferencias entre los valores obtenidos en las fases intensas y finales con los métodos de Luco y MM son inferiores al 9.0 %.

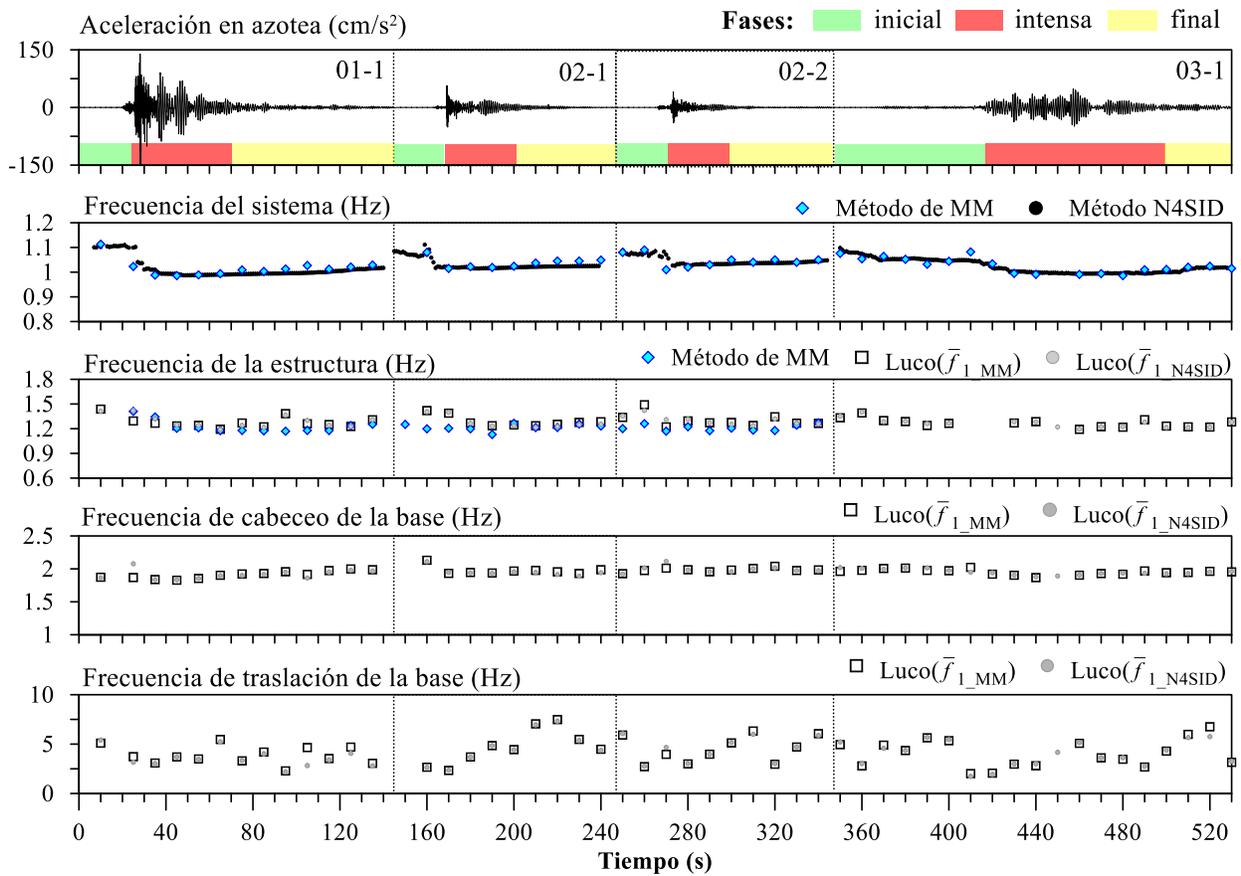


Figura 30. Comparativa de frecuencias de ISE en el componente L calculadas con el método de Luco de los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1 a partir de las frecuencias del sistema obtenidas con los métodos de MM y N4SID

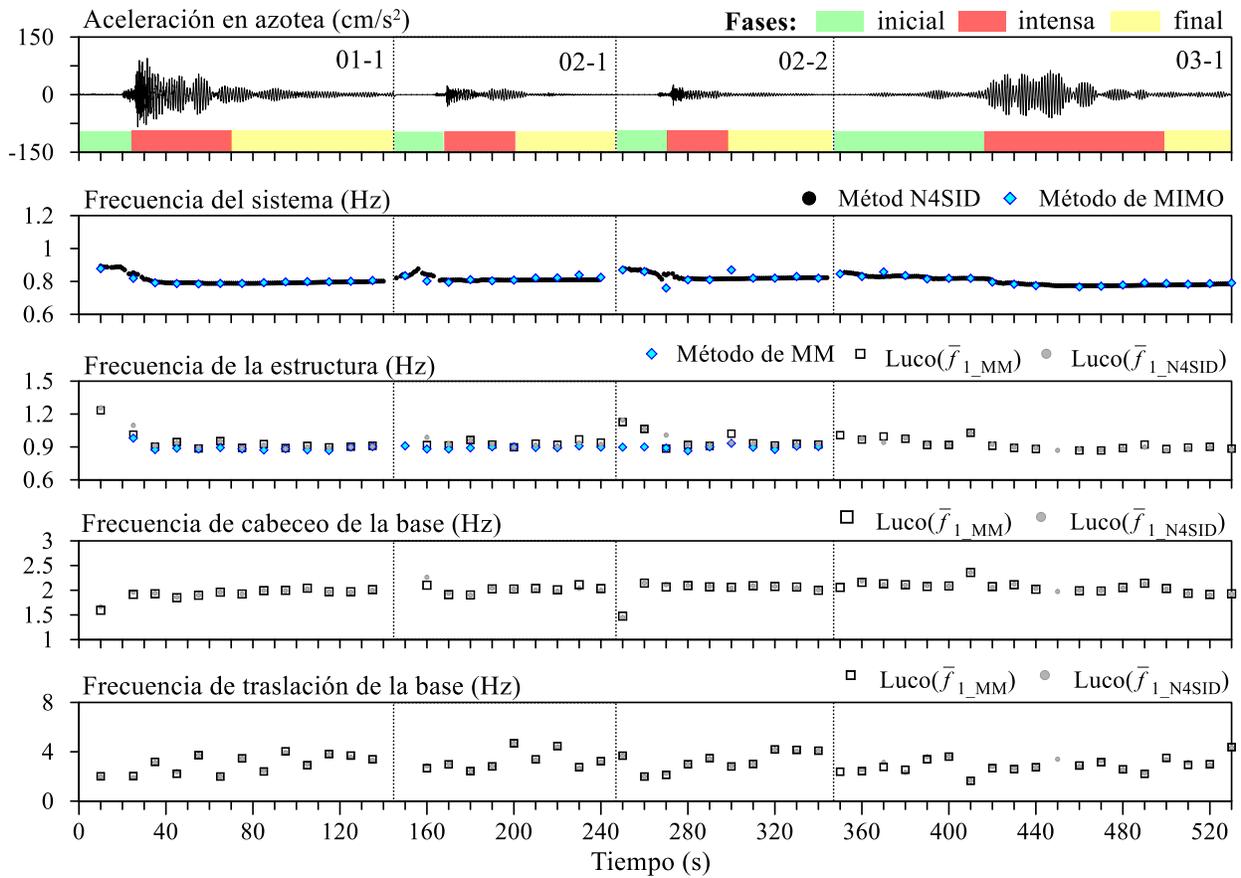


Figura 31. Comparación de las frecuencias de ISE en el componente T con el método de Luco de los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1, calculadas a partir de las frecuencias del sistema obtenidas con los métodos de MM y N4SID

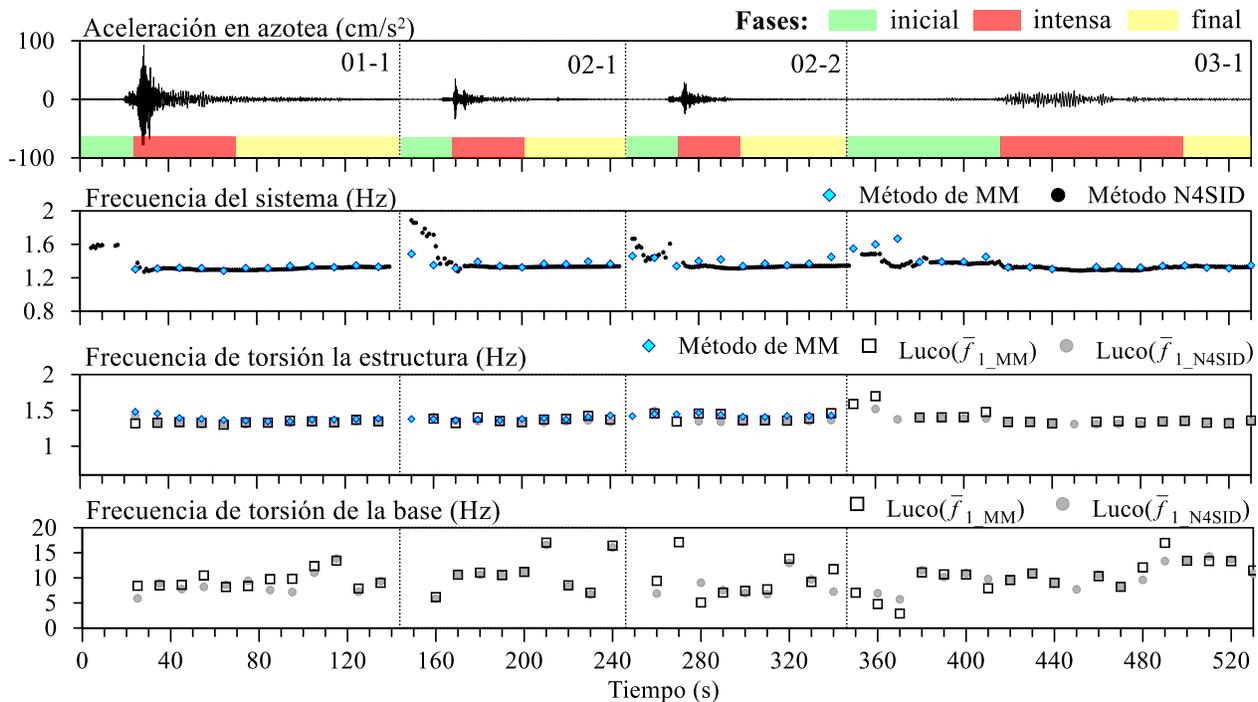


Figura 32. Comparativa de frecuencias de ISE de torsión calculadas con el método de Luco de los eventos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1 a partir de las frecuencias del sistema estimadas con los métodos de MM y N4SID

3.3.2 Historia de las frecuencias y rigideces de ISE

En esta sección se presenta la historia de las frecuencias y rigideces de ISE con ventanas calculadas mediante el método de Luco, utilizando como base las frecuencias del sistema \bar{f}_{1_N4SID} (García-Illescas *et al.*, 2022).

Los valores de las frecuencias y rigideces de ISE en los componentes L, T y torsión obtenidos durante los eventos 01-1, 01-3, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4, 18-1, 20-1 y 22-2, se ilustran en las figuras 37 a 42.

Para definir la variación de las frecuencias y rigideces de ISE durante un evento dado, se comparan con respecto al evento de referencia 01-3 que es de muy pequeña intensidad. Para ello, se toman como referencia los valores promedio obtenidos con todas las ventanas de dicho evento. De manera similar, en el último evento 22-2, que es de muy baja intensidad, se establecen valores promedio de las frecuencias y rigideces de ISE con todas las ventanas de este evento.

En el análisis, los valores de las frecuencias y rigideces de los componentes L, T y torsión obtenidos en la fase intensa de un evento se refieren al valor de una ventana o al promedio de dos ventanas asociadas a esta fase, cabe señalar que las ventanas de las fases intensas están asociadas a los mínimos valores de las frecuencias del sistema \bar{f}_{1_N4SID} . Los valores de las fases finales corresponden a un valor promedio de las últimas una a tres ventanas. Con excepción de la frecuencia y rigidez de traslación y de torsión de la base, el análisis de un evento particular se realiza con el promedio los

valores de todas las ventanas y su desviación estándar (DE), debió a que los valores de cada ventana fluctúan durante todo el evento.

Análisis del evento 13-3 de moderada intensidad

En la figura 33 se muestra la variación de los efectos de ISE en los componentes L, T y torsión durante el evento 13-3 de moderada intensidad. Los valores se presentan en una resolución a cada segundo y a cada 10 s, logrando hacer notar que con ambas resoluciones se obtiene una variación similar de las frecuencias y rigideces de ISE. Cabe mencionar que en esta figura se han excluido aquellos valores que son inconsistentes durante ciertos instantes comprendidos entre las fases intensa y final de este evento.

Una de las causas de tener resultados inconsistentes se debe a la fluctuación de las amplitudes espectrales relacionadas con la frecuencia del sistema. Esto se puede apreciar en las figuras 34 a 36, donde se muestran las amplitudes del movimiento en los componentes L, T y torsión del sistema suelo-estructura, respectivamente.

En las figuras 34 a 36 se presentan las ventanas espectrales de los instantes 55 a 65 s, que pertenecen al segmento de la fase intensa del evento 13-3. Estas ventanas muestran las amplitudes de Fourier asociadas a los valores de las frecuencias del sistema \bar{f}_{1t_N4SID} en los componentes L, T y torsión, respectivamente.

Para mostrar con mayor detalle la variación de las amplitudes, se incluye la representación tridimensional y en el plano de los espectros de Fourier en función de las ventanas de tiempo. Los colores utilizados representan los diferentes niveles de amplitud espectral.

En las ventanas espectrales de los instantes 61 a 65 s mostradas en la figura 34 se aprecia la fluctuación de las amplitudes espectrales asociadas a los valores de la frecuencia del sistema (0.85 - 0.86 Hz) del componente L, se observa que en el movimiento de traslación en la azotea (\bar{X}_{tot}^{az}) y en el de cabeceo de la base ($H\Phi_r$) se tienen una cresta entre 0.78 y 0.81 Hz, y otra entre 0.90 y 0.93 Hz, condición generada por el acoplamiento entre el componente L y torsión. Por otro lado, en las ventanas 61 a 65 s mostradas en la figura 35 correspondientes al componente T, se aprecia que las máximas amplitudes del movimiento de traslación de la base (X_b) están asociadas a frecuencias comprendidas entre 0.75 a 0.80 Hz, intervalo que difiere con el valor de la frecuencia del sistema en el componente T (0.58 - 0.59 Hz).

Por otro lado, en la figura 33 se aprecia que en el intervalo de la fase intensa del evento 13-3 los valores de las frecuencias y rigideces de torsión de ISE son poco consistentes debido a la misma fluctuación de las amplitudes ocasionada por el acoplamiento entre componentes. En las ventanas espectrales de los instantes de 50 a 65 s, mostradas en la figura 36 se aprecia que las amplitudes fluctúan en una banda de frecuencias comprendida entre 0.85 y 1.1 Hz, en los cuales, las máximas amplitudes de torsión difieren con los valores de la frecuencia \bar{f}_{1t_n4SID} (1.03 - 1.05 Hz).

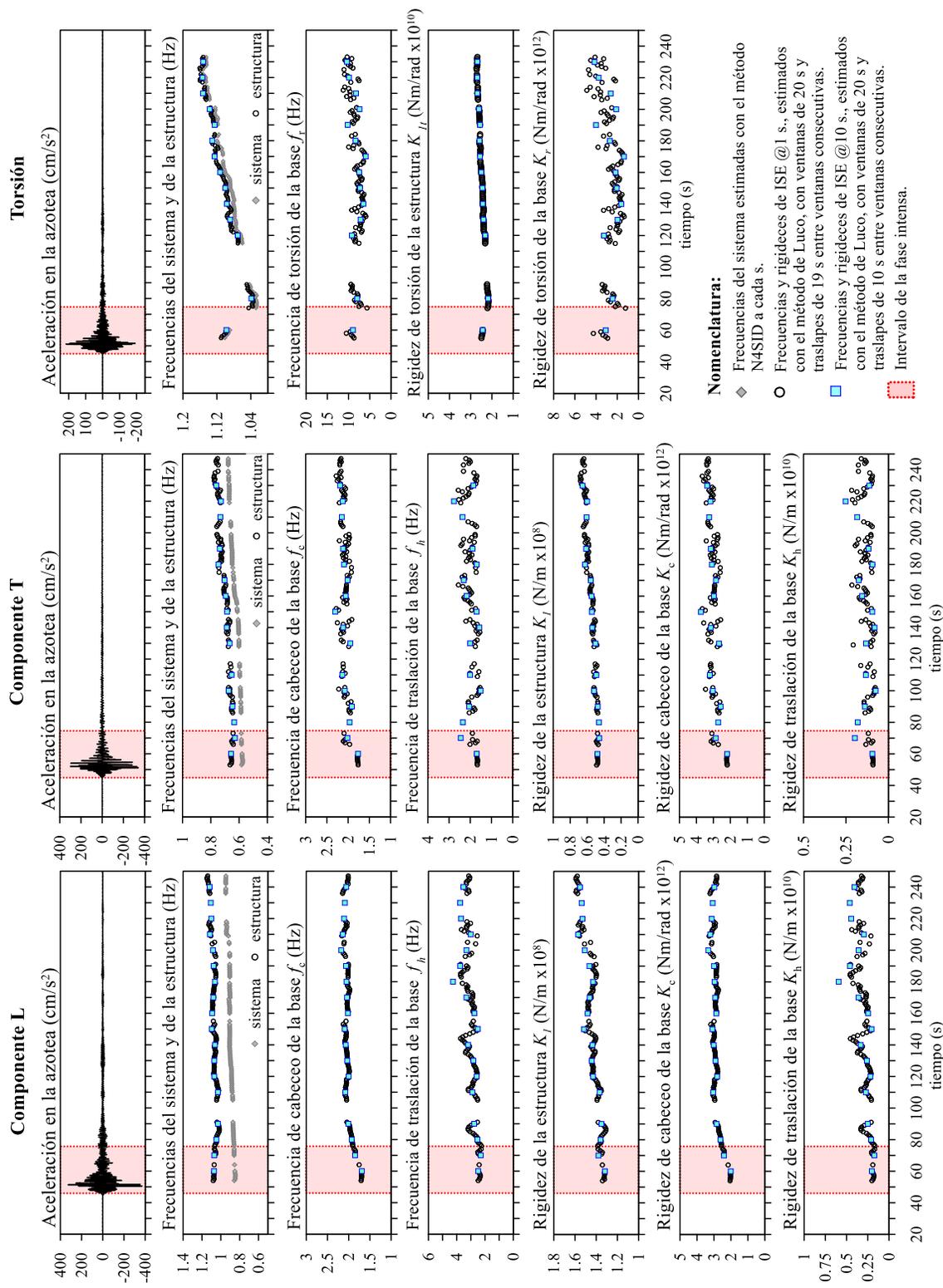
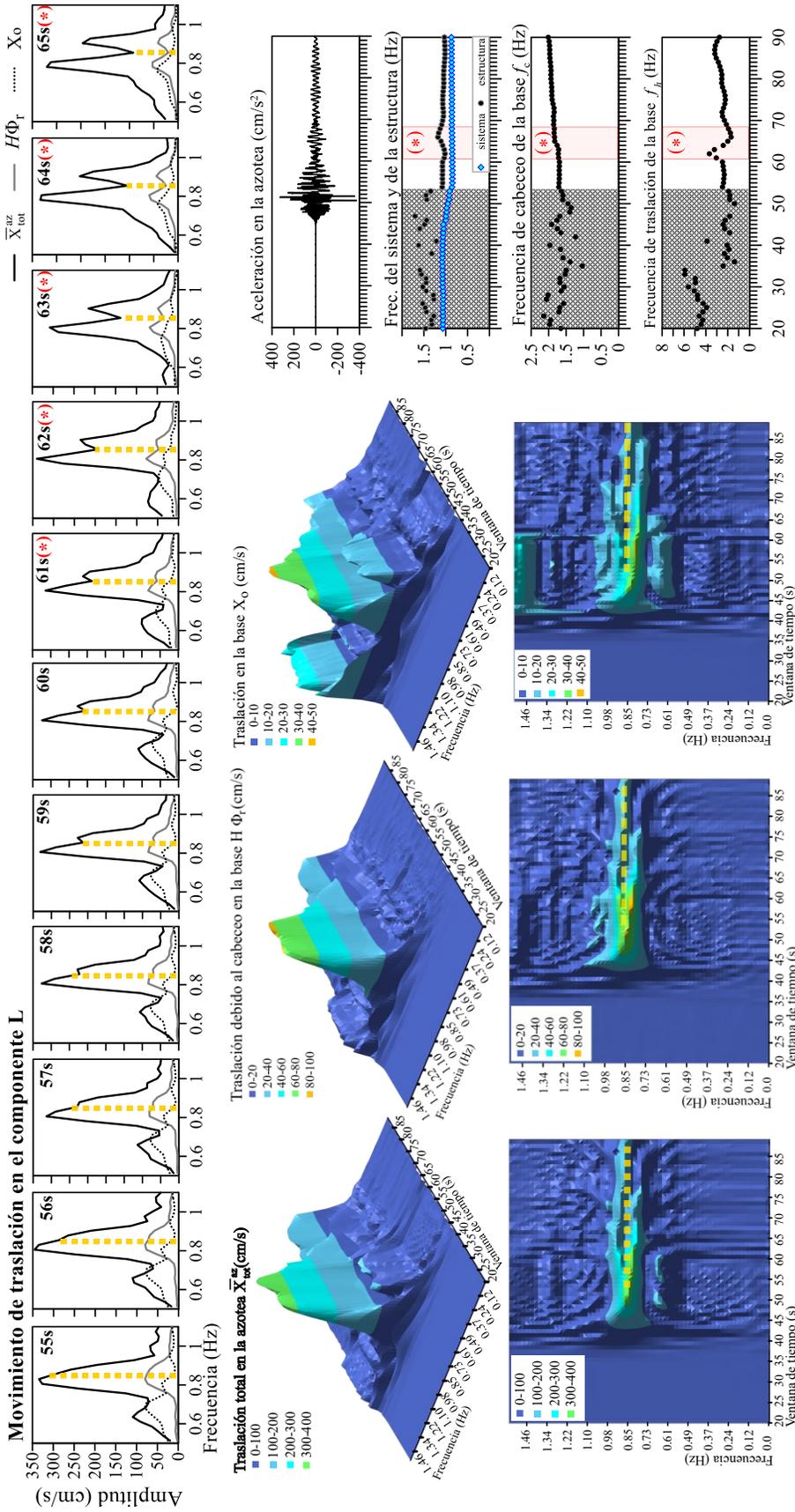


Figura 33. Historia de las frecuencia y rigideces de ISE del evento I3-3 de moderada intensidad, calculadas el método de Luco por ventanas a cada segundo, en los componentes L, T y en torsión



Nomenclatura:

- Frecuencias de ISE @1 s., estimados con el método de Luco a partir las frecuencias $\bar{f}_{I, N4SID}$ (◆), y ventanas de 20 s., con traslapes de 19 s entre ventanas consecutivas.
- ▨ Valores de la fase inicial que se omiten por tener resultados incoherentes y singularidades matemáticas.
- (*) Ventanas en donde no se obtienen buenos resultados con el método de Luco, por la fluctuación de las amplitudes espectrales asociadas a la frecuencia del sistema.
- Variación de los valores de la frecuencia $\bar{f}_{I, N4SID}$ (0.85-0.86) durante la fase intensa del evento 13-3.

Figura 34. Variación de las amplitudes de Fourier asociadas a las frecuencias del sistema del componente L, en las ventanas espectrales de 55 a 65 s durante el evento 13-3 de moderada intensidad

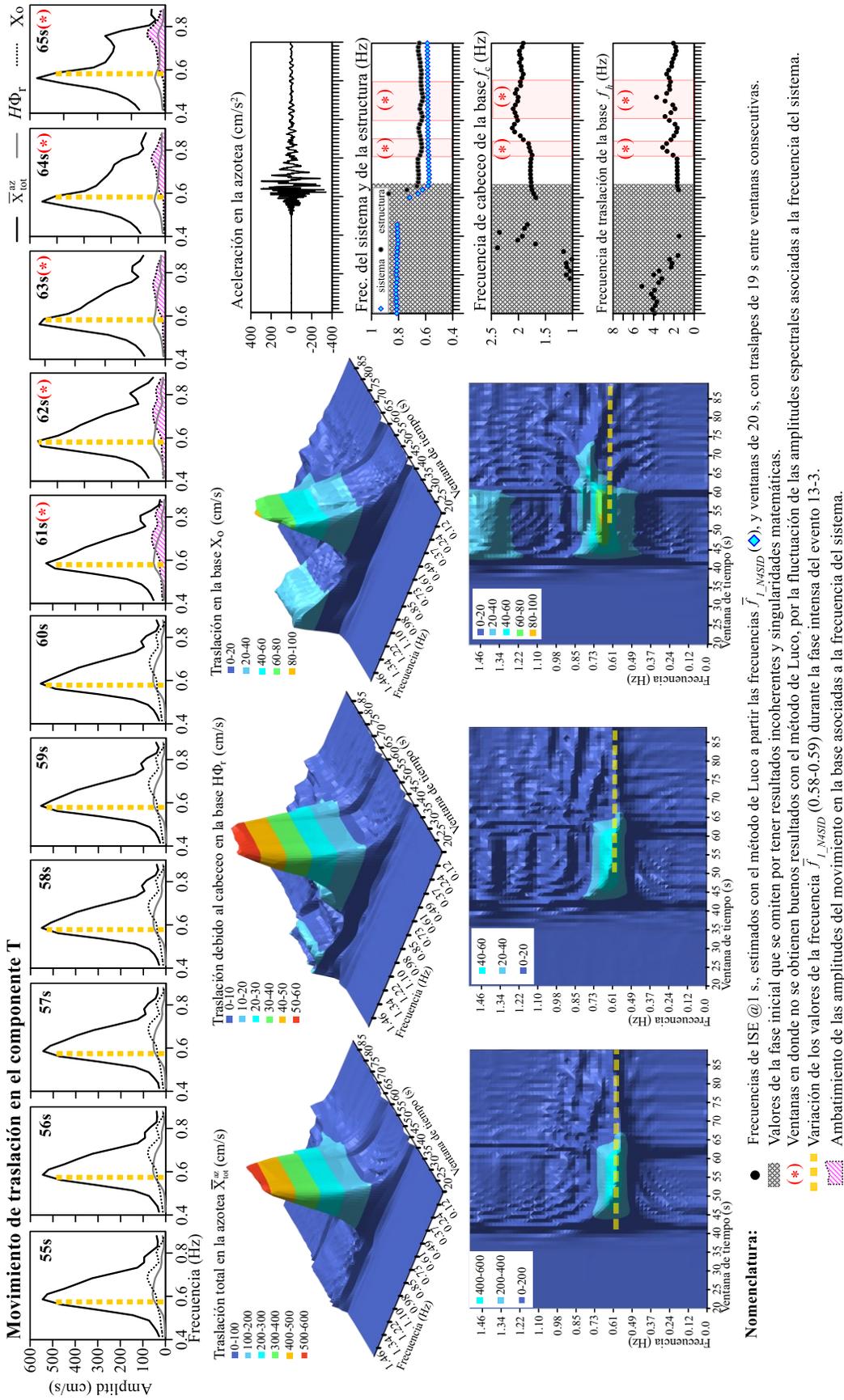


Figura 35. Variación de las amplitudes de Fourier asociadas a las frecuencias del sistema del componente T, en las ventanas espectrales de 55 a 65 s durante el evento 13-3 de moderada intensidad

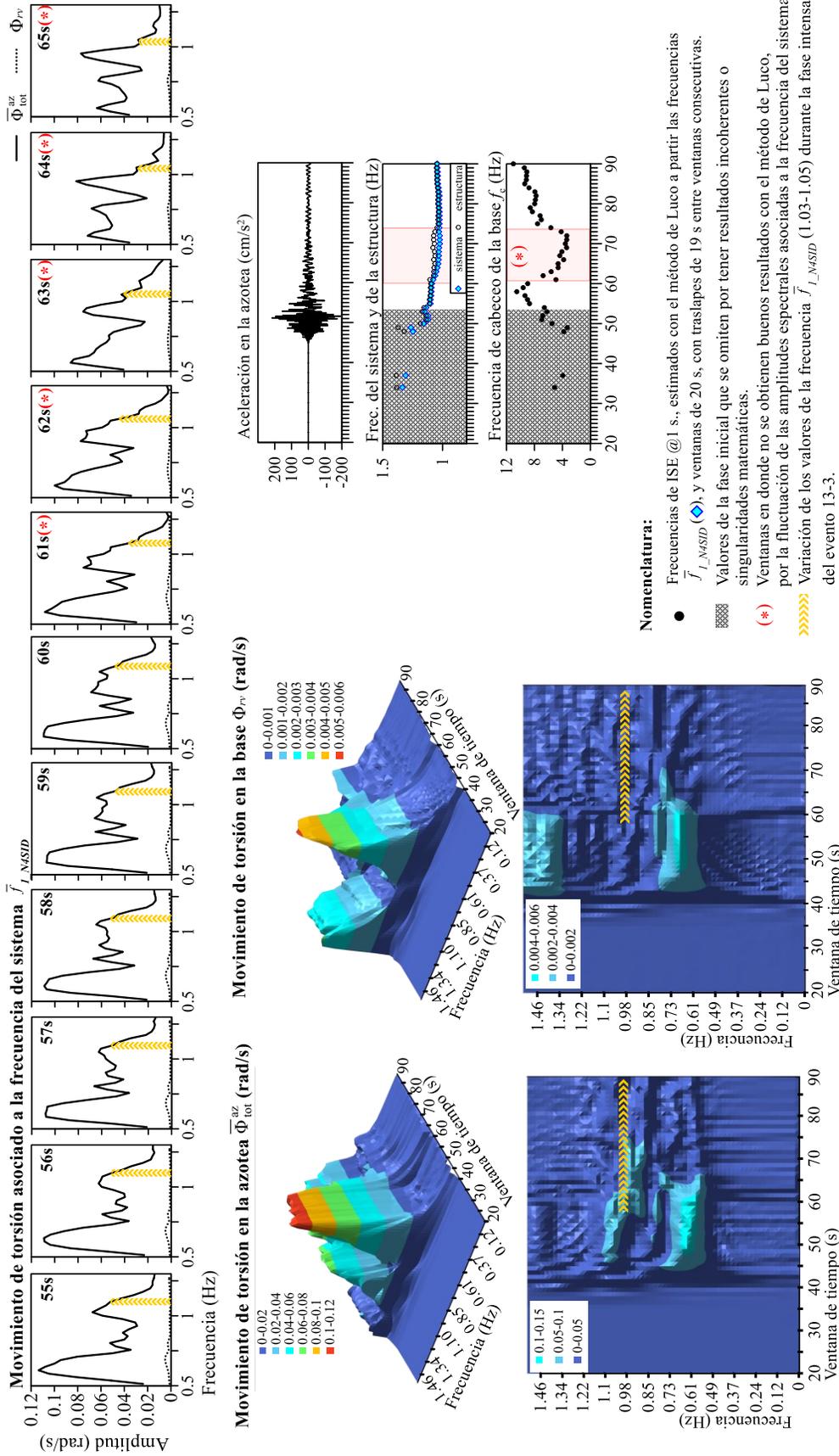


Figura 36. Variación de las amplitudes de Fourier asociadas a las frecuencias del sistema en torsión, en las ventanas espectrales de 55 a 65 s durante el evento 13-3 de moderada intensidad

Análisis de las frecuencias y rigideces de ISE en el componente L

En la figura 37 se observa que en los eventos 01-1, 07-1, y 12-1 se tiene la reducción de la frecuencia de la estructura f_1 en las ventanas de sus fases intensas, los valores promedio varían entre 1.16 y 1.27 Hz, los cuales son menores entre 3 y 12 % con respecto al valor de referencia 1.32 Hz. Se puede notar que, en las fases finales de estos eventos, la frecuencia se recupera parcialmente, variando entre 1.21 y 1.27 Hz, teniendo diferencias menores de 8% con respecto al valor de referencia mencionado.

En la figura 38 se aprecia la variación de la rigidez de la estructura K_1 , el cual sigue un patrón similar al de la frecuencia f_1 . En los eventos 01-1, 07-1 y 12-1 se observa la reducción de la rigidez K_1 sus fases intensas, y enseguida la recuperación parcial en las ventanas de sus fases finales. Los valores de la frecuencia f_1 y la rigidez K_1 obtenidos en la fase final del evento 12-1 son 1.22 Hz y $1.77 \text{ N/m} \times 10^8$, respectivamente, teniendo las reducciones de 7.3 y 10.0 % con respecto a los valores de referencia 1.32 Hz y $1.97 \text{ N/m} \times 10^8$, lo cual refleja un cambio poco significativo en la estructura.

En la fase intensa del evento 13-3, el valor promedio de la frecuencia f_1 es de 1.07 Hz, teniendo la reducción de 18.4 % con respecto al evento 01-3. En la fase final, se obtuvo el valor promedio de 1.13 Hz, lo que indica una recuperación parcial de 4.2 % con respecto a la fase intensa y una reducción del 14.1 % con respecto al evento 01-3 (1.32 Hz). La rigidez K_1 en la fase intensa del evento 13-3 en promedio es de $1.32 \text{ N/m} \times 10^8$, con una reducción de 32.9 % con respecto al evento 01-3. En la fase final, el valor promedio de la rigidez K_1 es de $1.57 \text{ N/m} \times 10^8$, lo cual 20.1 % menor con respecto al valor de referencia $1.97 \text{ N/m} \times 10^8$, y una recuperación parcial de 12.7 % con respecto a la fase intensa.

En las figuras 33 y 37 se observa que la relación entre la frecuencia del sistema y de la estructura varía durante el evento 13-3. En la fase intensa, la relación promedio de f_1/\bar{f}_{1_NASID} es 1.27, que es mayor en 6.4 % con respecto al valor promedio de 1.19 obtenido en las ventanas de la fase final. Esta condición sugiere un posible comportamiento no lineal debido a los efectos de ISE, y esto se refleja en la recuperación de la frecuencia f_c y la rigidez K_c . Acerca de la frecuencia f_h y la rigidez K_h no se observa evidencia de tal efecto, ya que los valores fluctúan entre las ventanas, lo cual puede ser atribuido a la pequeña contribución del movimiento de traslación de la base (menor de 6 % en la respuesta total en azotea) y a problemas de calidad de la relación señal-ruido.

En las fases intensas de los eventos 14-1 al 20-1, la frecuencia f_1 varía entre 0.97 y 1.10 Hz, con reducciones entre 18 y 26 % con respecto al evento 01-3 (1.32 Hz), y en las fases finales de estos eventos, f_1 varía entre 1.07 y 1.16 Hz, con reducciones de 12 a 19 % con respecto al evento 01-3 (1.32 Hz), y recuperaciones parciales entre 8 y 12 % con respecto a los valores de las fases intensas. En las fases intensas de los eventos 14-1 a 20-1, la rigidez K_1 varían entre 1.20 y $1.47 \text{ N/m} \times 10^8$, con reducciones entre 25 y 39 % con respecto al evento 01-3 ($1.97 \text{ N/m} \times 10^8$). En las fases finales de los eventos 14-1 a 20-1, K_1 varía entre 1.45 y $1.57 \text{ N/m} \times 10^8$, con reducciones entre 18 y 27 % con respecto al evento 01-3 ($1.97 \text{ N/m} \times 10^8$), y recuperaciones parciales entre 6 y 17 % con respecto a los valores de las fases intensas.

En el último evento 22-2, la frecuencia f_1 en promedio es 0.94 Hz, que es menor en 28.5 % con respecto al evento 01-3 (1.32 Hz), y la rigidez K_1 en promedio es $1.16 \text{ N/m} \times 10^8$ que es menor en 41.1 % con respecto al valor $1.97 \text{ N/m} \times 10^8$ de referencia. Las reducciones de f_1 y K_1 se atribuyen principalmente por el sismo de alta intensidad del 07 de septiembre de 2021.

En cuanto al movimiento de cabeceo de la base, en las fases intensas de los eventos 01-1 a 12-1 se obtienen valores comprendidos entre 1.84 y 1.92 Hz, que son menores entre 6 y 11 % en comparación

con el valor de referencia 2.05 Hz. Posteriormente, en las fases finales de estos eventos, se obtienen valores comprendidos entre 1.92 y 2.08 Hz, aproximándose con el valor de referencia 2.05 Hz obtenido en el evento 01-3. Los valores de las rigideces de cabeceo (K_c) obtenidos en las fases intensas de estos eventos varían entre 2.37 y 2.61 Nm/rad $\times 10^{12}$, teniendo reducciones entre 12 y 20 % con respecto al evento de referencia. En las fases finales, la rigidez K_c varía entre 2.69 y 3.03 Nm/rad $\times 10^{12}$, teniendo diferencias menores al 2 % en comparación con el valor de referencia 2.95 Nm/rad $\times 10^{12}$.

Como era de esperarse, en la fase intensa del evento 13-3 se tienen los mínimos valores de f_c y K_c , en promedio la frecuencia f_c resulta de 1.70 Hz, que es 17.3 % menor con respecto al valor de referencia (2.05 Hz), y la rigidez K_c en promedio es 2.02 Nm/rad $\times 10^{12}$, que es 31.7 % menor en comparación con el evento 01-3. Mientras que, en la fase final de este evento, la frecuencia f_c es de 2.06 Hz, que es similar al valor de referencia obtenido en el evento 01-3 (2.05 Hz). La rigidez K_c en la fase final en promedio es 3.0 Nm/rad $\times 10^{12}$, que es ligeramente mayor en 1.4 % con respecto al evento 01-3 (2.96 Nm/rad $\times 10^{12}$), esta diferencia puede atribuirse al error de la estimación.

Entre los eventos 14-1 al 20-1, posteriores al suceso 13-3, los valores de la frecuencia f_c obtenidos en las fases intensas de los eventos 14-1 a 20-1, varían entre 1.91 y 2.10 Hz, teniendo diferencias menores de 7 % con respecto al valor de referencia 2.05 Hz. En las fases finales de estos eventos, la frecuencia varía entre 2.05 y 2.13 Hz, los cuales difieren en menos de 4% con el valor de referencia 2.05 Hz. Los valores de las rigideces K_c obtenidos en las fases intensas de estos eventos varían entre 2.56 y 2.81 Nm/rad $\times 10^{12}$, teniendo reducciones entre 3 y 14 % con respecto al valor de referencia 2.95 Nm/rad $\times 10^{12}$. En las fases finales, la rigidez K_c varía entre 2.79 y 3.20 Nm/rad $\times 10^{12}$, teniendo diferencias de 9 % alrededor del valor de referencia 2.95 Nm/rad $\times 10^{12}$.

En el último evento 22-2 de pequeña intensidad, la frecuencia f_c en promedio es 1.98 Hz, valor que es menor en 3.4 % con respecto al evento 01-3 (2.05 Hz). La rigidez K_c en promedio es 2.77 Nm/rad $\times 10^{12}$, que es menor en 6.7 % con respecto al evento 01-3 (2.96 Nm/rad $\times 10^{12}$), lo cual sugiere que los efectos de ISE por cabeceo ha disminuido levemente en comparación con el evento de referencia.

Con respecto a las frecuencias y rigideces de traslación de la base, para cada evento se presenta el valor promedio de todas las ventanas y una banda de color azul tenue que indica la DE. En los eventos 01-1, 07-1 y 12-1 se observa que f_h y K_h varían en amplios intervalos comprendidos entre 3.1 y 5.2 Hz; y entre 0.30 y 0.87 N/m $\times 10^{10}$, respectivamente.

Durante el evento 13-3 de moderada intensidad se tiene una mejor consistencia entre los valores de las ventanas de su fase intensa y final, apreciando intervalos ligeramente más angostos para f_h y K_h . En las ventanas de la fase final, el intervalo de la frecuencia f_h es entre 2.7 y 3.4 Hz, con un valor promedio en 3.05 Hz; el intervalo de la rigidez K_h es entre 0.24 y 0.37 N/m $\times 10^{10}$, con un valor promedio de 0.31 N/m $\times 10^{10}$. Estos valores promedios representan reducciones de 42 y 67 % con respecto a los valores 5.28 Hz y 0.92 N/m $\times 10^{10}$ obtenidos en el evento de referencia 01-3.

En los eventos 14-1 al 20-1, los intervalos de f_h y K_h se encuentran entre 2.45 y 4.20 Hz; y entre 0.18 y 0.58 N/m $\times 10^{10}$, respectivamente. Donde los valores promedios son de 3.24 Hz y 0.36 N/m $\times 10^{10}$. En el evento 22-2 se observa la fluctuación de los valores de f_h y K_h similar a la del evento previo 20-1. En este último evento, los valores promedio de f_h y K_h son 3.19 Hz y 0.36 Nm/rad $\times 10^{12}$, respectivamente, los cuales son 39.5 y 60.8 % menores con respecto a los valores de referencia (5.28 Hz y 0.92 Nm/rad $\times 10^{12}$).

Como se puede apreciar en las figuras 37 y 38, tanto en los valores promedio como en los intervalos de los eventos 14-1 al 22-2 se evidencia la reducción f_h y K_h en comparación con el evento de referencia 01-3.

Análisis de las frecuencias y rigideces de ISE en el componente T

Los valores de las frecuencias y rigideces obtenidas del componente T mediante el método de las ventanas, se muestran en las Figuras 39 y 40, respectivamente. En las fases intensas de los eventos 01-1, 07-1, y 12-1 los valores de la frecuencia f_1 varían entre 0.78 y 0.91 Hz y la rigidez K_1 varían entre 0.67 y 0.84 N/m $\times 10^8$. Posteriormente en las fases finales de estos eventos, la frecuencia f_1 varía entre 0.81 y 0.93 Hz, mientras que la rigidez varía entre 0.73 a 0.90 N/m $\times 10^8$, teniendo la recuperación parcial con respecto a las fases intensas.

En la fase intensa del evento 13-3, el valor promedio de la frecuencia f_1 es 0.65 Hz, con una reducción de 34.3 % con respecto al evento 01-3, y en la fase final, f_1 el valor promedio es 0.76 Hz, teniendo una recuperación parcial de 10.3 % con respecto a la fase intensa, y una reducción de 24.0 % con el valor de referencia 0.98 Hz. En cuanto a la rigidez K_1 , en la fase intensa del evento 13-3 se obtiene el valor promedio de 0.48 N/m $\times 10^8$, que es 51.7 % menor con respecto al valor de referencia 0.98 N/m $\times 10^8$. En la fase final, el valor promedio de K_1 es de 0.65 N/m $\times 10^8$, que es 36.0 % menor en comparación con el valor de referencia. La relación promedio de las frecuencias $f_1 / \bar{f}_{1,N4SID}$ es de 1.14, la cual es 1.6 % mayor con respecto al valor de 1.12 obtenido en las ventanas de la fase final. Esta diferencia representa el posible efecto no lineal por la ISE, aunque menos perceptible que en el componente L.

En los eventos subsecuentes 14-1 al 20-1, en las fases intensas los valores promedio de la frecuencia f_1 varían entre 0.66 a 0.73 Hz, teniendo reducciones entre 25 a 32 % con respecto al valor de referencia 0.98 Hz. Además, valores de la rigidez K_1 varían entre 0.50 a 0.60 N/m $\times 10^8$, lo que implican reducciones entre 39 a 49 % con respecto al evento 01-3 (0.98 N/m $\times 10^8$). Por otro lado, en las fases finales de dichos eventos 14-1 al 20-1, la frecuencia f_1 varía entre 0.73 a 0.77 Hz, teniendo reducciones entre 21 a 25 % en comparación con el evento 01-3. Asimismo, los valores promedio la rigidez K_1 varía entre 0.60 a 0.67 N/m $\times 10^8$, con reducciones entre 32 y 39 % con respecto al evento 01-3. Estas reducciones son del mismo orden que las obtenidas en el evento 13-3.

En el último evento 22-2, posterior al sismo de alta intensidad que no fue registrado, se obtiene los valores promedio de la frecuencia f_1 y la rigidez K_1 son de 0.73 Hz y 0.61 N/m $\times 10^8$, respectivamente. De los cuales se tienen las reducciones de 25 y 38 % con respecto a los valores de referencia 0.98 Hz y 0.98 N/m $\times 10^8$. Es interesante notar que las reducciones de f_1 y K_1 con respecto al evento de referencia 01-3 son similares antes y después del sismo de alta intensidad.

Con respecto a la frecuencia de cabeceo de la base, en las fases intensas de los eventos 01-1 al 12-1, los valores de la frecuencia f_c varían entre 1.88 y 2.10 Hz, teniendo reducciones de hasta 10 % en comparación con el valor de referencia 2.09 Hz. En las fases finales de estos eventos, los valores la frecuencia f_c varían entre 2.03 y 2.20 Hz, teniendo proximidad con el valor de referencia 2.09 Hz.

Los valores de la frecuencia f_c y la rigidez K_c obtenidos en la fase intensa del evento 13-3 son 1.77 Hz y 2.21 Nm/rad $\times 10^{12}$, respectivamente, que son 15.4 y 28.4 % menores con respecto a los valores de referencia 2.10 Hz y 3.08 Nm/rad $\times 10^{12}$. Al finalizar el evento 13-3, la frecuencia f_c y la rigidez K_c aumentan a 2.18 Hz y 3.34 Nm/rad $\times 10^{12}$, respectivamente, resultando ser 4.4 y 8.6 % mayores con respecto a los valores de referencia. En las figuras 39 y 40 se puede apreciar que el efecto de la

no linealidad por ISE en este evento de moderada intensidad está reflejado en las diferencias de la frecuencia f_c y de la rigidez K_c entre las fases intensa y final. En estas mismas figuras se observa la consistencia de los valores de frecuencia f_c y la rigidez K_c obtenidos en las ventanas de los eventos 01-1 al 12-1, en cambio, en los eventos 14-1 al 20-1, se aprecia una ligera variación entre las ventanas en sus fases intensas y finales. Este efecto podría estar relacionado con la fluctuación de las amplitudes de Fourier ocasionado por el acoplamiento con el componente L, semejante a lo observado en las ventanas espectrales mostradas en la figura 34 y 35.

En el evento 22-2, el valor promedio de la frecuencia f_c es de 2.26 Hz, que es 8.1 % mayor en comparación con el valor de referencia 2.09 Hz. La rigidez K_c en promedio es $3.60 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$, que es mayor en 16.7 % con respecto al valor de referencia $3.08 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$. Estos incrementos de la frecuencia f_c y rigidez K_c están relacionados con una disminución de las amplitudes de los movimientos de cabeceo, con respecto al evento 01-3.

En cuanto a la frecuencia y rigidez de traslación de la base, en las figuras 39 y 40 se observa en los eventos 01-1, 07-1 y 12-1 una fluctuación amplia de f_h y K_h , que van desde 2.28 hasta 3.87 Hz, y desde 0.16 hasta $0.49 \text{ N/m} \times 10^{10}$, respectivamente. Los valores promedio de estos eventos son cercanos a los obtenidos en el evento de referencia 01-3 (3.59 Hz y $0.43 \text{ N/m} \times 10^{10}$).

En el evento 13-3 de moderada intensidad, los valores obtenidos f_h y K_h varían en intervalos comprendidos entre 1.62 y 2.38 Hz; y entre 0.08 y $0.19 \text{ N/m} \times 10^{10}$, con valores promedio de 2.05 Hz y $0.14 \text{ N/m} \times 10^{10}$, respectivamente. Con estos valores promedio se tienen reducciones de 43 y 67 % con respecto a los valores de referencia 3.59 Hz y $0.43 \text{ N/m} \times 10^{10}$.

Posteriormente, en los eventos 14-1 al 20-1, se evidencian intervalos de la frecuencia f_h y la rigidez K_h más angostos, los cuales están comprendidos entre 1.68 y 3.35 Hz; y entre 0.08 y $0.37 \text{ N/m} \times 10^{10}$. Además, se puede apreciar que los valores promedios se sitúan alrededor de 2.30 Hz y $0.18 \text{ N/m} \times 10^{10}$ para f_h y K_h , respectivamente.

En el evento 22-2, posterior al sismo de alta intensidad, no se observan cambios para f_h y K_h con respecto al evento 20-1 previo. Con los valores promedio 2.65 Hz y $0.24 \text{ N/m} \times 10^{10}$ obtenidos para f_h y K_h , respectivamente, evidencian reducciones de 26.1 y 42.7 % con respecto a los valores de referencia 3.59 Hz y $0.43 \text{ N/m} \times 10^{10}$.

Análisis de las frecuencias y rigideces de ISE en torsión

Antes del evento 13-3 de moderada intensidad, en la fase final del evento 12-1 se observa una reducción de f_{1t} y K_{1t} en comparación con el evento 01-3. Los valores promedio obtenidos son 1.23 Hz y $3.08 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$, respectivamente, los cuales son 15.1 y 27.9 % menores con respecto a los valores de referencia 1.48 Hz y $4.46 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$. Al final de evento 13-3, se evidencia la reducción de f_{1t} y K_{1t} con respecto al 12-1 y el evento de referencia 01-3. Los valores promedios obtenidos en las últimas ventanas son 1.15 Hz y $2.74 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$, respectivamente, que son 23.3 y 38.5 % menores en comparación con los valores de referencia de 1.45 Hz y $4.27 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$.

En los eventos subsecuentes 14-1 al 20-1 se observa la reducción de f_{1t} y K_{1t} en sus fases intensas, seguida de la recuperación parcial en las fases finales de estos eventos. En particular, en la fase final del evento 20-1, se obtienen los valores promedio de 1.23 Hz y $3.08 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$ para f_{1t} y K_{1t} , respectivamente, los cuales son 15.0 y 27.8 % menores en comparación con los valores de referencia 1.45 Hz y $4.27 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$.

En el evento 22-2, posterior al sismo de alta intensidad que no se registró, se observa otra reducción significativa de la frecuencia f_{1t} y rigidez K_{1t} . Los valores promedio de f_{1t} y K_{1t} obtenidos en este último evento son 1.07 Hz y $2.33 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$, respectivamente, los cuales son 26.4 y 41.0 % menores con respecto a los valores obtenidos en el evento de referencia.

En cuanto a los valores de la frecuencia (f_r) y rigidez (K_r) de torsión de la base, en las figuras 41 y 42 se observa que tanto en los eventos previos del 01-1 al 12-1, como en los eventos 14-1 al 20-1 posteriores al evento 13-3, los valores de f_r y K_r varían en amplios intervalos. Con respecto al evento de referencia 01-3 parece que no hay un claro cambio de estos parámetros, debido a la dispersión de los valores estimados.

En la fase final del evento 13-3, se observa que la frecuencia f_r varía en un intervalo más angosto comprendido entre 6.8 y 9.4 Hz, con un valor promedio de 8.1 Hz. De manera similar, la rigidez K_r varía entre 1.8 y $3.4 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$, con un valor promedio de $2.6 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$. Con tales valores promedio se aparenta mostrar reducciones del 17 y 29 % en comparación con los valores de referencia 9.76 Hz y $3.66 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$, respectivamente. Estas reducciones de f_r y K_r son más evidentes en el último evento, donde se obtuvieron los valores promedio de 7.26 Hz y $2.23 \text{ Nm/rad} \times 10^{10}$, con reducciones de 25.6 y 39.2 % con respecto a los valores de referencia.

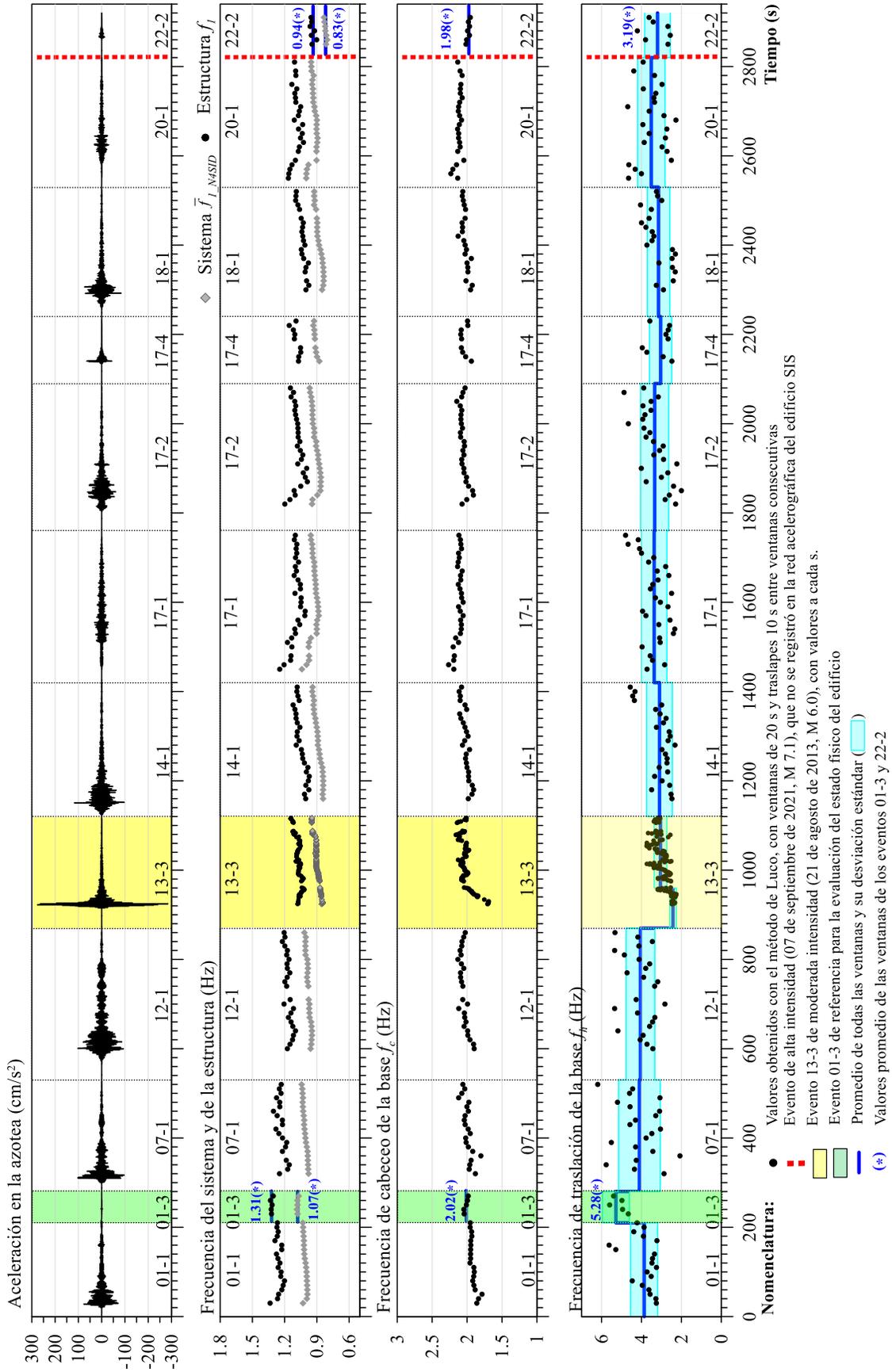


Figura 37. Historia de las frecuencias de ISE del componente L, calculadas por ventanas con el método de Luco

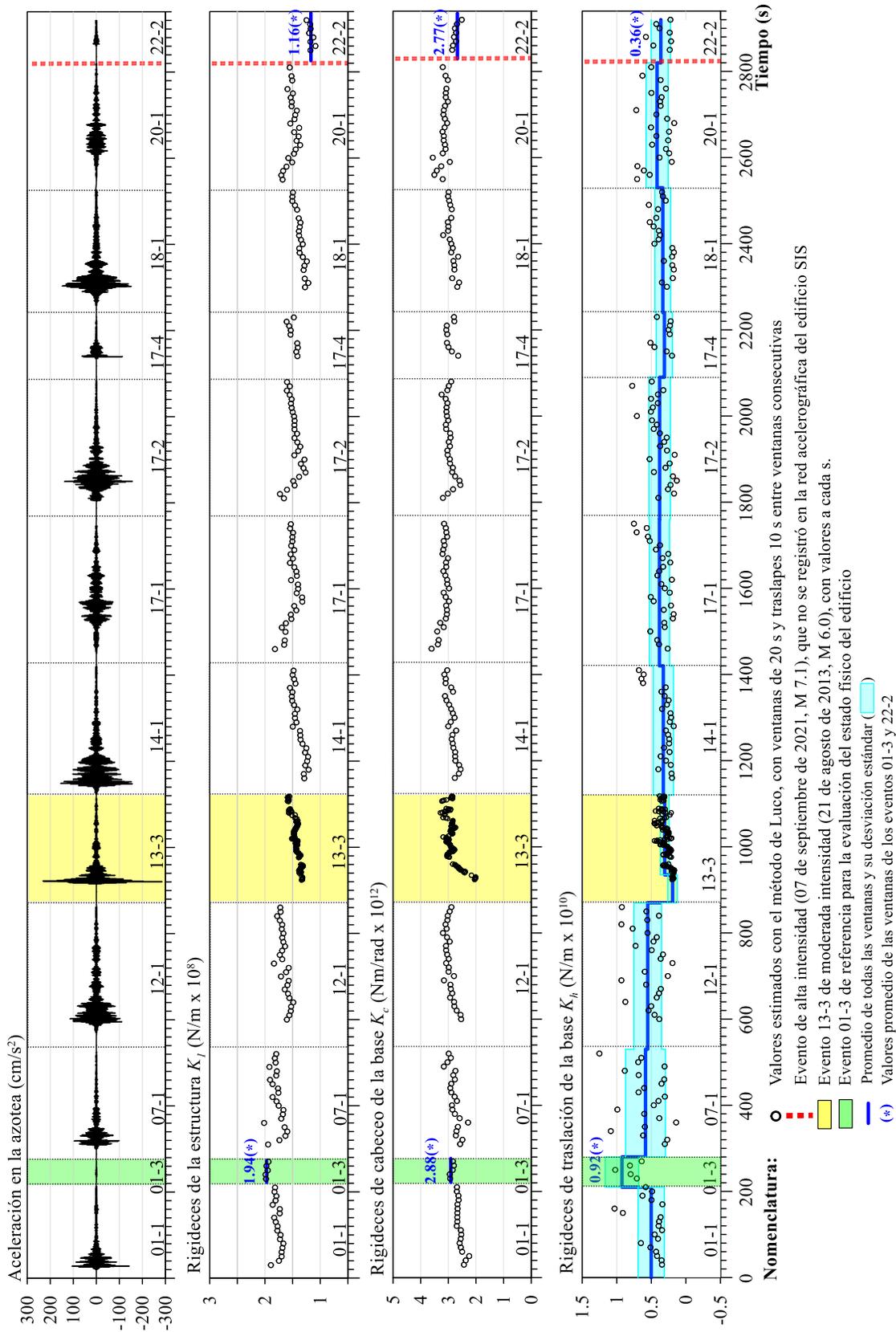


Figura 38. Historia de las rigideces de ISE del componente L, calculadas por ventanas con el método de Luco

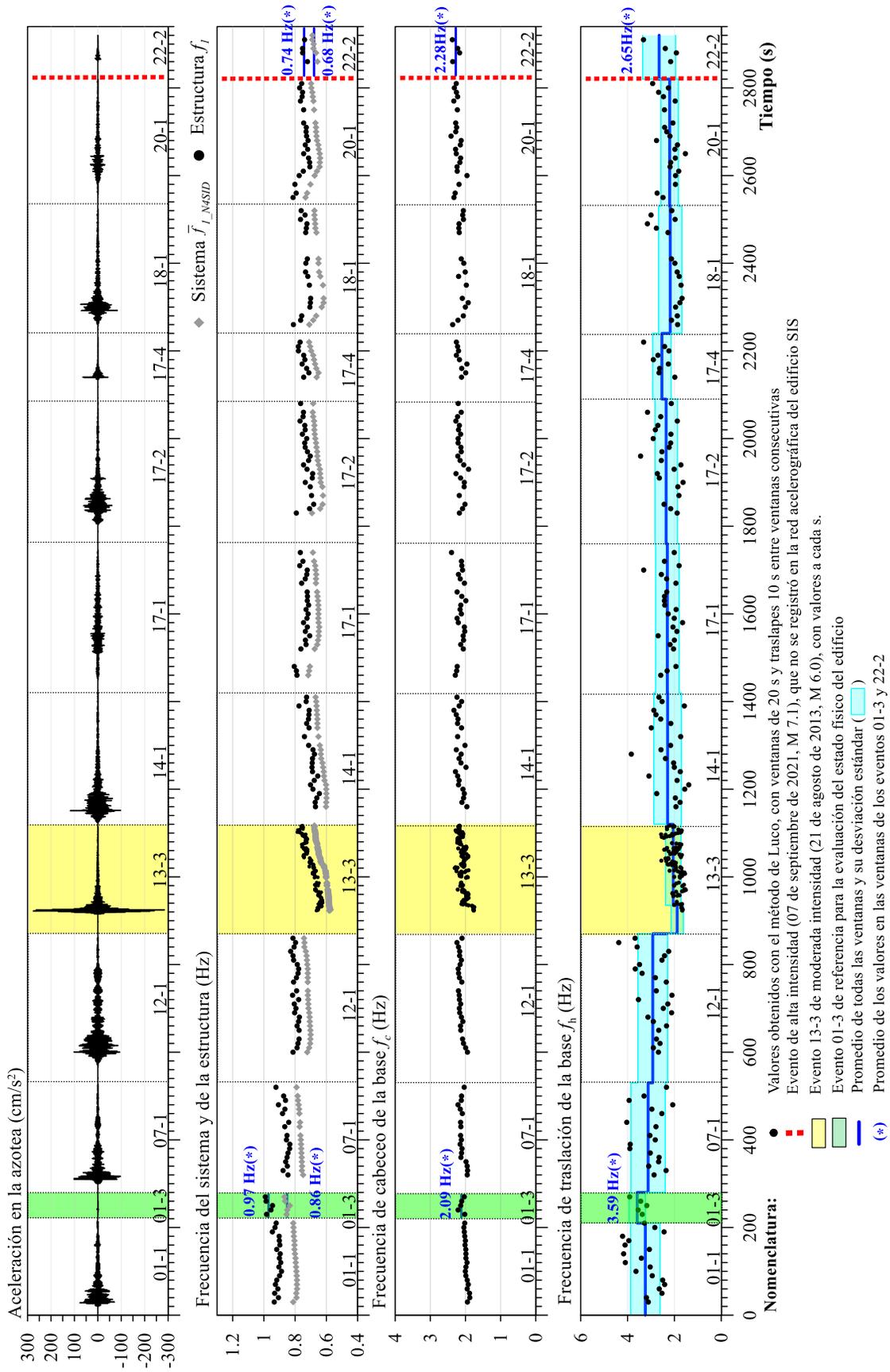


Figura 39. Historia de las frecuencias de ISE en el componente T, calculadas por ventanas con el método de Luco

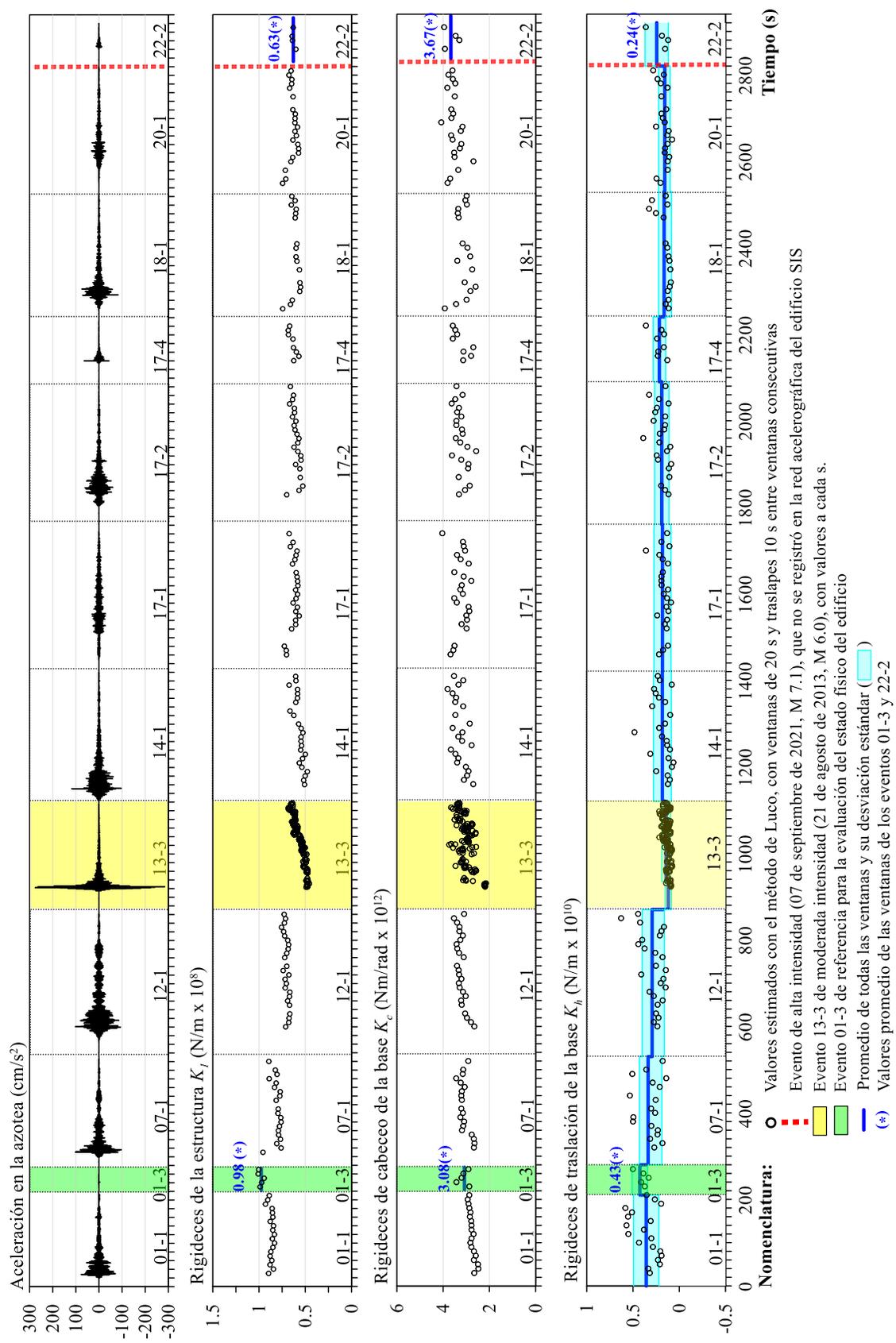


Figura 40. Historia de las rigideces de ISE del componente T, calculadas por ventanas con el método de Luco

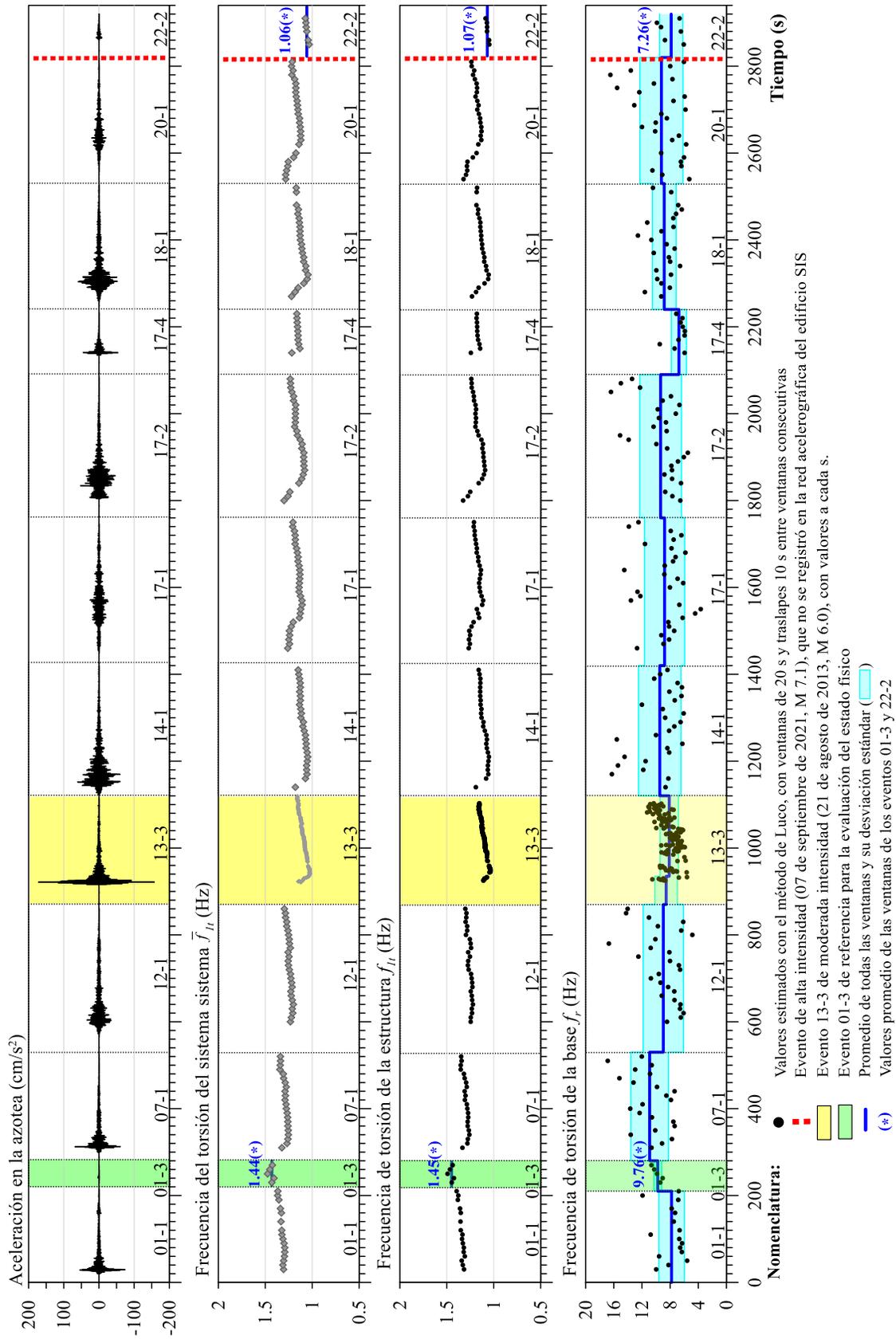


Figura 41. Historia de frecuencias de ISE de torsión, calculadas por ventanas con el método de Luco

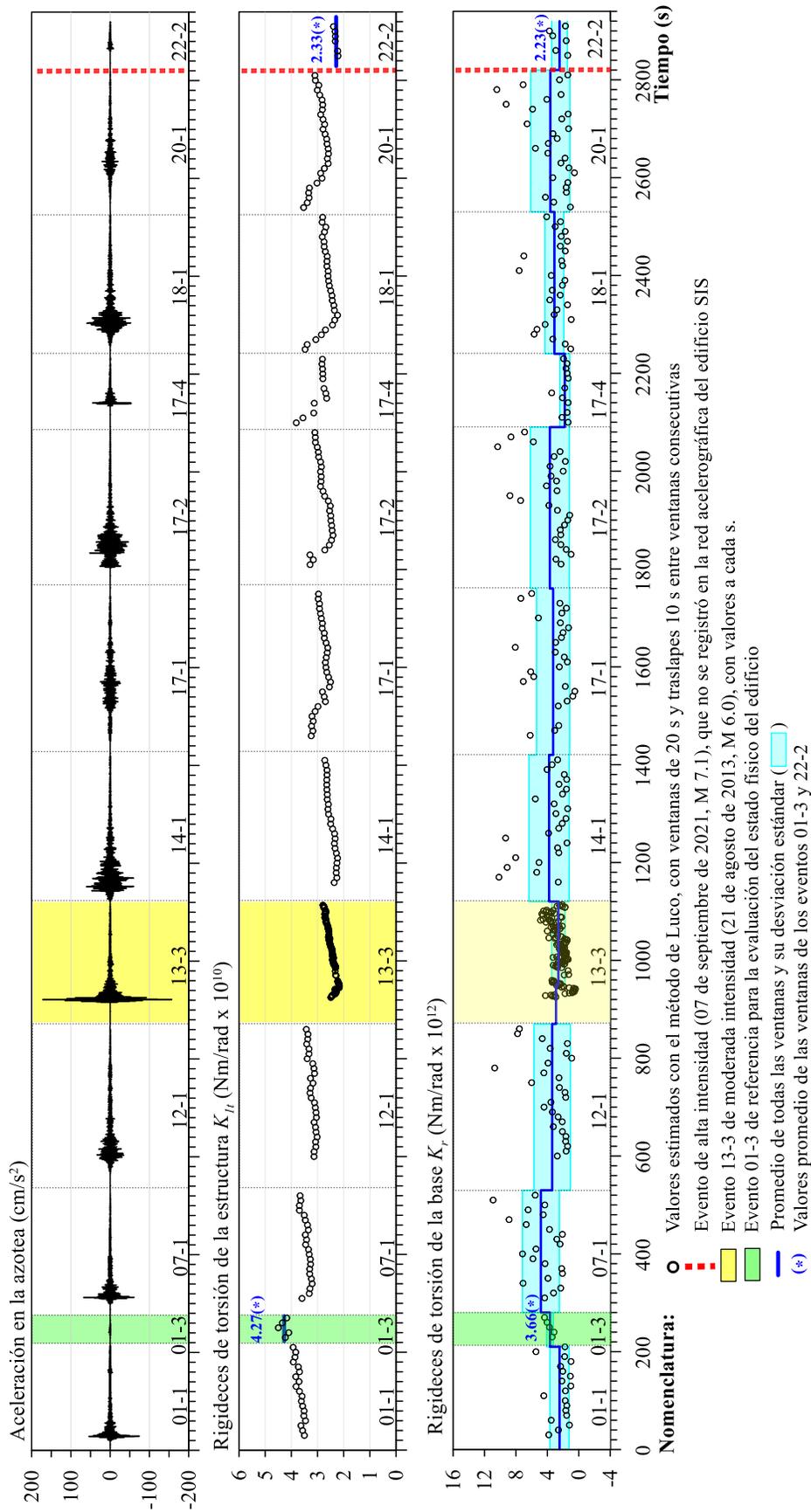


Figura 42. Historia de las rigideces de ISE de torsión, calculadas por ventanas con el método de Luco

3.4 Comparación de las frecuencias de ISE entre las fases intensa, final y por ventanas

En este apartado se comparan los valores de las frecuencias del ISE en los componentes L, T y en torsión obtenidos con el método de Luco a partir de las frecuencias del sistema N4SID (García-Illescas *et al.*, 2022). Los valores obtenidos en la estimación con los registros completos que corresponden a las fases intensas (tablas 9 a 11), y los valores obtenidos con los segmentos de las fases finales (tablas 12 a 14) se comparan con los valores obtenidos con ventanas (contenidos en el apéndice A), con el fin de mostrar la aproximación y diferencias que entre estas estimaciones.

En las figuras 43 a 45 se muestra la comparación de las frecuencias de ISE de los eventos 01-1, 01-3, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4, 18-1, 20-1 y 22-1 en los componentes L, T y en torsión, respectivamente.

En la figura 43 y 44 se muestran las comparaciones de la frecuencia f_1 en los componentes L y T respectivamente, en estas figuras se observa que los valores obtenidos en la estimación utilizando los registros completos y los tramos de las fases finales coinciden con los valores promedio de las ventanas. Entre los valores de f_1 de las fases intensas se tienen diferencias menores de 9 y 4 % en los componentes L y T, respectivamente. En cuanto a los valores obtenidos en el análisis con tramos finales difieren en menos de 3 y 2 % con los valores promedio de las ventanas de las fases finales, correspondientes a los componentes L y T.

Con respecto a las frecuencias de cabeceo de la base de los componentes L y T, en las figuras 43 y 44 se observa una adecuada aproximación entre los valores obtenidos en la estimación utilizando los registros completos y los obtenidos con el promedio de las ventanas de las fases intensas. En los eventos mostrados, las diferencias son inferiores al 5 y 6 %, en los componentes L y T, respectivamente, que, por lo general, se obtienen valores de f_c ligeramente menores en la estimación por ventanas. Por otro lado, las diferencias entre los valores obtenidos utilizando los tramos de las fases finales y los obtenidos con el promedio de las ventanas de las fases finales difieren en menos de 4 y 8 %, respectivamente a los componentes L y T.

En relación con la frecuencia de traslación de la base, en las figuras 43 y 44 se observan diferencias más significativas en comparación con los valores por ventanas. Entre valores de f_h obtenidos en el análisis con los registros completos y los valores promedio obtenidos en las ventanas de las fases intensas difieren en menos de 16.8 y 17.4 %, en los componentes L y T, respectivamente. Por otra parte, entre los valores obtenidos con los tramos finales de los registros y los valores obtenidos con las ventanas de las fases finales se tiene una mayor discrepancia, así mismo con la DE.

Las frecuencias de ISE de torsión aparecen en la figura 45. En los eventos mostrados en dicha figura se observa una adecuada aproximación entre los valores de la frecuencia f_{1t} obtenidos en la estimación con los registros completos y los valores de las ventanas asociadas a la fase intensa, entre los cuales hay diferencias inferiores del 3.0 %. Entre los valores de la frecuencia f_{1t} obtenidos en el análisis utilizando los tramos y los obtenidos con ventanas las diferencias son menores del 2.0 %.

En cuanto a los valores de las frecuencias torsión de la base, f_r , en la figura 45 se observa la similitud entre los valores obtenidos de la estimación con los registros completos y los obtenidos de las ventanas asociadas a las fases intensas, entre los cuales las diferencias son inferiores del 7.0 %. Por otro lado, entre los valores obtenidos con los tramos de la fase final y los obtenidos en las ventanas de la fase final se observan diferencias más significativas.

En conclusión, los valores de las frecuencias de la estructura en los componentes L, T y torsión, así como los valores de las frecuencias de cabeceo obtenidos de la estimación utilizando los registros

completos y los tramos de las fases finales son congruentes con la estimación por ventanas. Las diferencias entre las distintas estimaciones están principalmente asociadas al margen de error que conlleva el cálculo numérico. Mientras que, las diferencias más significativas de los valores de las frecuencias de traslación y de torsión de la base pueden ser debidas a las incertidumbres de las propias estimaciones debido a una baja contribución en la respuesta total del sistema que podrían estar relacionadas con una baja calidad de los registros, particularmente en los segmentos de las fases finales.

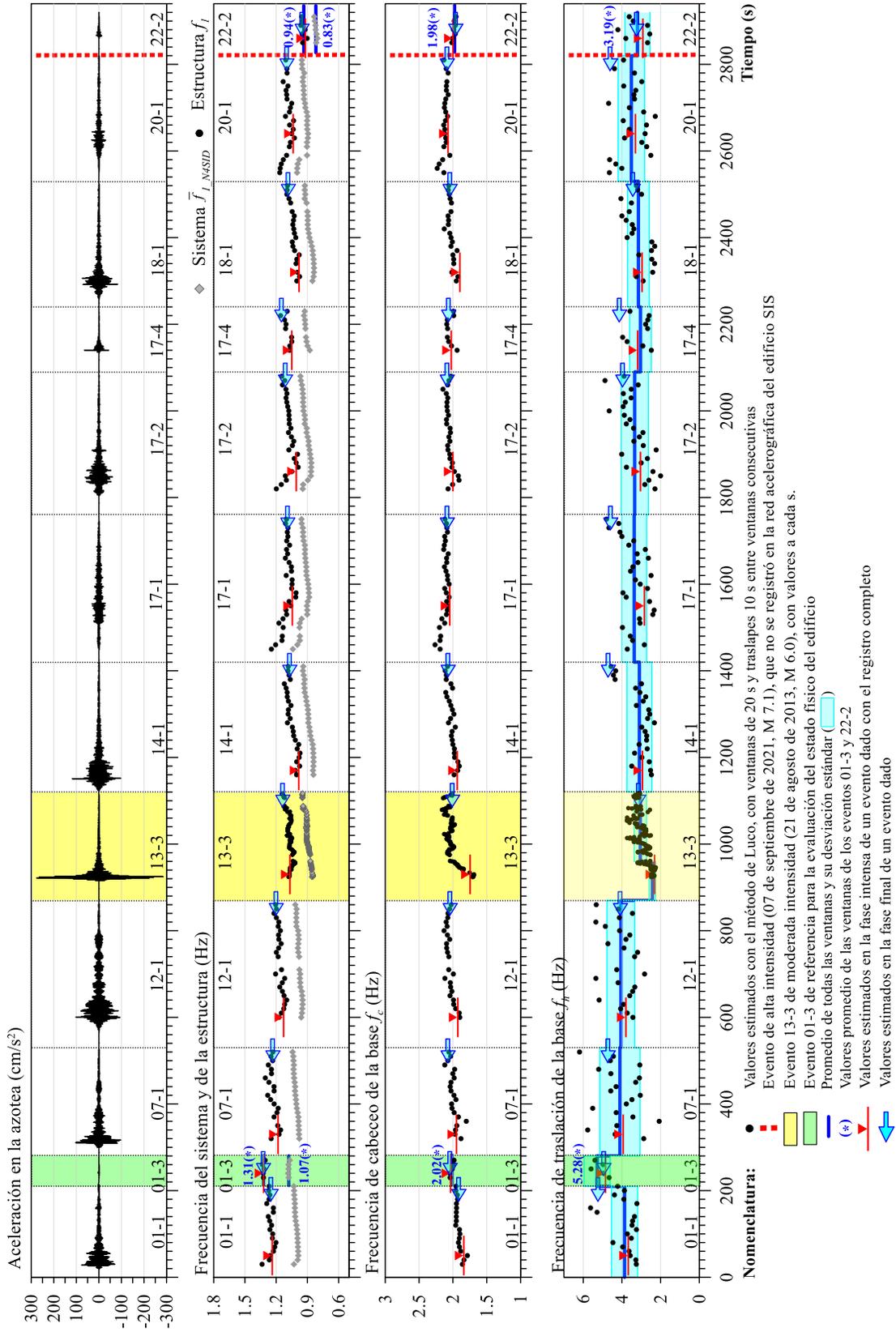


Figura 43. Comparación de las frecuencias de ISE del componente L, estimadas con los registros completos y por ventanas con el método de Luco

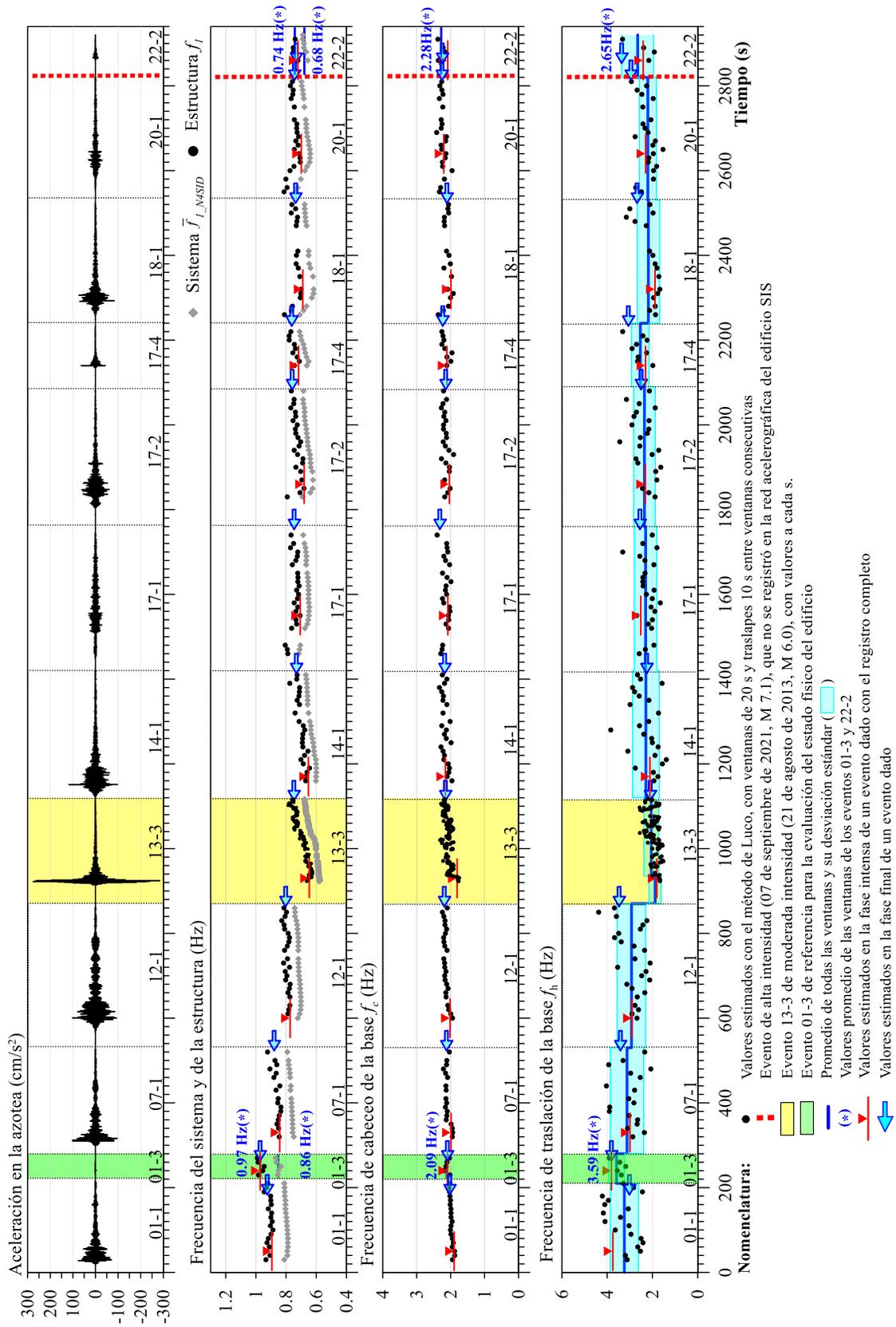
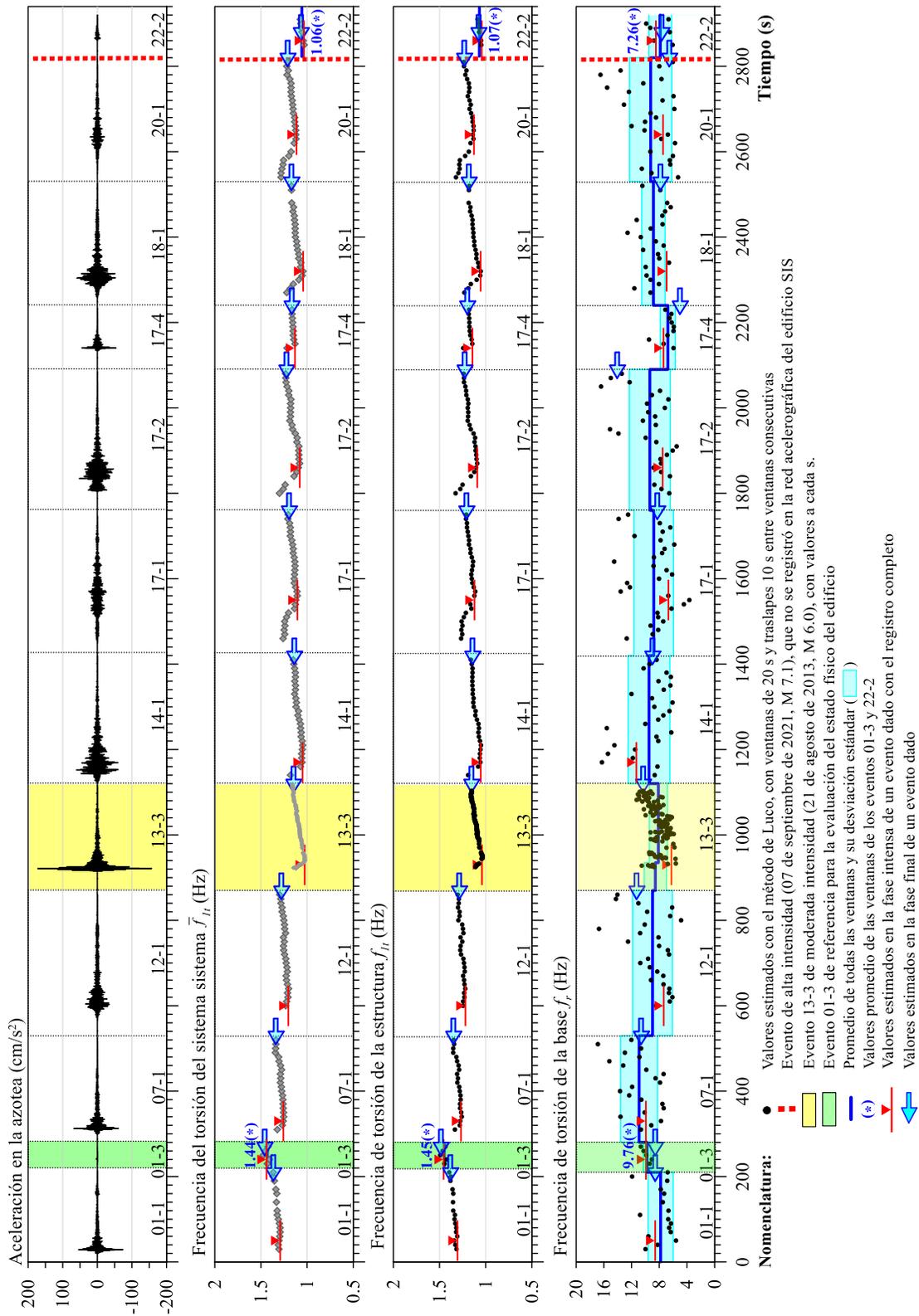


Figura 44. Comparación de las frecuencias de ISE del componente T, estimadas con los registros completos y por ventanas con el método de Luco



3.5 Comparación de las rigideces de ISE experimentales con valores analíticos

En esta sección se realiza la comparación entre los valores de las rigideces de ISE obtenidos con el método de Luco en los componentes L, T y torsión, a partir de los registros sísmicos de los eventos 01-1, 01-3, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4, 18-1, 20-1 y 22-2, con los obtenidos con expresiones analíticas mediante el Manual de Obras Civiles de CFE, diseño por sismo de 2017 (MDOC, 2019) y los obtenidos con Dyna5 (Novak *et al.*, 1995), siendo estos últimos retomados del trabajo de Murià-Vila *et al.* (2004). Los valores de las rigideces analíticas se presentan en la tabla 15.

En la comparación de los valores experimentales obtenidos a partir del análisis con los registros sísmicos completos, con los tramos de las fases finales de los registros, y los obtenidos mediante ventanas, se aplican las mismas observaciones mencionadas anteriormente en la sección 3.4 en términos de las frecuencias. Por lo tanto, las comparaciones con respecto a los valores analíticos se realizan solamente con los valores obtenidos por ventanas de cada evento antes mencionados.

En cuando a las rigideces analíticas, se emplean las expresiones establecidas en el MDOC-2017 para el cálculo de las rigideces de cabeceo (K_c) y de traslación (K_h) de la base en los componentes L y T. Para cálculo de las rigideces de torsión es mediante las expresiones propuestas por Gazetas (1990). Dado que las rigideces de ISE son dependientes de las frecuencias fundamentales del sistema, se utilizan los valores de 0.81, 1.07 y 1.44 Hz para el cálculo de las rigideces en los componentes T, L y torsión, respectivamente, dichos valores son obtenidos en el análisis del evento de referencia 01-3. Sin embargo, debido a los cambios en las frecuencias que han observado durante el monitoreo, se realiza el cálculo de las rigideces con las frecuencias fundamentales del sistema obtenidas en el último evento 22-2, tales valores son 0.68, 0.83 y 1.06 Hz para los componentes T, L y torsión, respectivamente. Es importante mencionar que las rigideces del conjunto de pilotes obtenidas con el MDOC-2017 se calculan sin tener en cuenta el efecto de grupo (EG).

Al comparar los valores obtenidos de las rigideces ISE con el MDOC-2017 a partir de las frecuencias de los eventos 01-3 y 22-2, se observa que las rigideces K_h del cajón o de los pilotes son iguales en ambos eventos. Así mismo, las rigideces K_c del conjunto de pilotes no difieren en ambos eventos. Sin embargo, las rigideces K_c del cajón de cimentación obtenidas a partir de las frecuencias del evento 22-2, difieren en 2.4 y 4.3 % con respecto a las rigideces obtenidas con las frecuencias del evento 01-3, respectivamente a los componentes L y T.

Por otro lado, en Dyna5, se utilizan dos modelos para calcular las rigideces de ISE. Uno de ellos es para obtener la contribución de rigideces del cajón de cimentación, mientras que el otro se utiliza para obtener la rigidez del conjunto de pilotes considerando o no el efecto de grupo (EG). Estos modelos tienen en cuenta las características geométricas de la cimentación, así como las propiedades del suelo de desplante. Para obtener más detalles sobre el cálculo con Dyna5, se pueden consultar los trabajos de Taborda (2003), Murià-Vila *et al.* (2004) y Correa (2005).

Tanto en el MDOC como en Dyna5, se presentan los valores de las rigideces en las condiciones estáticas y dinámicas. En la tabla 15 se observa que las rigideces dinámicas K_h y K_c de los pilotes obtenidas mediante el MDOC-2017 son iguales a las rigideces estáticas. Del mismo modo, las rigideces K_c y K_h de los pilotes obtenidas mediante Dyna5, tanto en condiciones estáticas como dinámicas, son iguales entre sí.

En cuanto a las rigideces del cajón de cimentación, con el MDOC-2017, en los componentes L y T se obtiene el mismo valor de K_h , que es de $0.51 \text{ N/m} \times 10^{10}$. Este valor no difiere entre las condiciones

estáticas y dinámicas. De manera similar, con Dyna5 se obtiene el mismo valor de $0.52 \text{ N/m} \times 10^{10}$ en ambos componentes, tanto en condiciones estáticas como dinámicas.

Tabla 15. Rigideces de ISE en los componentes L, T y torsión, estimadas con el programa Dyna5 (Murià-Vila et al., 2004) y el Manual de Diseño de Obras Civiles de CFE - 2017 (MDOC, 2019)

			MDOC-2017; Gazetas, 1990 (*)				Dyna5			
			Evento 01-3		Evento 22-2		Estático	Dinámico	Estático (EG)	Dinámico (EG)
			Estático	Dinámico	Estático	Dinámico				
T	K_h (N/m $\times 10^{10}$)	Pilotes	1.17	1.17	1.17	1.17	1.52	1.52	0.57	0.57
		cajón	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52	0.52	0.52	0.52
		Total	1.68	1.68	1.68	1.68	2.04	2.04	1.09	1.09
	K_{cL} (Nm/rad $\times 10^{12}$)	Pilotes	2.07	2.07	2.07	2.07	2.56	2.56	1.33	1.30
		cajón	1.65	1.43	1.65	1.47	1.58	1.34	1.58	1.34
		Total	3.72	3.50	3.72	3.54	4.14	3.90	2.91	2.63
L	K_h (N/m $\times 10^{10}$)	Pilotes	1.17	1.17	1.17	1.17	1.52	1.52	0.57	0.57
		cajón	0.51	0.50	0.51	0.51	0.52	0.52	0.52	0.52
		Total	1.68	1.67	1.68	1.68	2.04	2.04	1.09	1.09
	K_{cT} (Nm/rad $\times 10^{12}$)	Pilotes	2.81	2.80	2.81	2.80	3.45	3.46	1.44	1.40
		cajón	1.48	1.23	1.48	1.29	1.55	1.31	1.55	1.31
		Total	4.28	4.03	4.28	4.09	5.00	4.77	2.99	2.71
Torsión	K_r (Nm/rad $\times 10^{12}$)	Pilotes	1.87	1.87	1.87	1.87	2.49	2.49	2.49	1.40
		cajón	2.04	1.71	2.04	1.81	1.96	1.75	1.96	1.75
		Total	3.91	3.58	3.91	3.67	4.45	4.24	4.45	3.15

EG- considera el efecto de grupo de los pilotes. (*) Rigideces de torsión calculadas con expresiones propuestas por Gazetas (1990).

Entre los valores obtenidos con el MDOC-2017 y con Dyna5, se observa una similitud en las rigideces dinámicas de traslación, cabeceo y torsión del cajón de cimentación. Sin embargo, las rigideces del conjunto de pilotes difieren entre ambas estimaciones analíticas, siendo menores las rigideces K_c , K_h y K_r calculadas con el MDOC-2017. Además, se tienen mayores diferencias de las en comparación con los valores obtenidos con Dyna5 que consideran el efecto de grupo de los pilotes.

Es evidente que las rigideces dinámicas de cabeceo traslación y de torsión del conjunto de pilotes, al considerar el efecto de grupo con Dyna5, se reducen hasta 60, 60 y 44 %, respectivamente, en comparación a las rigideces que no lo consideran, esta variación puede cambiar de acuerdo con la cantidad y arreglo del conjunto de pilotes (Cruz Noguez *et al.*, 2007). En trabajos relacionados (Murià-Vila *et al.*, 2004; Correa y Murià-Vila, 2005), se destaca la importancia de considerar el efecto del conjunto de pilotes, evidenciando buenas aproximaciones entre valores experimentales y analíticos. Por lo tanto, en la comparación de los valores experimentales se realiza con respecto a los valores obtenidos con Dyna5(EG).

Rigideces de cabeceo de la base de los componentes L y T

En los eventos mostrados en la figura 46 se puede observar la semejanza entre los valores de la rigidez de cabeceo de la base K_{cT} del componente L obtenidos en las ventanas de las fases intensas con el

valor total de $2.71 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$ obtenido con la suma de la contribución del cajón y de pilotes obtenidos con Dyna5, entre los cuales se tienen diferencias inferiores al 15 %.

En relación con las rigideces de cabeceo K_{cL} del componente T, en la figura 47 se observa que valores obtenidos en las ventanas de las fases intensas tienen semejanza con el valor total de $2.63 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$ obtenido con Dyna5(EG). Teniendo diferencias entre 2 y 24 % con respecto a este valor.

Al comparar el valor de K_{cL} total de $2.63 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$ obtenido con Dyna5(EG) con los valores obtenidos en las ventanas de las fases finales, se observarán diferencias más significativas, siendo entre 9 y 40 % con respecto a dicho valor.

De acuerdo con las notables similitudes vistas entre la rigidez obtenida con Dyna5(EG) y los valores por ventanas de los eventos de baja intensidad, es evidente que la rigidez de cabeceo de la base contribuye tanto el cajón como el conjunto de pilotes, influenciado por el efecto de grupo.

En particular, en el evento 13-3 se pueden notar que los valores de K_{cT} y K_{cL} de las ventanas de su fase intensa difieren en mayor medida con los valores totales 2.71 y $3.48 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$ obtenidos con el Dyna5. Esto se debe a la misma reducción de la rigidez de cabeceo en las ventanas de la fase intensa de este evento de moderada intensidad. Ante el efecto no lineal por ISE distinguido en este evento, no queda muy claro que tanto contribuye del cajón y de los pilotes a la rigidez de cabeceo de la base.

Rigideces de traslación de la base de los componentes L y T

En las figuras 46 y 47 se observa que las rigideces de traslación K_h en los componentes L y T obtenidas con el método de Luco difieren en gran medida con el valor de la rigidez total $1.09 \text{ N/m} \times 10^{10}$, obtenido con Dyna5, el cual es más de doble en comparación a los valores experimentales. Por lo que, es conveniente comparar con las rigideces del cajón y de los pilotes de manera aislada.

En la figura 46 se aprecia que los valores promedio de rigideces K_h obtenidas en las ventanas de los eventos 01-1 al 12-1 se asemejan con las rigideces analíticas 0.52 y $0.57 \text{ N/m} \times 10^{10}$ correspondientes a la del cajón de cimentación y de los pilotes obtenidas con Dyna5. Tras el evento 13-3, los valores por ventanas de la rigidez K_h disminuyen con respecto al evento 01-3, teniendo diferencia de hasta 68 % con respecto con respecto a los valores de las rigideces obtenidas con Dyna5. En la figura 46 también se puede observar la una semejanza entre los valores de obtenidos en las ventanas de las fases finales de los eventos 14-1 al 22-2 con los valores 0.52 y $0.57 \text{ N/m} \times 10^{10}$ correspondientes a la del cajón de cimentación y de los pilotes obtenidas con Dyna5.

En cuanto a las rigideces K_h del componente T, los valores obtenidos en las ventanas de los eventos mostrados en la figura 47 son menores en comparación a las rigideces de 0.52 y $0.57 \text{ N/m} \times 10^{10}$ correspondientes a la del cajón de cimentación y de los pilotes obtenidas con Dyna5, respectivamente. Entre los cuales, las diferencias son entre 18 y 84 %, y entre 22 y 82 %, respectivamente.

Aun teniendo una mayor similitud de los valores experimentales con respecto a los valores de $0.52 \text{ N/m} \times 10^{10}$ correspondientes a las rigideces del cajón de cimentación obtenidos, no es lógico afirmar que este último contribuya de manera aislada a los efectos de ISE.

Rigideces de torsión de la base

En la figura 48 se comparan los valores de rigidez de torsión de la base K_r , obtenidos mediante el método de Luco, el programa Dyna5(EG). Debido a la fluctuación de los valores obtenidos en las ventanas, las similitudes con respecto a las rigideces analíticas no son muy claras, para ello se incluyen los valores promedios de las ventanas y sus DE.

En la figura 48 se observa que los valores promedio de las ventanas de los eventos de baja intensidad tienen una cercanía con el valor de rigidez K_r total de $3.15 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$ obtenido con Dyna5(EG), teniendo diferencias inferiores al 22 %.

Es interesante notar que en el evento 13-3 de moderada intensidad, los valores de las ventanas de asociados a su fase intensa se asemejan con los valores de 1.40 y $1.75 \text{ Nm/rad} \times 10^{12}$, correspondientes a la contribución de los pilotes y del cajón obtenidos con Dyna5(EG). En casos similares, se tiene semejanza con los valores de las ventanas de las fases intensas de los eventos 12-1, 17-1, 17-2, 17-4, 18-1 y 20-1 con los valores analíticos antes mencionados. Estas similitudes sugieren que, ante una mayor intensidad, la rigidez K_r no necesariamente resulta de la suma de contribuciones del cajón y de los pilotes.

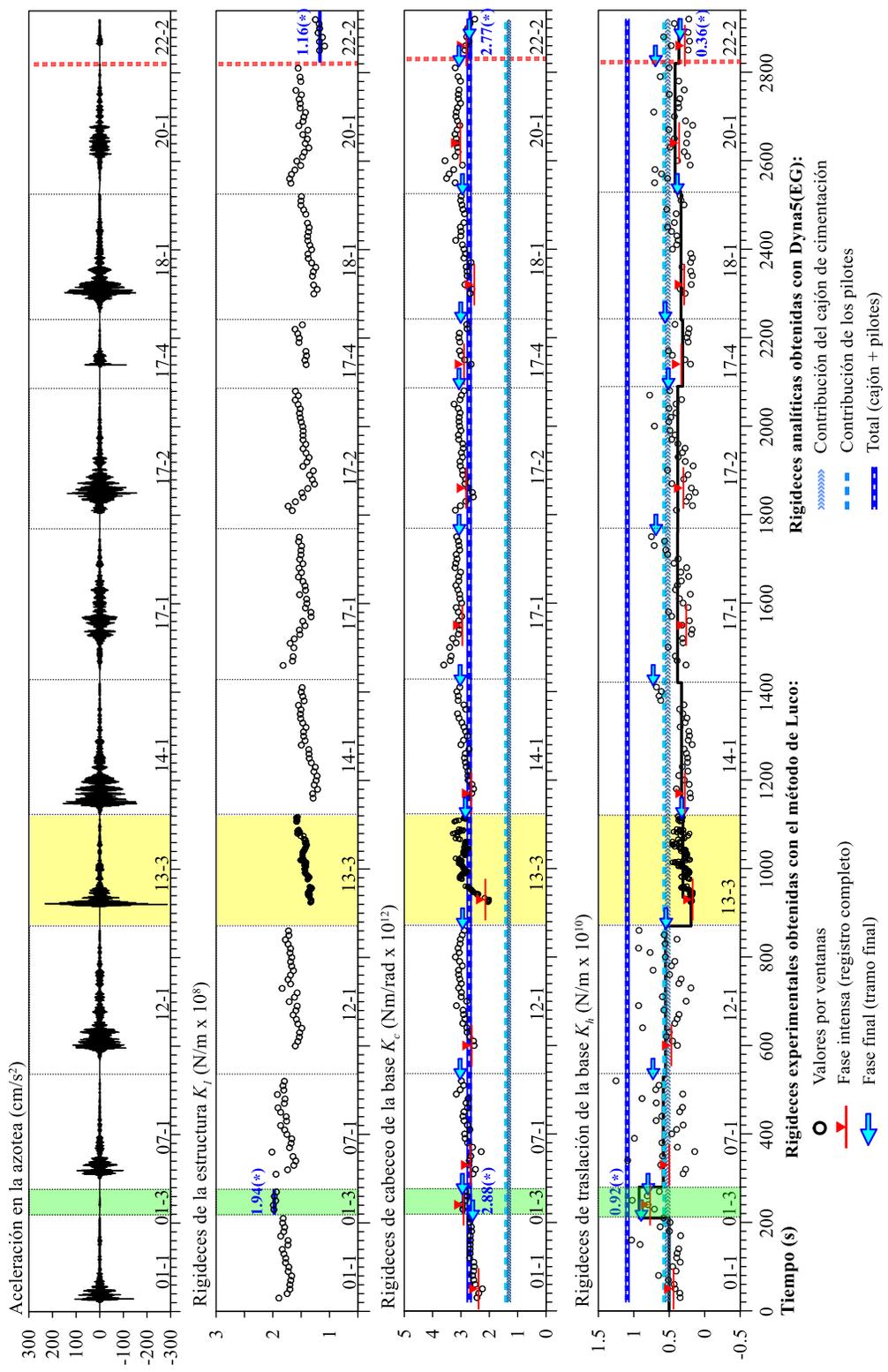


Figura 46. Comparativa de las rigideces dinámicas en el componente L obtenidas con el método de Luco, con el programa Dyna5(EG) (Murià-Vila, et al., 2004)

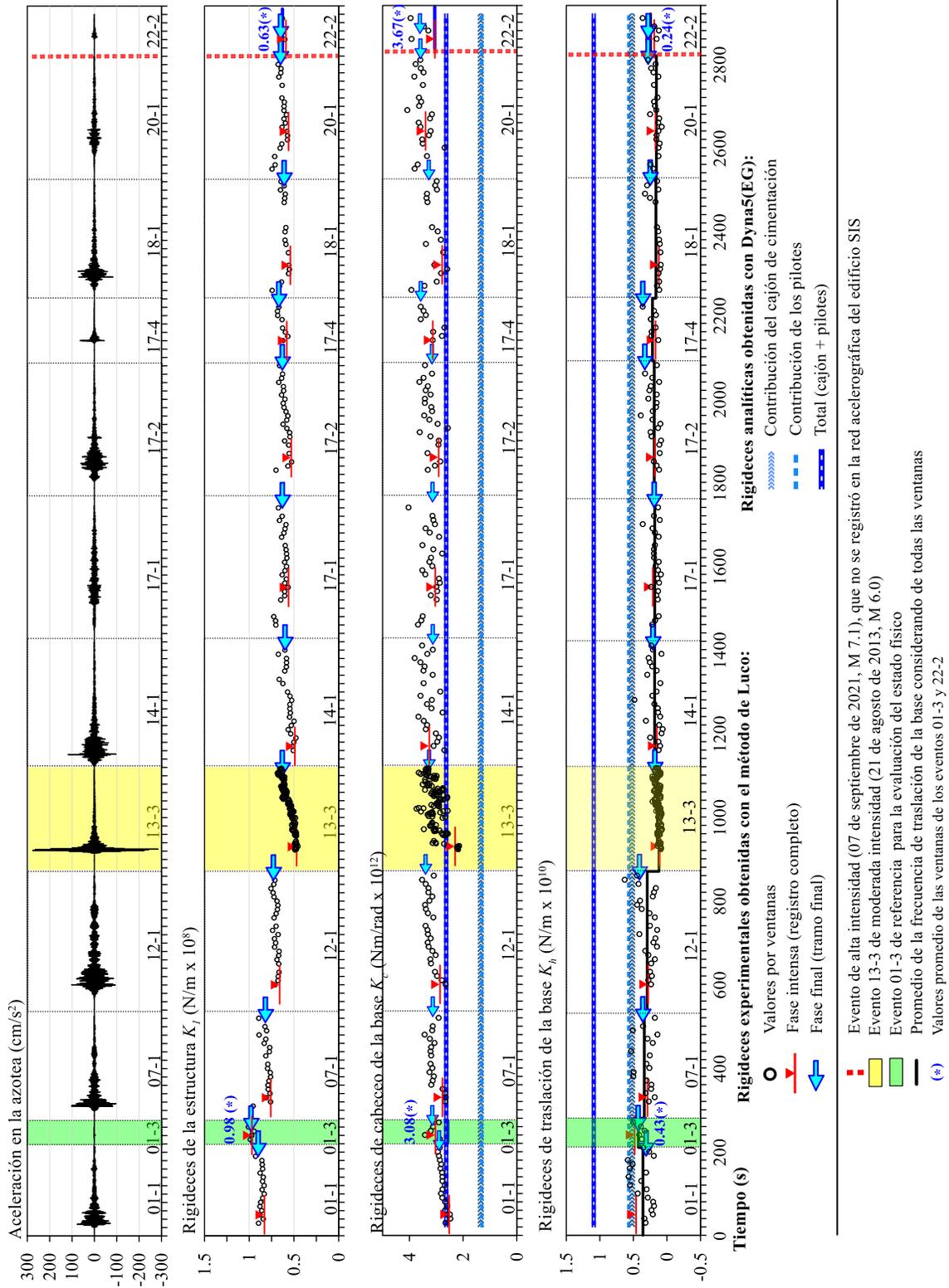


Figura 47. Comparativa de rigideces dinámicas en el componente T obtenidas con el método de Luco, con el programa Dyna5 (Muria-Vila, et al., 2004)

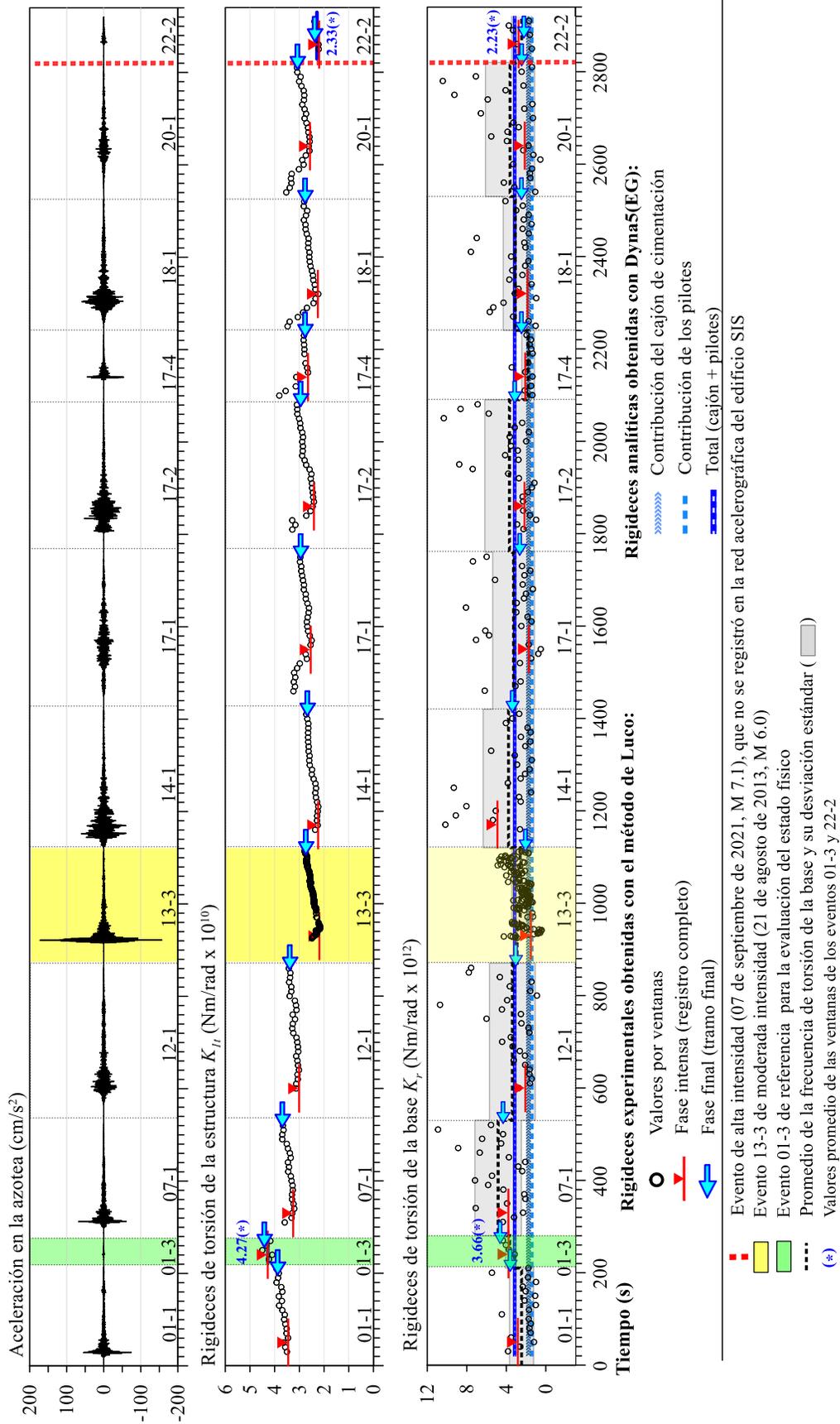


Figura 48. Comparativa de rigideces dinámicas de torsión obtenidas con el método de Luco y con el programa Dyna5 (Murrià-Vila, et al., 2004)

3.6 Cocientes espectrales sótano con respecto a la estación de campo

Para analizar la relación entre el movimiento efectivo en la cimentación con respecto al movimiento del terreno, se calcularon los cocientes espectrales de Fourier entre los puntos sótano centro (SO-CEN) y la estación de campo (JN), que aparecen en las figuras 13 a 15 de la sección 1.3 en los componentes L, T y V. Estos cocientes espectrales SOT-CEN/JN muestran los efectos de la ISE cinemáticos (Javier Avilés, 1999).

En la figura 49 se presentan los cocientes espectrales SOT-CEN/JN para los componentes L, T y V de cada evento sísmico indicado en la tabla 2 del capítulo 1. En cada componente se trazan las curvas de los cocientes espectrales de los 26 eventos de baja intensidad y el promedio de estos con una línea negra gruesa discontinua, así como el evento 13-3 de moderada intensidad con una línea gruesa negra. En las gráficas se incluyen una banda de color rojo entre 0.65 a 1.0 Hz, para representar el intervalo en el que han variado las frecuencias fundamentales de los sistemas en los componentes L y T durante los eventos 01-1 al 22-2, así mismo, una banda de color azul entre 1.05 y 1.45 Hz para indicar el intervalo de variación de la frecuencia fundamental de torsión del sistema, y una banda discontinua roja entre 0.77 y 0.83 Hz para presentar la frecuencia dominante del suelo.

Analizando los cocientes promedio, en el componente L se observa que, para frecuencias menores de 3.3 Hz los cocientes se mantienen cerca de la unidad, mientras que, para frecuencias mayores, las amplitudes espectrales se reducen con respecto a las del terreno. Por otro lado, en el componente T, las reducciones de las amplitudes espectrales son más considerables a partir de los 2.5 Hz. En el componente V, las amplitudes espectrales del sótano asociadas a frecuencias mayores de 4.0 Hz se reduce con respecto a las del terreno. Es decir, los efectos cinemáticos toman mayor relevancia en frecuencia mayores a las bandas de frecuencias fundamentales de vibración del sistema y a la banda de frecuencia dominante del suelo entre 0.77 y 0.83 Hz.

En la figura 50 se comparan las curvas de los cocientes espectrales SOT-CEN/JN de los nueve eventos más intensos registrados 01-1, 07-1, 12-1, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 con respecto a su promedio obtenido con los 26 eventos de baja intensidad, así mismo se compara el evento 13-3 de moderada intensidad con respecto a dicho promedio.

En los cocientes del componente L de los eventos mostrados en la figura 50 se observa que en la cercanía de la frecuencia fundamental de traslación ocurren amplificaciones de las amplitudes espectrales del cimiento con respecto a las del terreno en un orden de 10 a 15 %. En el evento 13-3 se observan múltiples amplificaciones, aunque no asociadas con las frecuencias fundamentales de traslación y de torsión. Por otro lado, en los cocientes del componente T, se observa que las amplitudes de Fourier asociadas a la frecuencia fundamental de traslación son muy semejantes a las del terreno, en cambio, los efectos cinemáticos son ligeramente más significativos en la frecuencia de torsión. Tanto para los eventos de baja intensidad como en el evento 13-3 de moderada intensidad, las reducciones de las amplitudes espectrales del sótano son inferiores al 10 % con respecto a las amplitudes del terreno. En cuanto a los cocientes del componente V, en general se puede observar que las amplitudes espectrales asociadas a las frecuencias fundamentales oscilan alrededor de la unidad.

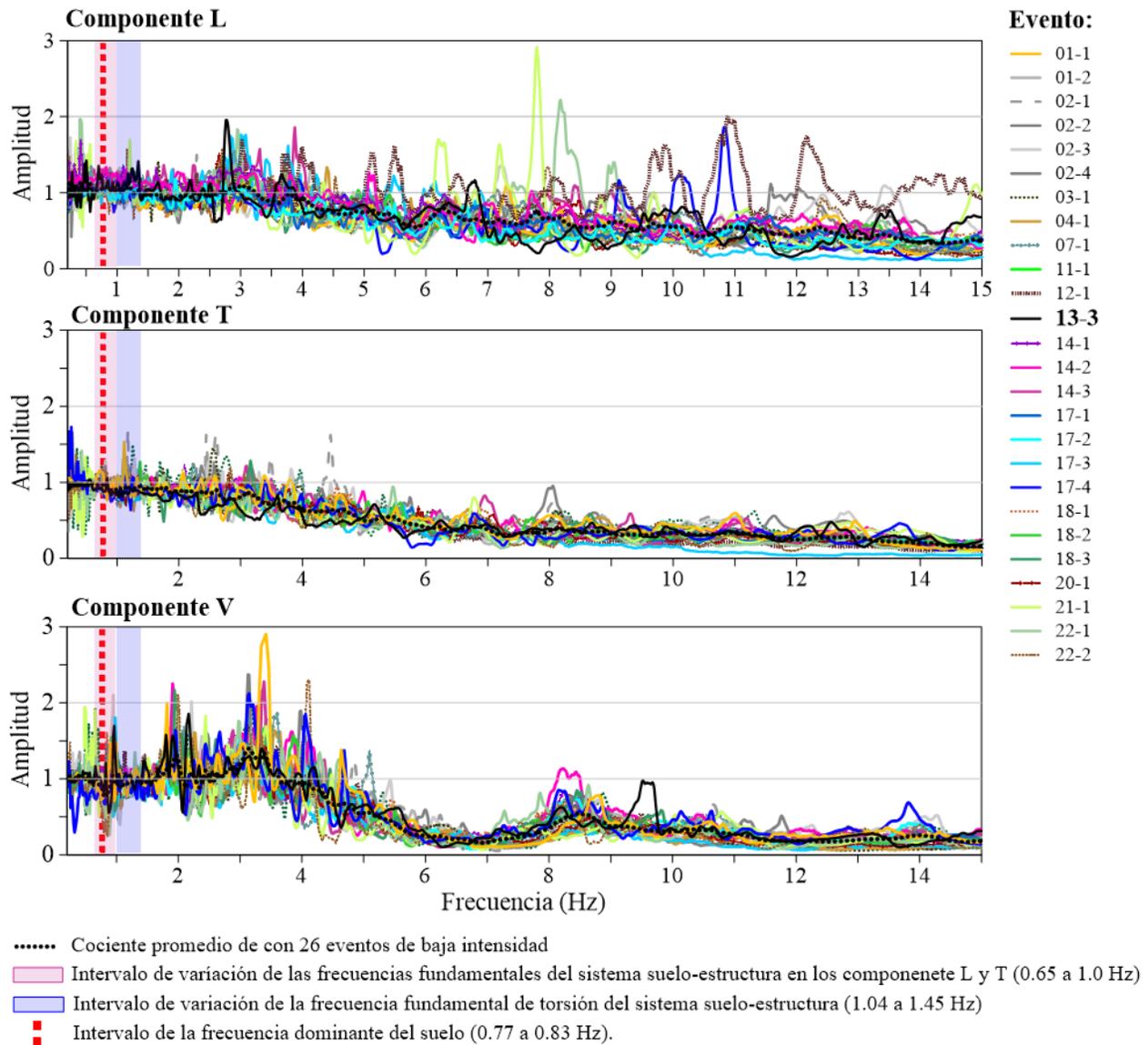


Figura 49. Cocientes espectrales SOT-CEN/JN de 27 eventos sísmicos registrados en los componentes L, T y V

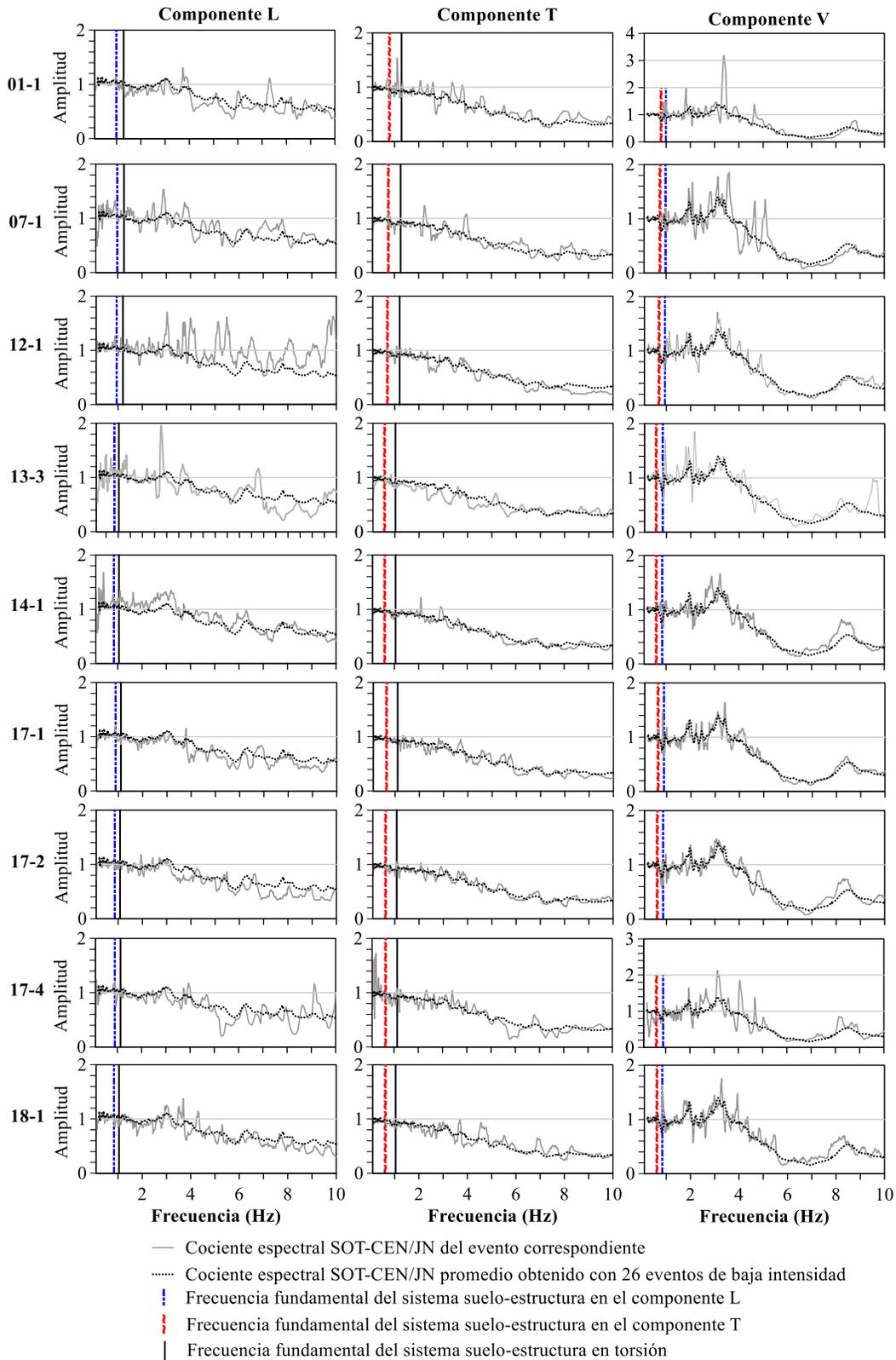


Figura 50. Comparación de los cocientes espectrales SOT-CEN/JN en los componentes L, T y V de los nueve eventos más intensos registrados (01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1) con los cocientes espectrales promedio de los 26 eventos de baja intensidad.

Capítulo 4. Movimiento del terreno del edificio SIS y en otras estaciones de Acapulco del II-UNAM

En este capítulo se presenta la respuesta y la variación del movimiento de la estación de campo en el que se encuentra desplantado el edificio SIS, ante los eventos sísmicos registrados durante el monitoreo (tabla 2).

Para ello, se realiza un análisis utilizando espectros de Fourier y espectros de respuesta calculados a partir de los registros sísmicos capturados en la estación de campo. El análisis con espectros de Fourier contempla la identificación de la frecuencia dominante del sitio en la estación de terreno que está ubicada en el jardín del predio del edificio SIS (estación SIS), mediante cocientes de Nakamura (Nakamura, 1989), calculados con los registros completos y con la ventana del tramo del sismo que representa a la fase final de dichos registros.

Como enfoque complementario, se realiza la identificación del periodo o frecuencia dominante del terreno de la estación del jardín del edificio SIS calculando los espectros de respuesta de aceleración y desplazamiento. Los valores obtenidos se comparan en términos de frecuencias con respecto a los valores identificados mediante los cocientes de Nakamura.

Para explorar la variación de la intensidad del movimiento de la estación SIS, se realiza un análisis comparativo entre dicha estación con respecto a otras seis estaciones acelerométricas que forman parte de la red acelerográfica del II-UNAM ubicadas en la ciudad de Acapulco, que actualmente están en operación. Estas estaciones son: La Venta (VNTA), Acapulco Escuela Diana (ACAD), Acapulco Preparatoria No. 2 (ACP2), Acapulco Renacimiento (ACAR), Acapulco Centro Cultural (ACAC) y Acapulco la Zanja (ACAZ).

La comparación entre estaciones del II-UNAM y la estación SIS en relación con de amplitud del movimiento durante la ocurrencia un mismo grupo de eventos sísmicos de mayor intensidad, para este caso, se han elegido los eventos: 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1, de acuerdo con la nomenclatura mostrada en la tabla 2.

Como primer paso, se analizan los registros de aceleración en el tiempo registrados en cada estación aplicando la metodología descrita en el subcapítulo 1.2, referente a la corrección de línea base y filtrado. Posteriormente, se realiza el análisis en el dominio de la frecuencia utilizando los espectros de Fourier de los eventos mencionados, identificando las frecuencias o periodos dominantes de cada

estación, apoyándose tanto en los cocientes de Nakamura, como en los espectros de respuesta de aceleración y de desplazamiento.

Durante la comparación entre estaciones, se consideran las diferencias que hay entre las máximas amplitudes de Fourier asociadas a una misma banda, donde se localiza la frecuencia dominante de cada sitio. Es importante aclarar que la máxima respuesta calculada con los espectros de respuesta de aceleración y de desplazamiento, así como las máximas amplificaciones estimadas mediante los cocientes de Nakamura, están regidas por a las frecuencias dominantes de cada estación. Por último, se comparan las amplificaciones o atenuaciones relativas del movimiento de la estación SIS en relación con las estaciones de Acapulco por medio de un cociente espectral o función de transferencia: estación/referencia.

4.1 Metodologías del análisis espectral

En este subcapítulo se presentan los criterios y procedimientos utilizados para realizar el análisis espectral mediante: cocientes de Nakamura (CN), espectros de respuesta de aceleración (ERA), espectros de desplazamiento (ERD), y las funciones de transferencia (FT) entre estaciones del II-UNAM.

Estimación de frecuencias de la estación de campo con los cocientes de Nakamura

La frecuencia dominante del terreno en cada estación de campo se identifica utilizando los cocientes a partir de los registros sísmicos capturados en dicha estación. Los CN se obtienen al calcular el cociente de los espectros de Fourier de los registros de aceleración de los componentes NS o EO con respecto al espectro de Fourier del registro del componente vertical (V). En la literatura, este tipo de cocientes es también conocido como cocientes H/V.

$$CN = \frac{\ddot{X}(f)_H}{\ddot{X}(f)_V} \quad \text{Ec. 25}$$

Donde

$\ddot{X}(f)_H$ espectro de Fourier del registro de aceleraciones absolutas en la estación de campo de los componentes horizontales NS o EO.

$\ddot{X}(f)_V$ espectro de Fourier del registro de aceleraciones absolutas de la estación de campo en el componente vertical V.

En este trabajo, la ec. 25 se utiliza particularmente para evaluar los espectros de Fourier en las estaciones de campo calculados con los registros completos y con el tramo de la fase final de los registros capturados en las estaciones seleccionadas. En este caso, el inicio del tramo de la fase final de un evento dado se determina siguiendo los criterios descritos en el subcapítulo 1.3.

La identificación de la frecuencia dominante en un sitio dado se realiza analizando cada componente horizontal por separado. Se ha observado que la frecuencia dominante de un sitio cercano a la bahía de Acapulco puede diferir entre componentes horizontales, independientemente del tipo de suelo y la intensidad del evento (Lazares, 2003). En los cocientes espectrales L/V y T/V se identifica la amplificación máxima ($Amp_{m\acute{a}x}$) y el valor de la frecuencia corresponde, y se asocia con la frecuencia dominante del sitio (f_s).

La banda de frecuencias dominante de un sitio específico se obtiene en función de la $Amp_{m\acute{a}x}$. En este caso, esta banda incluye las amplificaciones más significativas y que superan el 50 % de la $Amp_{m\acute{a}x}$. En la figura 51 se ilustra el evento 13-3 registrado en la estación SIS. En esta figura se observa que, para el evento más intenso registrado en el edificio SIS, la $Amp_{m\acute{a}x}$ está asociada a la frecuencia de 0.87 Hz, y en 0.65 Hz hay otra cresta cuya magnitud supera el 50 % de la $Amp_{m\acute{a}x}$, por lo tanto, la frecuencia dominante quede definida por una banda que incluye ambas amplificaciones. En el componente T, se puede apreciar que la única cresta se encuentra en 0.65 Hz, cuya magnitud es 43.6, por lo tanto, la frecuencia dominante del sitio es el valor antes dicho.

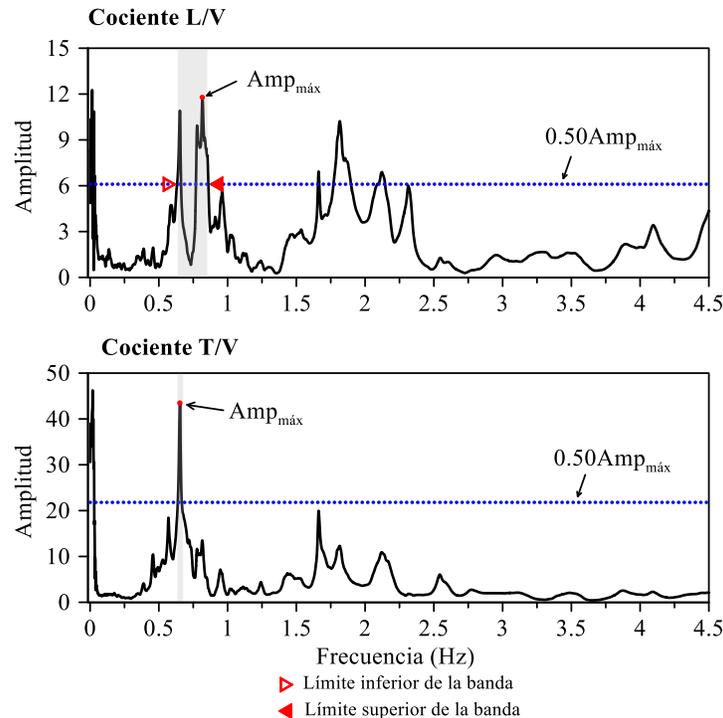


Figura 51. Identificación de la banda de frecuencias dominantes del sitio en los componentes L y T de la estación SIS en función de la amplificación máxima ($Amp_{m\acute{a}x}$) para el evento 13-3 de moderada intensidad

A continuación, se describe el procedimiento propuesto para identificar las frecuencias y bandas de frecuencias dominantes en las estaciones de campo utilizando los CN calculados con los espectros de Fourier de registros completos o utilizando el tramo de la fase final de los registros seleccionados.

- Procesamiento de los registros de la estación de campo, que implica la corrección de línea base y filtrado, según se describe en el subcapítulo 1.2.
- Estimación de los espectros de Fourier de los registros de campo en los componentes NS (componente L), EO (componente T) y V (vertical) de cada evento sísmico disponible en cada estación seleccionada. Esta estimación se realiza siguiendo los criterios establecidos en el Apéndice A.
- Cálculo de los CN (ec. 25) entre los componentes L/V y T/V.
- Identificación de las bandas de frecuencias utilizando los CN considerando las amplitudes que son mayores o iguales al 50 % de la $Amp_{m\acute{a}x}$.

- Determinación del valor de la frecuencia dominante que está asociado a la $Amp_{m\acute{a}x}$ y que se encuentra dentro de la banda previamente identificada.

Estimación de frecuencias de la estación de campo con espectros de respuesta

La identificación del periodo o frecuencia de un sitio se realiza de manera aproximada utilizando ERA y ERD, en donde se suele asociar el valor de la máxima respuesta con el periodo dominante un sitio de interés.

Para el cálculo de los ERA y ERD se utiliza el método numérico basado en la interpolación lineal conocido como el método de las ocho constantes. Con este método se obtiene la respuesta para múltiples sistemas, de diferente periodo y de un solo grado de libertad. La formulación para el cálculo de los ERA y ERD está detallada en el trabajo de Chopra (1995).

El cálculo de los ERA y ERD se realizó en ambos componentes horizontales ortogonales NS y EO. Para el cálculo se utilizó un porcentaje de amortiguamiento crítico de 5 %, un número de puntos igual a 400, a fin de contar con una resolución refinada del cálculo, un periodo mínimo (T_{min}) de 0.01 s, y un periodo máximo ($T_{m\acute{a}x}$) de 5.0 s.

Los espectros de respuesta se calculan a partir de los registros de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1. que fueron capturados simultáneamente, tanto en la estación SIS, como en las estaciones de Acapulco del II-UNAM. En cada estación, se identificó el valor de la máxima respuestas de aceleración ($a_{m\acute{a}x}$) y del máximo desplazamiento ($D_{m\acute{a}x}$), los cuales están asociados al periodo o banda de periodos dominantes de cada sitio.

Análisis comparativo entre estaciones de campo

Este análisis se realiza comparando el movimiento del terreno de la estación SIS con el movimiento del terreno donde se localizan las estaciones de Acapulco del II-UNAM, examinando los siguientes aspectos:

- Las máximas amplitudes asociadas a las frecuencias o bandas de frecuencias dominantes de cada estación, identificadas en los espectros de Fourier de los registros sísmicos, en los componentes NS y EO.
- Las máximas respuestas esperadas en osciladores de un grado de libertad, identificadas en los ERA y en los ERD, en los componentes NS y EO.
- Las $Amp_{m\acute{a}x}$ asociadas a las frecuencias dominantes de cada estación, obtenidas a través de los CN calculados con los registros completos, entre los componentes NS/V y EO/V.
- Las $Amp_{m\acute{a}x}$ asociadas a las frecuencias dominantes de cada estación, que son identificadas en los cocientes de Nakamura, utilizando el tramo de la final de los registros (CN_{ff}), entre los componentes NS/V y EO/V.
- Las amplificaciones o atenuaciones relativas de la estación SIS con respecto a las estaciones de Acapulco del II-UNAM (ACAZ ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA), por medio de FT de Fourier.

Para la estimación de las FT entre estaciones, que se menciona en último punto, se calculan con la siguiente ecuación:

$$FT = \frac{\ddot{X}(f)_{SIS}}{\ddot{X}(f)_{ACA}} \quad Ec. 26$$

Donde

$\ddot{X}(f)_{SIS}$ transformada de Fourier del registro de aceleraciones de la estación SIS
 $\ddot{X}(f)_{ACA}$ transformada de Fourier del acelerograma registrado en otra estación de campo en Acapulco.

Las FT se calculan con los registros de los componentes ortogonales horizontales NS y EO, correspondientes a los componentes L y T del edificio SIS (figura 1), respectivamente.

Los espectros de Fourier referidos en la ec. 25 corresponden a los registros completos de las estaciones de campo, aunque más adelante esta misma FT se aplica utilizando los espectros de Fourier del tramo de la fase final (FT_{ff}) de los registros sísmicos.

4.2 Análisis espectral del sitio SIS

4.2.1 Estimación de las frecuencias dominantes con los CN

En la figura 52 se muestran los CN entre los componentes L/V y T/V, calculados con los registros completos de 27 eventos sísmicos (tabla 2) capturados en la estación SIS. En esta figura se representa con una curva de línea negra gruesa el promedio de los CN (CN_{prom}), obtenido con 26 CN eventos de baja intensidad y excluyendo al evento de mayor intensidad registrado por la red acelerométrica del edificio (evento 13-3).

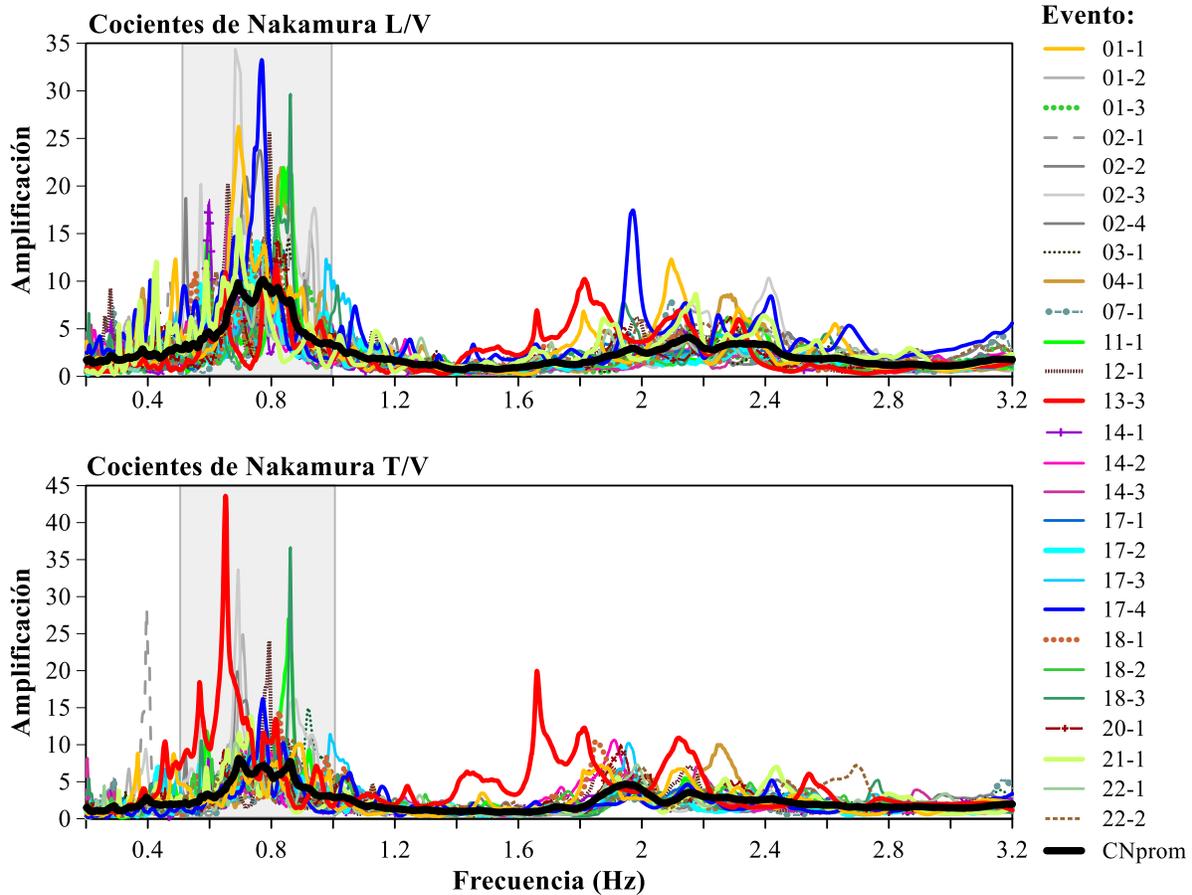
En ambos componentes se observa que las $Amp_{m\acute{a}x}$ se concentran en una banda de frecuencias que va de 0.50 hasta 1.10 Hz, apreciando que éstas difieren entre cada evento y entre componentes. En los cocientes entre los componentes L/V, se aprecia que los eventos 01-1, 12-1, 17-4 y 18-1 sobresalen del resto por tener las crestas más pronunciadas, con $Amp_{m\acute{a}x}$ iguales o mayores que un factor de amplificación de 25 unidades. En contraste con ellos, en los cocientes entre los componentes T/V, el evento 13-3 de moderada intensidad, sobresale por tener una $Amp_{m\acute{a}x}$ de 43.6 unidades, siendo este el mayor factor de amplitud estimado.

En la tabla 16 se muestran los valores de las frecuencias asociados a las $Amp_{m\acute{a}x}$ identificados en los CN entre los componentes horizontales ortogonales L/V y T/V. Se observa que para los componentes L/V, los valores de la frecuencia del sitio (f_s) varían entre los valores de 0.60 y 0.98 Hz, mientras que para los cocientes T/V, este valor va de 0.65 a 0.99 Hz.

En la mayoría de los eventos analizados, los valores de la frecuencia f_s difieren ligeramente entre ambos componentes. Solo en los eventos 02-1, 02-3, 02-4, 11-1, 17-1, 17-4 y 18-3 se obtiene el mismo valor de f_s en los cocientes L/V y T/V. En los demás eventos, los valores de la frecuencia f_s difieren entre 3 y 29 % entre los componentes L/V y T/V, observándose las mayores diferencias en los eventos 01-1, 13-3, 14-1, 14-1, 14-3 y 20-1.

Los valores de las frecuencias f_s indicados en la tabla 16 se grafican en la figura 53, donde se muestran con puntos sólidos los valores de la f_s asociados a la $Amp_{m\acute{a}x}$, las bandas de frecuencia se indican con una franja de color gris tenue, mientras que los valores del CN_{prom} se representan con una línea discontinua azul, y su banda de frecuencias asociada se indica con una franja continua de color azul tenue.

En general, en los eventos analizados se tiene una banda de frecuencias dominante, en donde se encuentran múltiples amplificaciones significativas. Solo en los eventos 13-3 y 17-4, de mayor magnitud, se tiene una sola cresta en el cociente L/V o T/V.



CNprom: promedio de 26 CN calculados con los registros completos de los eventos de baja intensidad, excluyendo el evento de moderada intensidad 13-3.

Intervalo (0.50 - 1.0 Hz) en donde se identifican las $Amp_{m\acute{a}x}$ asociadas a los valores de la frecuencia dominante del suelo.

Figura 52. Cocientes de Nakamura (CN) entre los componentes L/V y T/V calculados con los registros completos de 27 eventos sísmicos registrados en la estación SIS

En la figura 53 se observa que los valores de la frecuencia f_s obtenidos en cada evento mediante los cocientes L/V son mayores en comparación con su valor promedio de 0.69 Hz (representado con línea punteada); las diferencias van del 10 al 43 % con respecto a su valor promedio. Por otro lado, los valores de la frecuencia f_s identificados en los cocientes L/V difieren entre 10 y 15 % con respecto a su valor promedio de 0.77 Hz.

Para obtener un promedio que represente de manera más adecuada la variación de los valores puntuales de la frecuencia f_s y sus respectivas bandas, se considera la estimación de los promedios basados en los CN de eventos con similares intensidades de Arias ($I_{h-Arias}$). Esto se hace para evitar

la variabilidad causada por eventos más intensos y con el fin de homogenizar el criterio de cálculo, en este caso, basado en un método que depende de la energía sísmica de cada evento.

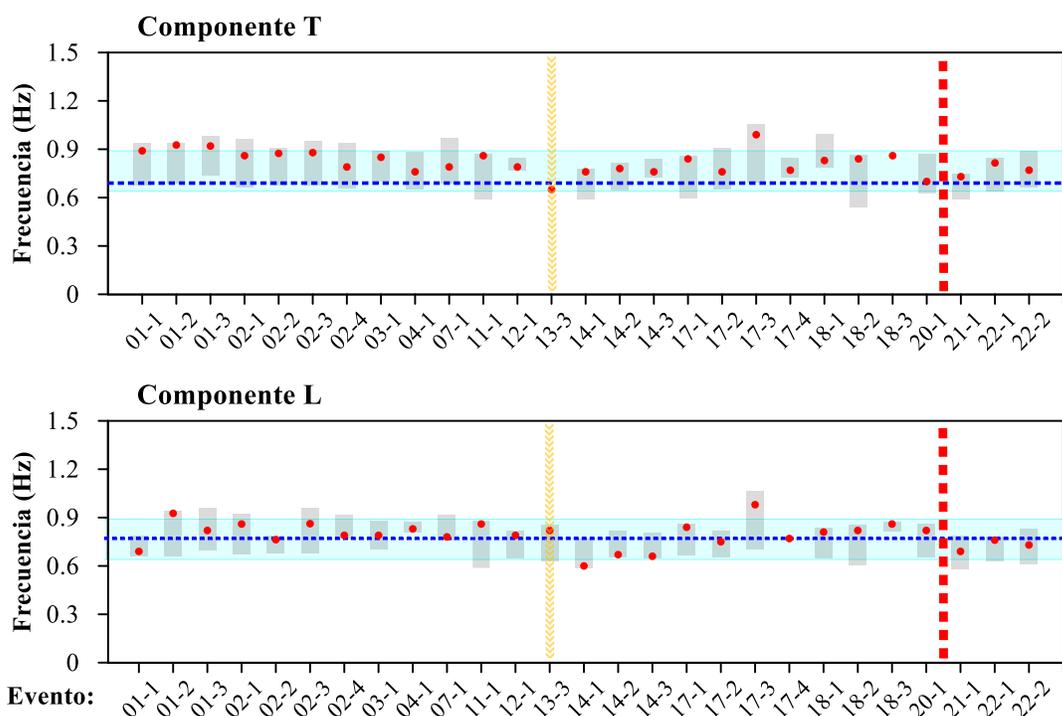
Tabla 16. Frecuencias y bandas de frecuencias dominantes identificados en los cocientes de Nakamura entre los componentes L/V y T/V calculados con los registros completos de la estación SIS

Evento	Amp _{máx}		f_s asociada a la Amp _{máx} (Hz)		Banda de frecuencias ⁽²⁾ (Hz)	
	L/V	T/V	L/V	T/V	L/V	T/V
01-1	26.3	10.1	0.78	0.89	0.66 - 0.79	0.68 - 0.94
01-2	15.3	11.2	0.93	0.93	0.66 - 0.94	0.69 - 0.94
01-3	12.8	14.9	0.82	0.92	0.7 - 0.96	0.74 - 0.98
02-1	14.9	10.3	0.86	0.86	0.68 - 0.92	0.67 - 0.96
02-2	23.7	8.7	0.76	0.87	0.68 - 0.79	0.68 - 0.91
02-3	18.4	16.1	0.86	0.88	0.68 - 0.96	0.68 - 0.95
02-4	14.6	9.1	0.79	0.79	0.77 - 0.91	0.66 - 0.94
03-1	17.7	10.8	0.79	0.85	0.7 - 0.88	0.7 - 0.89
04-1	21.9	9.0	0.83	0.76	0.81 - 0.88	0.72 - 0.88
07-1	6.0	5.9	0.78	0.79	0.76 - 0.92	0.69 - 0.97
11-1	22.0	27.0	0.86	0.86	0.59 - 0.88	0.59 - 0.87
12-1	25.6	24.0	0.79	0.79	0.65 - 0.82	0.77 - 0.85
13-3	11.7	43.6	0.82	0.65	0.63 - 0.86	0.65
14-1	18.1	11.7	0.60	0.76	0.58 - 0.77	0.59 - 0.78
14-2	11.4	10.5	0.67	0.78	0.66 - 0.82	0.65 - 0.82
14-3	17.0	10.3	0.66	0.76	0.65 - 0.81	0.73 - 0.84
17-1	13.2	10.6	0.84	0.84	0.66 - 0.86	0.6 - 0.86
17-2	14.1	8.5	0.75	0.76	0.65 - 0.82	0.65 - 0.91
17-3	12.3	11.4	0.98	0.99	0.7 - 1.06	0.69 - 1.05
17-4	33.3	16.2	0.77	0.77	0.77	0.73 - 0.85
18-1	13.4	14.5	0.81	0.83	0.65 - 0.84	0.79 - 0.99
18-2	16.5	8.3	0.82	0.84	0.61 - 0.85	0.54 - 0.87
18-3	29.6	36.6	0.86	0.86	0.81 - 0.87	0.86
20-1	14.2	8.9	0.82	0.70	0.66 - 0.86	0.63 - 0.87
21-1	16.5	13.8	0.69	0.73	0.58 - 0.78	0.59 - 0.75
22-1	12.5	10.3	0.76	0.68	0.63 - 0.78	0.64 - 0.84
22-2	15.2	11.3	0.73	0.77	0.61 - 0.83	0.67 - 0.89
CNprom ⁽¹⁾	10.2	8.1	0.77	0.69	0.64 - 0.89	0.65 - 0.89

⁽¹⁾Valores obtenidos de los CN promedio de 26 eventos de baja intensidad, que excluyen al evento 13-3 por ser el único de moderada intensidad.

⁽²⁾Intervalo de frecuencias definido por las amplificaciones $\geq 0.50Amp_{máx}$

Como primer paso, se calcula el promedio de los CN con ocho eventos de baja intensidad (CNprom8E) 01-1, 07-1, 12-1, 14-1, 14-2, 17-2, 17-4 y 18-1 que tienen una $I_{h-Arias}$ superior los 5.0 cm/s, en particular, estos eventos seleccionados implican una posible tendencia de agrietamiento en elementos estructurales o no estructurales del edificio SIS (Pérez-Liévia K., 2019), que a su vez están asociados a distorsiones de entrepiso de alrededor del 0.05% (Aldama *et al.*, 2019). Por otro lado, se calcula el promedio de los CN de los 8 eventos antes excluidos, que tienen una intensidad $I_{h-Arias}$ superior a 5 cm/s. Este promedio se denomina CNprom8E. En ambos promedios se excluye el evento 13-3, de moderada intensidad.



- Nomenclatura:**
- Valor de la frecuencia asociado a la $Amp_{m\acute{a}x}$ identificado en la banda de frecuencias (■) del CN, en donde las amplificaciones son $\geq 0.50Amp_{m\acute{a}x}$
 - Valor de la frecuencia asociado a la $Amp_{m\acute{a}x}$ identificado en la banda de frecuencias (■) del CNprom calculado con 28 eventos de baja intensidad, en donde las amplificaciones son $\geq 0.50Amp_{m\acute{a}x}$
 - ⇨⇨⇨ Ocurrencia del evento de moderada intensidad 13-3 (21 de Agosto de 2013, M 6.0)
 - Ocurrencia del evento de alta intensidad (07 de septiembre de 2021, M 7.1), que no se registró en la red acelerográfica del edificio SIS

Figura 53. Valores de la frecuencia y de las bandas de frecuencia dominantes del terreno de la estación SIS, obtenidos con los CN calculados con los registros completos en los componentes T y L

En la tabla 17 se comparan los valores de las frecuencias y bandas de frecuencia obtenidos mediante los CNprom (promedio de 26 eventos de baja intensidad), los CNprom18E (promedio de 18 CN de los eventos con $I_{h-Arias} < 5$ cm/s) y los CNprom8E (promedio de 8 CN de los eventos con $I_{h-Arias} > 5$ cm/s). Se incluye el evento 13-3 de moderada intensidad para su comparación.

En la figura 54 se ilustran las curvas de los CN para los cocientes entre los componentes L/V y T/V, de los eventos agrupados con base en su intensidad $I_{h-Arias}$. En cada gráfica, se incluyen las curvas de los CNprom18E y CNprom8E, trazadas con una línea continua y gruesa de color negro.

Se puede apreciar que tanto en los cocientes CNprom18E como en los CNprom8E se obtienen bandas de frecuencia muy similares en ambos componentes. Los valores del límite inferior de las bandas varían entre 0.65 y 0.66 Hz, mientras que el valor del límite superior oscila entre 0.83 y 0.89 Hz. Se

puede observar que estos límites son consistentes con los límites de las bandas de frecuencias obtenidas con los CNprom (promedio con los 26 eventos de baja intensidad).

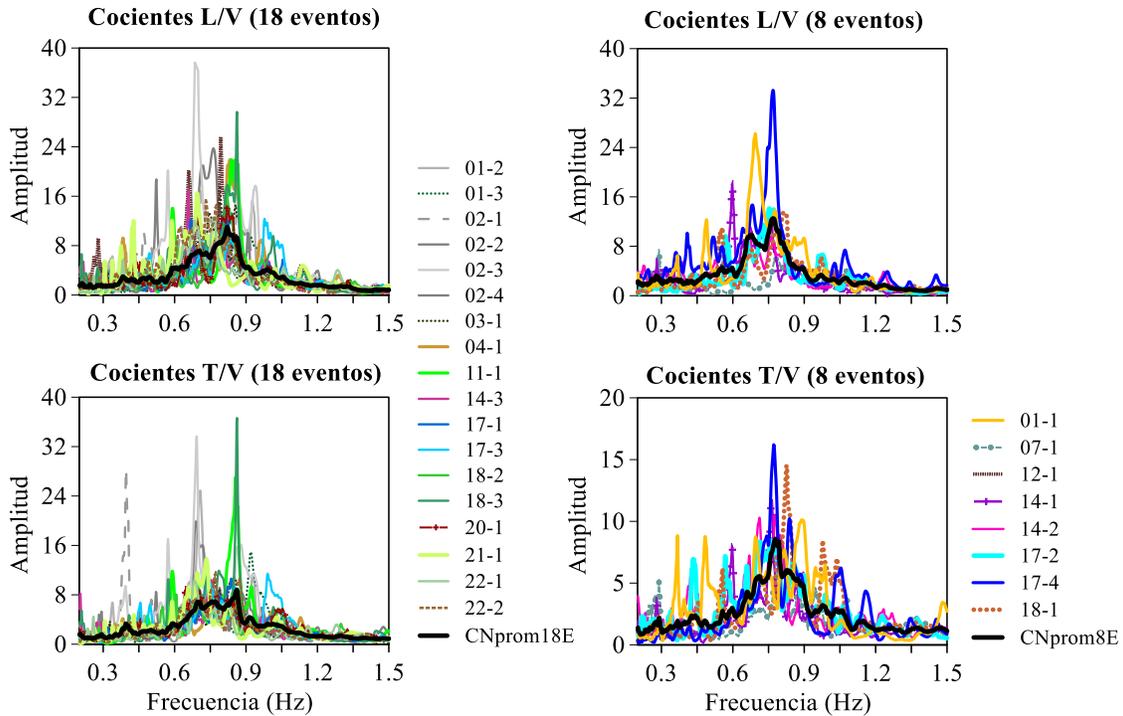


Figura 54. Cocientes de Nakamura promedio L/V y T/V de 18 eventos con $I_{h-Arias} < 5$ cm/s (CNprom18E) y de 8 eventos con $I_{h-Arias} > 5$ cm/s (CNprom8E)

Tabla 17. Comparación de los valores de la frecuencia dominante y $Amp_{m\acute{a}x}$ identificados de los CN promedio y del evento 13-3 de moderada intensidad

Cociente	Frecuencia asociada a $Amp_{m\acute{a}x}$ (Hz)		Banda de frecuencias (Hz)		$Amp_{m\acute{a}x}$	
	L/V	T/V	L/V	T/V	L/V	T/V
CNprom ⁽¹⁾	0.77	0.69	0.64 - 0.89	0.64 - 0.89	10.2	8.1
CNprom18E ⁽²⁾	0.82	0.86	0.65 - 0.89	0.65 - 0.88	10.7	8.5
CNprom8E ⁽³⁾	0.77	0.78	0.65 - 0.83	0.66 - 0.88	12.5	8.6
Evento 13-3	0.82	0.65	0.63 - 0.86	0.65	11.7	43.6

⁽¹⁾Promedio de los CN de 26 eventos de baja intensidad, excluyendo el evento 13-3

⁽²⁾Promedio de los CN de 18 eventos de baja intensidad con $I_{h-Arias} < 5$ cm/s

⁽³⁾Promedio de los CN de 8 eventos de baja intensidad con $I_{h-Arias} > 5$ cm/s

En el caso de los CNprom18E (promedio de los eventos con $I_{h-Arias} < 5$ cm/s), se identificaron valores de la frecuencia f_s de 0.82 y 0.86 Hz, en los cocientes L/V y T/V, respectivamente. Por otro lado, con los CNprom8E (promedio de los eventos con $I_{h-Arias} > 5$ cm/s) se obtuvieron los valores de frecuencia de 0.77 y 0.78, para los cocientes L/V y T/V, respectivamente. Dichos valores son

menores en 6.1 y 9.3 % en comparación con los valores obtenidos en los CN_{prom18E}, para los respectivos componentes.

Además, las Amp_{máx} identificados con los eventos del grupo CN_{prom8E} alcanzan valores de amplificación de 12.5 y 8.6 unidades para los cocientes L/V y T/V, respectivamente, las cuales son mayores en 16.8 y 1.2 % con respecto a las Amp_{máx} identificadas en los promedios del grupo CN_{prom18E} (10.7 y 8.5 unidades, respectivamente). Estas diferencias evidencian los cambios en las intensidades estimadas utilizando diferentes grupos de eventos.

Al presenciar múltiples amplificaciones significativas, asociadas al intervalo de frecuencias dominantes del terreno, esto puede interpretarse en un posible comportamiento no lineal del suelo. Sin embargo, dado que los eventos analizados en este estudio son de baja intensidad, las causas y efectos asociados a las fluctuaciones del movimiento en el intervalo de la frecuencia dominante no se abordan en detalle y son tema de futuros estudios. En cambio, se busca comprender la variación de la frecuencia f_s así como su banda de frecuencias dominantes ante eventos de mayor intensidad. Tal es el caso del evento 13-3, caracterizado aquí como el más intenso registrado por la red acelerométrica del edificio a la fecha.

A fin de determinar si se ha producido un comportamiento no lineal del suelo durante un evento específico, se comparan los CN del evento de interés con aquellos que reflejan un comportamiento lineal. Un comportamiento no lineal se evidencia a través del cambio en la frecuencia del sitio, en este caso, en este estudio, dicho cambio se observa en la reducción de la frecuencia f_s , asociada con la Amp_{máx}, consecuencia de la disminución en la rigidez del subsuelo del sitio a lo largo del tiempo (Lazares, 2003 y Murià-Vila, *et al.*, 2021).

Los CN que reflejan el comportamiento lineal se obtienen de los eventos de baja intensidad, en donde se supone que hay una menor variación del movimiento del terreno y, por lo tanto, la frecuencia dominante no sufre un cambio transitorio asociado con el estado de esfuerzos del suelo durante el sismo. En este sentido, se considera que los CN_{prom18E} tienen un mayor peso ya que representan un comportamiento lineal debido a que están relacionados a los eventos de muy baja intensidad ($I_{h-Arias} < 5$ cm/s).

Ahora bien, se procede a comparar el evento 13-3 de moderada intensidad con los valores de los CN promedio, con el fin de identificar la variación que tiene la frecuencia f_s ante la ocurrencia de este evento.

En la figura 55 se comparan las curvas de los CN del evento 13-3 para los cocientes L/V y T/V con respecto a los CN promedios. Las figuras 55a y 55b muestran la variación de las bandas de frecuencias de los cocientes L/V y T/V, respectivamente, mientras que en las figuras 55c y 55d se comparan los valores de la frecuencia f_s asociados a las Amp_{máx}.

De la figura 55a se observa la reducción tanto de los valores del límite superior como inferior de la banda de frecuencia para el evento 13-3 (banda roja tenue) que contrasta con los estimados para la banda del grupo CN_{prom18E}, los cuales arrojan diferencias de entre 3.8% y 3.5%, que corresponden a los límites superior e inferior, respectivamente. Por otro lado, la banda de frecuencias del grupo CN_{prom8E}, (eventos con $I_{h-Arias} > 5$ cm/s), que está representada con una franja achurada, no muestra ninguna reducción del valor del límite superior, solo el límite inferior de la banda se reduce en un 6.7% con respecto al valor de la banda del grupo CN_{prom18E}.

Para el caso de los cocientes T/V, mostrados en la figura 55b, se puede observar una diferencia, estimada en 1.2% entre los valores del límite inferior de las bandas de los CN_{prom8E} y CN_{prom18E},

es decir, la variación es poco significativa. En el caso del evento 13-3, no se muestra una banda de frecuencia en el cociente T/V, lo que significa que el movimiento predominante está asociado al valor de la frecuencia f_s de 0.65 Hz.

El valor la frecuencia f_s identificado en el cociente T/V durante el evento 13-3, de moderada intensidad, es de ~ 0.65 Hz, que es 24 % menor en comparación con el valor de 0.86 Hz identificado en el resto de los eventos de pequeña intensidad. Esta variación significativa de la frecuencia f_s tiene una influencia directa en la interacción entre el sistema suelo-estructura, al disminuir la frecuencia del suelo es evidente que la frecuencia del sistema también disminuya con ello las mismas frecuencias y rigideces de ISE (cambios observables en las secciones 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5).

En el cociente L/V del evento 13-3, se identifican dos amplificaciones significativas (Figura 56). La primera amplificación está asociada a la frecuencia f_s de 0.65 Hz, cuyo factor de amplificación es 11.5. Este valor de f_s difiere en 20.5 % respecto al valor f_s de 0.82 Hz, el cual describe el comportamiento lineal del suelo (grupo de eventos utilizados para estimar CN_{prom18E} con $I_{h-Arias} < 5$ cm/s). La segunda amplificación tiene una magnitud de 12.9 y está asociada a la frecuencia de 0.82 Hz, coincidiendo con el valor que representa el comportamiento lineal del suelo. Debido a que se tienen múltiples amplificaciones significativas en el cociente L/V, no es posible determinar con precisión la disminución de la frecuencia f_s a partir de esa única lectura, es por ello que es deseable conocer la variación de f_s a lo largo de la duración del evento, en este trabajo esto se ha hecho haciendo uso de una estimación por ventanas, el procedimiento se detalla en la siguiente sección.

Al comparar los resultados del grupo CN_{prom8E} con los del grupo CN18E, se observa una reducción de los valores de la frecuencia f_s asociados a las $Amp_{m\acute{a}x}$. En los cocientes L/V y T/V (figura 55c) se obtienen los valores de la frecuencia f_s de 0.77 y 0.78 Hz, respectivamente. Estos valores son 6.1 y 9.3 % menores con respecto a los valores de 0.82 y 0.86 Hz, referidos en la tabla 17 para el grupo de eventos con $I_{h-Arias} < 5$ cm/s, respectivamente, y que representan el comportamiento lineal del suelo ante eventos de baja intensidad. Dichas reducciones en la frecuencia f_s también sugieren un posible cambio en el comportamiento lineal del suelo, aunque son menos significativos en comparación con lo observado en el evento 13-3.

En resumen, en los CN del evento 13-3 y los CN_{prom8E} (eventos de intensidad $I_{h-Arias} > 5$ cm/s) se distingue la reducción de los valores de la frecuencia asociados a las $Amp_{m\acute{a}x}$ aludiendo al posible comportamiento no lineal del suelo a través del tiempo. A fin de elaborar más en esta hipótesis en la siguiente sección se analizan estimaciones hechas con los CN calculados con el tramo de la fase final de los 27 eventos estudiados (Tabla 2).

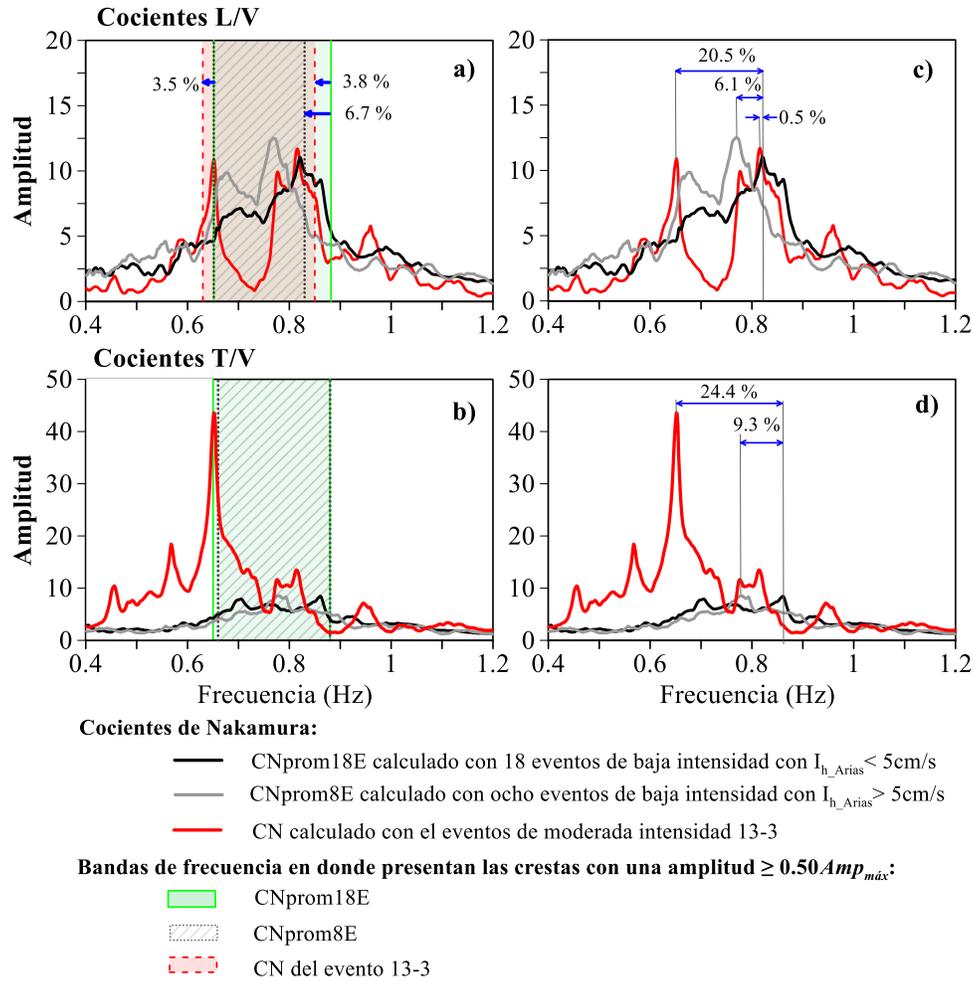


Figura 55. Comparación de los CN del evento 13-3 y los CNprom8E con respecto a los CNprom18E. En a y b indican la variación en porcentaje de los límites de las bandas de frecuencia. En c y d indican la variación en porcentaje de los valores de la frecuencia f_s

4.2.2 Estimación de las frecuencias dominantes en la fase final con los CN

La estimación de los CN con los espectros de Fourier de los tramos de la fase final (CN $_{ff}$) de los seleccionados (tabla 2), tiene como objetivo identificar la frecuencia f_s del sitio SIS en condiciones de amplitudes de aceleración muy pequeñas.

Cabe destacar que en el tramo de la fase final de los registros de los eventos seleccionados (tabla 2) las aceleraciones menores de 10 cm/s^2 , logrando obtener amplitudes Fourier menores de 6 cm/s . Con ello se esperarí obtener una menor variación de la frecuencia f_s y de las bandas de frecuencias.

En la figura 56 se muestran los resultados de los CN $_{ff}$ entre los componentes L/V y T/V obtenidos con el tramo de la fase final de los registros de los 27 eventos previamente analizados. Además, se comparan con las curvas promedio de los CN (CN $_{promff}$) calculados con los 27 eventos, incluyendo el evento 13-3, estas se representan con una línea negra continua.

En las figuras C.1 a C.3, del apéndice C, se grafican los espectros de Fourier en los componentes L, T y V de los tramos de las fases finales de cada evento, utilizados para el cálculo de los CN_{ff} que se presentan en la figura 56.

En la figura 56 se muestra una banda de color gris que representa el intervalo en donde identificaron las $Amp_{máx}$ y sus valores de frecuencia f_s asociados. Note que dentro de esta banda de frecuencias las amplificaciones son más significativas, las cuales varían entre 7 y 35 unidades. Fuera de estas bandas se observan otras amplificaciones mayores de 15 unidades, pero están asociadas a frecuencias menores que 0.40 Hz, estas amplificaciones se ignoran para efectos del análisis, ya que son singularidades ocasionadas por la existencia de amplitudes de Fourier muy pequeñas (menores que 0.01 cm/s) en el componente V para dicha banda.

A partir de los resultados mostrados en la figura 56 se identificaron las $Amp_{máx}$ asociadas a las frecuencias f_s y las bandas de frecuencia asociadas de cada evento utilizando tanto CN_{ff} como CN_{promff} , los resultados se pueden consultar en la tabla 18.

Los valores de la frecuencia f_s identificados en los CN_{promff} son de 0.81 y 0.82 Hz, en los cocientes L/V y T/L, y cuyas $Amp_{máx}$, tienen valores promedio de 9.5 y 7.5, respectivamente. Estas frecuencias difieren en 1.2 % entre sí, diferencia se atribuye principalmente al margen de error inherente en el proceso de estimación.

En el caso de los CN_{ff} obtenidos con los eventos 02-2, 02-3, 04-1, 12-1, 14-3, 18-1 y 18-2, se observa que se define una sola cresta en el componente L, lo que indica que el movimiento es dominante en el valor de la frecuencia identificado. Para el componente T, solo el evento 14-1 muestra el mismo comportamiento. Esto contrasta con los CN_{ff} de los demás eventos, donde se observan múltiples crestas asociadas a la frecuencia del sitio.

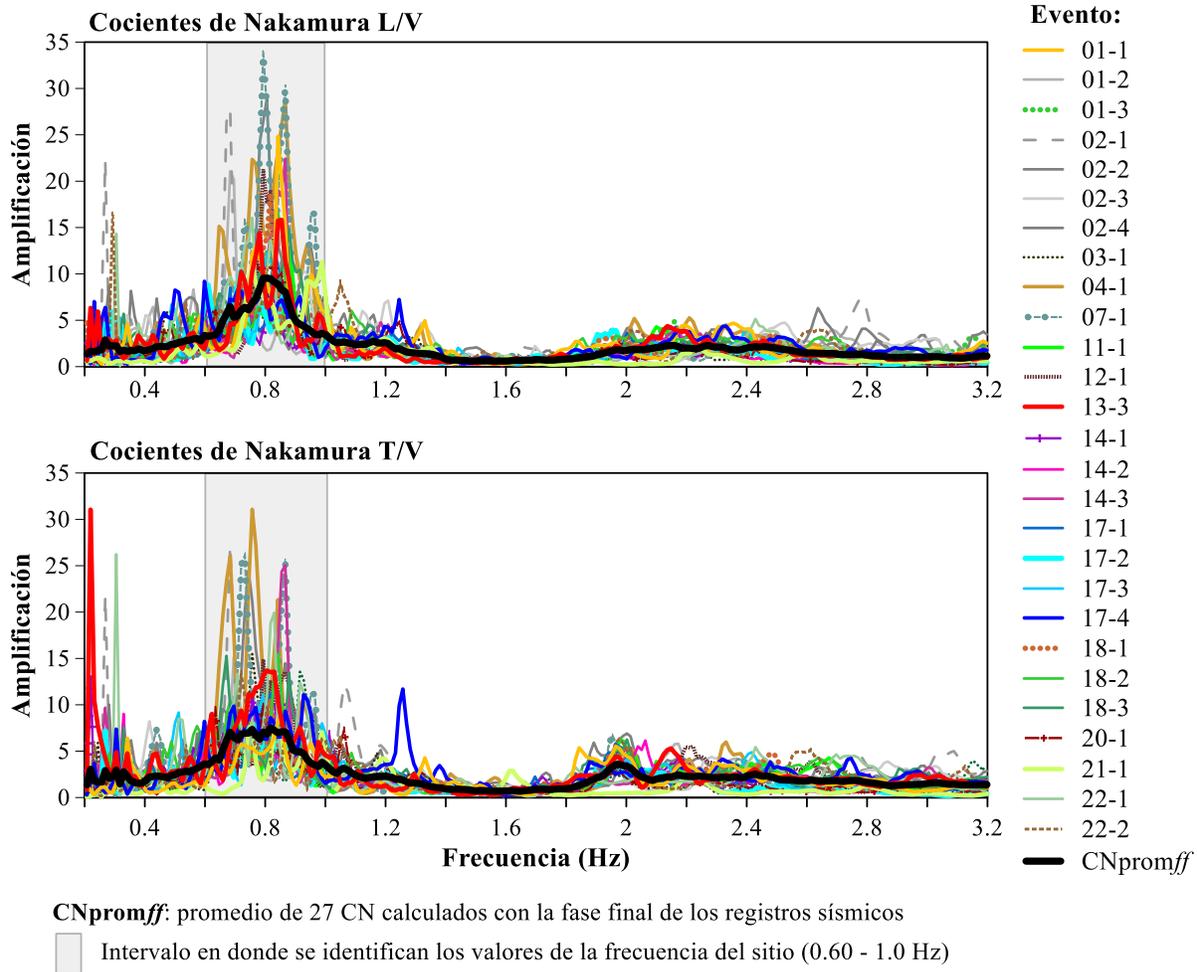


Figura 56. Cocientes de Nakamura entre los componentes L/V y T/V utilizando el tramo de la fase final de los registros de 27 eventos sísmicos capturados en la estación SIS

En la figura 57 se muestran los valores de la frecuencia f_s representados con cruces e identificados con los CN_{ff} , la banda de frecuencias se representa con una barra de línea continua. Análogamente, los valores promedio de la frecuencia f_s se indican con una línea punteada y su banda de frecuencias asociada se representa con una franja continua y con relleno achurado. En esta figura se pueden apreciar los valores de la frecuencia f_s asociados a las $Amp_{m\acute{a}x}$ los cuales se ajustan adecuadamente a las líneas punteadas que representan a los valores promedio de 0.81 y 0.82 Hz, con diferencias menores de 11 y 13 % en los cocientes L/V y T/V, respectivamente.

Por otro lado, en el análisis del evento 13-3 y al referido comportamiento no lineal durante este evento que es mencionado en la sección previa, no es evidenciado en el análisis empleando el tramo de su fase final, en este caso los valores de la frecuencia f_s obtenidos en los cocientes L/V y T/V para este evento, son de 0.85 y 0.81 Hz, respectivamente, los cuales son cercanos a los valores promedio 0.81 y 0.82 Hz obtenidos con los CN_{promff} entre los componentes L/V y T/V, respectivamente.

Tabla 18. Frecuencias f_s y bandas de frecuencias dominantes identificados en los cocientes de Nakamura entre los componentes L/V y T/V obtenidos con el tramo de la fase final de los registros

Evento	Amp _{máx}		f_s asociadas a las Amp _{máx} (Hz)		Banda de frecuencias (Hz)	
	L/V	T/V	L/V	T/V	L/V	T/V
01-1	36.7	8.5	0.85	0.85	0.85	0.63 - 0.96
01-2	21.1	15.1	0.76	0.76	0.67 - 0.77	0.66 - 0.77
01-3	12.3	13.6	0.81	0.92	0.70 - 0.96	0.74 - 0.99
02-1	18.3	7.6	0.81	0.83	0.67 - 0.85	0.64 - 0.85
02-2	37.3	24.5	0.79	0.74	0.79	0.71 - 0.87
02-3	15.1	10.3	0.88	0.88	0.88	0.66 - 0.97
02-4	11.7	8.3	0.83	0.76	0.76 - 0.85	0.57 - 0.85
03-1	12.8	15.5	0.83	0.76	0.67 - 0.93	0.68 - 0.79
04-1	46.2	31.1	0.85	0.76	0.85	0.65 - 0.85
07-1	33.7	25.4	0.79	0.87	0.77 - 0.88	0.70 - 0.88
11-1	12.9	7.6	0.88	0.82	0.76 - 0.90	0.62 - 0.90
12-1	21.3	14.9	0.79	0.79	0.79	0.76 - 0.91
13-3	15.8	13.7	0.85	0.81	0.70 - 0.90	0.67 - 0.91
14-1	7.9	11.3	0.82	0.84	0.58 - 0.85	0.59 - 0.89
14-2	7.3	11.2	0.78	0.88	0.72 - 0.91	0.73 - 0.91
14-3	22.4	25.1	0.87	0.87	0.87	0.84
17-1	12.9	11.2	0.83	0.82	0.66 - 0.86	0.66 - 0.86
17-2	10.4	8.4	0.72	0.73	0.59 - 0.89	0.65 - 0.94
17-3	12.2	11.1	0.81	0.79	0.77 - 0.89	0.73 - 1.01
17-4	9.2	11.1	0.79	0.93	0.66 - 0.93	0.65 - 0.97
18-1	18.7	10.6	0.82	0.82	0.82	0.66 - 0.90
18-2	16.5	15.5	0.84	0.84	0.84	0.65 - 0.87
18-3	14.8	13.4	0.88	0.88	0.73 - 0.91	0.62 - 0.89
20-1	11.3	9.8	0.77	0.79	0.69 - 0.86	0.63 - 1.08
21-1	10.8	8.1	0.76	0.76	0.73 - 1.00	0.72 - 1.00
22-1	16.0	19.9	0.76	0.83	0.66 - 0.82	0.68 - 0.93
22-2	10.2	13.3	0.81	0.72	0.64 - 0.83	0.70 - 0.89
⁽¹⁾ CN _{promff}	9.5	7.5	0.81	0.82	0.66 - 0.89	0.65 - 0.94

⁽¹⁾Valores obtenidos de los CN promedio de 26 eventos de baja intensidad y con el evento 13-3 de moderada intensidad

⁽²⁾Intervalo de frecuencias en dónde se presentan las amplificaciones $\geq 0.50Amp_{máx}$

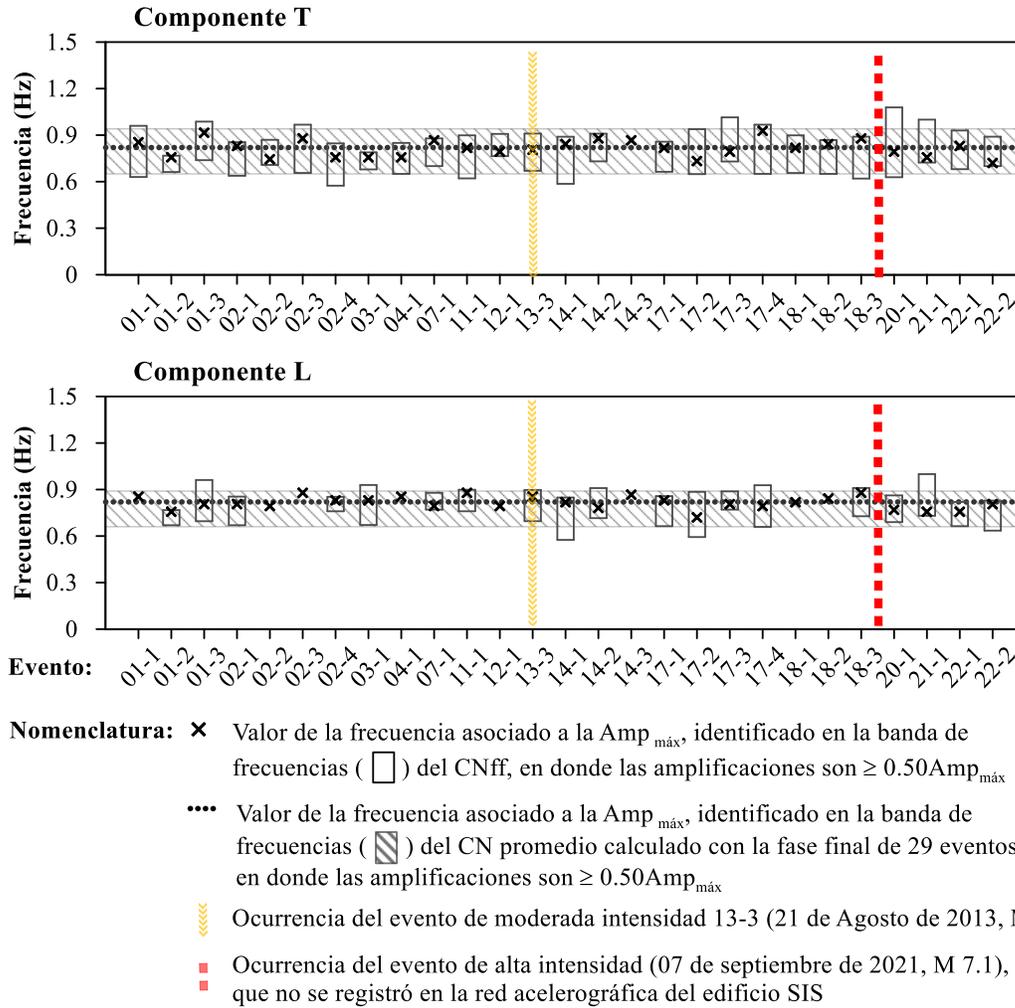


Figura 57. Valores de la frecuencia dominante y de las bandas de frecuencia identificadas en los cocientes T/V y L/V utilizando el tramo de la fase final de los registros de la estación SIS

4.2.3 Estimación de las frecuencias dominantes con espectros de respuesta

Identificación de los periodos o frecuencias con ERA

En esta sección, se presentan los espectros de respuesta de aceleración (ERA) y de desplazamiento (ERD) del sitio SIS, calculados con los registros de los 27 eventos sísmicos capturados en el sitio SIS. Con estos espectros se identificaron los valores del periodo fundamental del sitio (T_s), que están relacionados con la máxima respuesta espectral esperada.

En la figura 56 se presentan los ERA en los componentes L y T de la estación SIS. Para analizar la respuesta en los eventos de baja intensidad, en las secciones A y B de esta figura se muestra una ampliación de las curvas para periodos menores a 2 s.

Al examinar los ERA, se observa que las máximas aceleraciones ($a_{m\acute{a}x}$) están asociadas a periodos menores que 1.50 s. La traza del evento 13-3, de moderada intensidad, sobresale por tener las mayores aceleraciones ($a_{m\acute{a}x}$) en ambos componentes, que son de 1095 y 1577 cm/s^2 en los respectivos

componentes L y T. Mientras que, para los eventos de baja intensidad, las $a_{m\acute{a}x}$ se mantienen por debajo de los 350 cm/s^2 , para el intervalo de periodos mostrado en la figura.

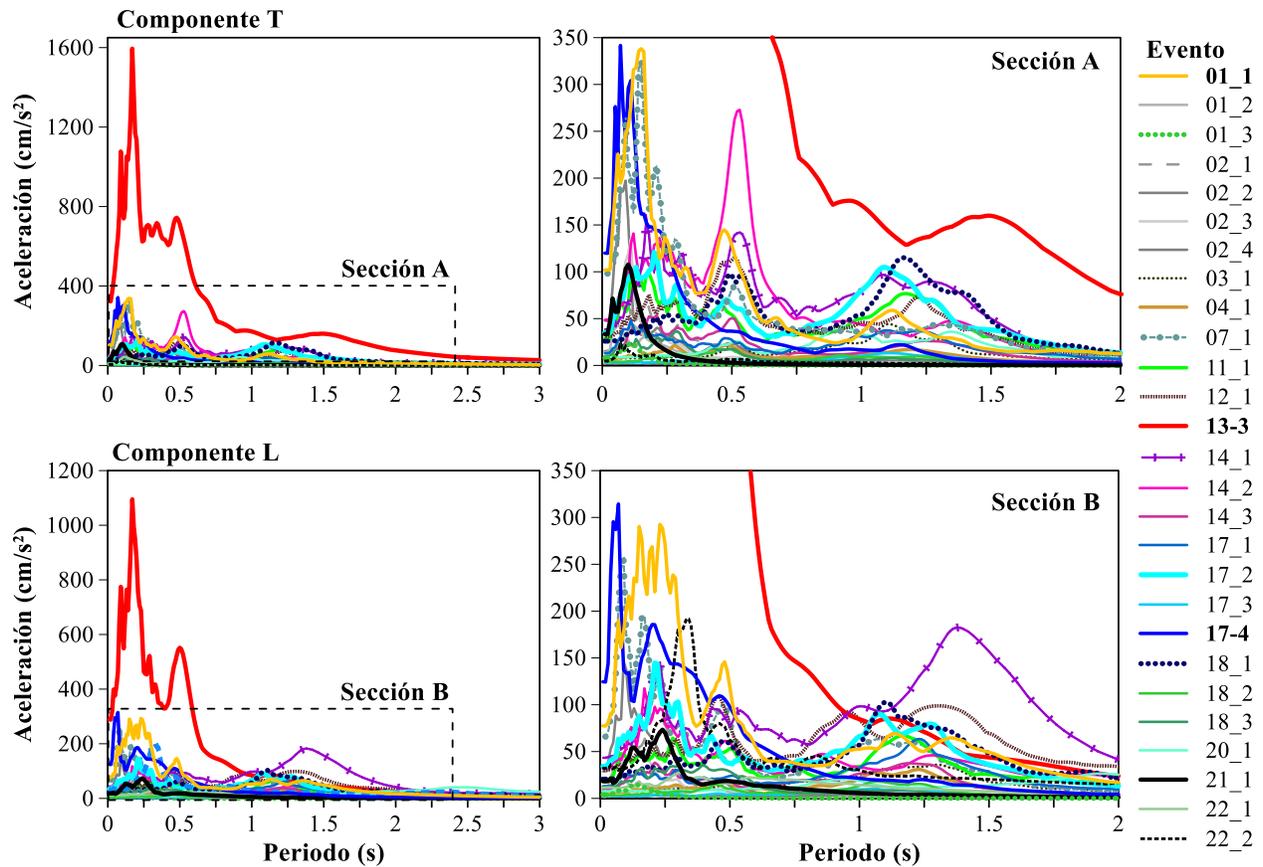


Figura 58. Espectros de respuesta de aceleración de los componentes L y T de 27 eventos sísmicos capturados en la estación SIS

En la tabla 19 se presentan los valores de las $a_{m\acute{a}x}$ de cada evento en los componentes L y T, junto con el periodo al que está asociada dicha respuesta máxima y se incluye la banda de periodos donde se localizan las aceleraciones más significativas.

Como se puede observar, los valores de las $a_{m\acute{a}x}$, identificados en cada evento, predominan para periodos menores a 0.5 s. Los valores de los periodos asociados a la aceleración máxima (tabla 19) varían entre componentes y de evento a evento. Solo en algunos casos se obtuvo el mismo valor del periodo dominante en ambos componentes, tal es el caso de los eventos 01-3, 02-2, 02-3, 13-3, 14-3, 17-2 y 17-4.

En términos de periodos, la banda de frecuencias dominante obtenida con los CNprom está comprendida entre 1.1 y 1.6 s. Comparativamente con los ERA, se aprecian algunas crestas relacionadas en este intervalo, sin embargo, en la mayoría de los eventos, los valores de T_s asociados a las $a_{m\acute{a}x}$ no concuerdan con esta banda de periodos dominantes.

Nuevamente, se observa cómo los límites de las bandas de periodos fluctúan entre un evento y otro. Los valores del límite inferior de la banda varían entre 0.08 y 0.44 s, mientras que los valores del límite superior oscilan entre 0.30 y 1.60 s. Debido a la discrepancia de los valores los periodos T_s asociados a las $a_{m\acute{a}x}$ y de las bandas de periodos observables, no se logran definir un valor único y consistente empleando los ERA calculados con los registros de la estación de jardín en el edificio SIS.

Tabla 19. Periodos T_s y bandas de periodos dominantes identificados en los ERA en los componentes L y T obtenidos con los registros capturados en la estación SIS

Evento	$a_{m\acute{a}x}$ (cm/s ²)		Ts asociado a la $a_{m\acute{a}x}$ (s)		Banda de periodos dominante (s)	
	L	T	L	T	L	T
01-1	292.6	336.4	0.23	0.15	0.70 - 1.43	0.16 - 1.15
01-2	34.8	48.7	0.06	0.06	0.60 - 0.48	0.06 - 0.54
01-3	14.9	23.2	0.13	0.11	0.13	0.11
02-1	92.6	94.8	0.21	0.14	0.70 - 1.17	0.07 - 0.52
02-2	145.9	195.9	0.09	0.09	0.06 - 0.48	0.09
02-3	67.9	134.5	0.11	0.11	0.06 - 0.47	0.11
02-4	5.1	4.3	1.13	0.55	0.03 - 1.29	0.14 - 0.72
03-1	35.9	44.1	1.30	1.11	0.48 - 1.35	0.53 - 1.32
04-1	30.9	22.0	1.23	0.48	0.29 - 1.25	0.28 - 1.23
07-1	254.2	329.8	0.09	0.15	0.09 - 1.25	0.09 - 0.53
11-1	67.0	97.4	1.17	0.18	0.08 - 1.41	0.08 - 1.30
12-1	109.0	115.3	0.45	0.51	0.15 - 1.62	0.15 - 1.32
13-3	1094.9	1577.1	0.17	0.17	0.09 - 0.53	0.09 - 0.53
14-1	182.6	150.5	1.38	0.17	0.22 - 1.74	0.17 - 1.40
14-2	117.5	272.6	0.17	0.53	0.12 - 0.52	0.12 - 0.59
14-3	38.1	53.8	0.21	0.21	0.14 - 1.29	0.12 - 1.33
17-1	63.4	48.1	1.23	0.11	1.23	0.09 - 1.38
17-2	144.5	117.1	0.21	0.20	0.15 - 1.33	0.12 - 1.33
17-3	10.2	13.1	1.05	1.10	1.05	1.10
17-4	314.4	316.8	0.07	0.07	0.04 - 0.30	0.08 - 0.16
18-1	102.7	115.1	1.10	1.16	0.30 - 1.47	0.29 - 1.48
18-2	18.1	17.6	1.07	0.49	0.22 - 1.33	0.22 - 1.27
18-3	35.3	37.3	0.30	0.29	0.16 - 0.59	0.06 - 0.51
20-1	20.7	41.7	0.95	0.92	0.92 - 3.00	0.44 - 1.61
21-1	73.3	104.7	0.24	0.10	0.13 - 0.69	0.04 - 0.10
22-1	27.4	43.0	0.30	0.11	0.15 - 1.28	0.11
22-2	192.3	23.8	0.34	0.07	0.30 - 0.88	0.07 - 0.56

$a_{m\acute{a}x}$ – valor de la máxima de aceleración identificados en los ERA.

Identificación de los periodos o frecuencias con ERD

En la figura 59 se presentan los ERD de los componentes L y T, calculados utilizando los registros sísmicos de la estación de jardín del sitio del edificio SIS. De estos espectros por cada evento se identifican los valores de los desplazamientos máximos ($D_{m\acute{a}x}$) así como su periodo de sitio asociado. Estos valores se muestran en la tabla 20.

En la figura 59 se observa que en ambos componentes las crestas más pronunciadas se concentran entre los periodos de 1.1 y 1.3 s, teniendo concordancia con la banda de periodos dominante del sitio obtenida con los CNprom, que está comprendida entre 1.1 y 1.6 s.

En el componente T, el mayor $D_{m\acute{a}x}$ corresponde al evento 13-3 de moderada intensidad, con un desplazamiento igual a 9.5 cm; en el componente L, comparable con el evento 14-1, con un desplazamiento igual a 9.1 cm . Mientras que, en el resto de evento seleccionados, los $D_{m\acute{a}x}$ son inferiores a 4 cm en los componentes L y T.

En los eventos de baja intensidad, los valores del periodo T_s , en el componente L, varían entre 1.04 y 1.45 s, en promedio 1.26 s. Mientras que en el componente T, estos varían entre 1.06 y 1.40 s, en promedio de 1.22 s.

Es importante notar que, en el evento 13-3, de moderada intensidad, se identifica el máximo valor del periodo T_s , que es de 1.57 s y corresponde al componente T, este incremento del periodo se ve reflejado en el espectro mostrado en la figura 59. En cuanto al componente L, no se evidencia el incremento de T_s durante este evento con respecto al valor promedio (1.22 s) que se identifica para el caso de los eventos de baja intensidad.

El incremento del periodo T_s se puede comparar con el aumento del $D_{m\acute{a}x}$, tal como se observa en el evento 13-3. Análogamente, en los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 14-1 y 14-2, se observa un patrón similar, en donde los valores del periodo T_s son mayores que 1.39 s en al menos uno de los dos componentes y a su vez los valores de los $D_{m\acute{a}x}$ son mayores de 5 cm.

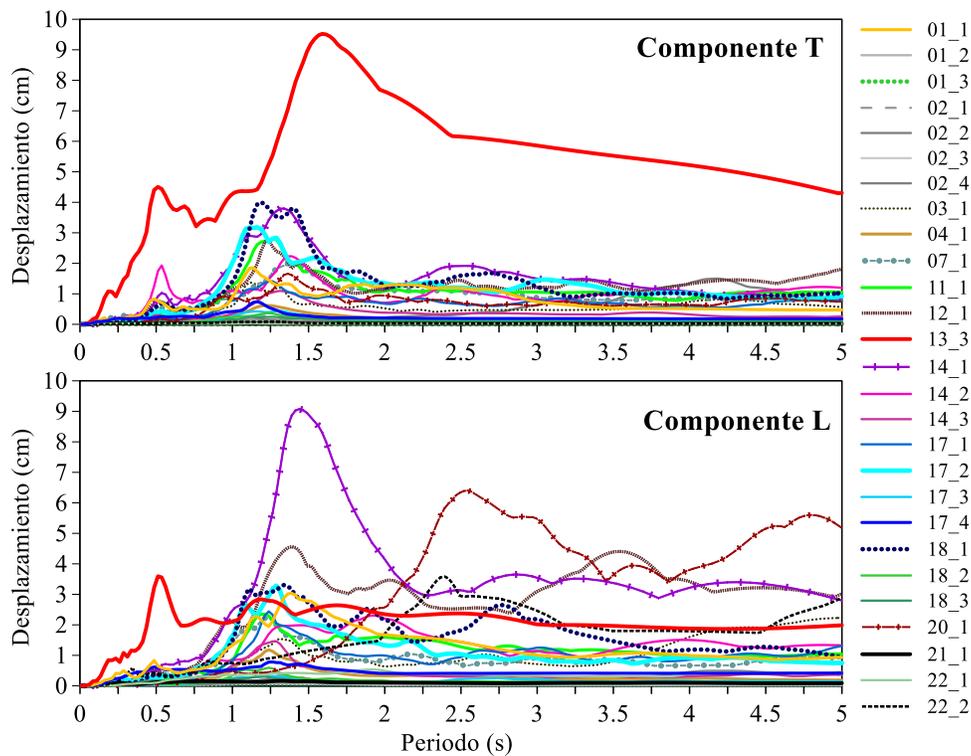


Figura 59. Espectros de respuesta de desplazamiento de los componentes L y T calculados con los registros sísmicos en la estación de campo del edificio

Tabla 20. Periodos dominantes del sitio SIS identificados en los ERD en los componentes L y T.

evento	$D_{m\acute{a}x}$ (cm)		T_s asociado al $D_{m\acute{a}x}$ (s)	
	L	T	L	T
01-1	3.03	1.87	1.39	1.12
01-2	0.07	0.07	1.29	1.07
01-3	0.01	0.01	1.22	1.06
02-1	0.46	0.28	1.15	1.20
02-2	0.27	0.16	1.31	1.20
02-3	0.14	0.10	1.31	1.14
02-4	0.18	0.17	1.27	1.40
03-1	1.55	1.38	1.32	1.12
04-1	1.18	0.62	1.24	1.22
07-1	2.23	2.02	1.22	1.40
11-1	2.35	2.81	1.21	1.27
12-1	4.56	2.77	1.39	1.24
13-3	2.84	9.50	1.19	1.57
14-1	9.08	3.80	1.44	1.32
14-2	1.99	2.24	1.45	1.37
14-3	1.47	1.10	1.27	1.31
17-1	2.44	1.41	1.24	1.25
17-2	3.28	3.18	1.29	1.16
17-3	0.32	0.44	1.26	1.31
17-4	0.79	0.74	1.25	1.16
18-1	3.19	4.00	1.12	1.19
18-2	0.59	0.36	1.24	1.24
18-3	0.31	0.24	1.20	1.27
20-1	1.60	1.66	1.27	1.36
21-1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
22-1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
22-2	0.23	0.18	1.26	1.16

$D_{m\acute{a}x}$ - desplazamiento máximo identificado en el EDR

n.d.-Dato no disponible porque se tienen problemas con los registros

4.2.4 Comparaciones y comentarios

En esta sección se comparan los valores de las frecuencias del sitio SIS obtenidos de los CN, estimados con los registros completos, (tabla 16) y se comparan con los valores identificados con los CN_{ff} , calculados con el tramo de la fase final de los registros, (tabla 18).

Además, se presentan los valores de las frecuencias dominantes durante el evento 13-3 obtenidos con los CN realizando un análisis por ventanas, con ello se busca conocer más a detalle los cambios o variaciones, en ambos componentes, durante el evento y se comparan con los obtenidos a partir de los cocientes CN_{ff} , provenientes del análisis con registros con el tramo de la fase final.

Por último, se comparan los valores de los periodos dominantes identificados en los ERD (tabla 20), en términos de frecuencias, con los valores de las frecuencias f_s obtenidas de los CN.

Comparación de las frecuencias dominantes obtenidos con los CN y CN_{ff}

En la figura 60 se comparan los valores de las frecuencias dominantes obtenidos de los CN (estimación con los registros completos) y de los CN_{ff} (estimación con la fase final de los registros), repitiendo la misma nomenclatura previamente establecida en las figuras 54 y 58 de la sección previa.

Como se puede observar en la figura 60, en ambas estimaciones es necesario definir la banda de frecuencias dominantes en la mayoría de los eventos, ya que existen múltiples amplificaciones en frecuencias cercanas a la frecuencia dominante del sitio (0.81-0.82 Hz de acuerdo con la sección 4.2.2). Una diferencia por destacar entre las bandas obtenidas entre ambas estimaciones es que en la estimación con los registros completos se obtienen bandas de frecuencias más amplias, mientras que con la estimación con los CN_{ff} las bandas son, para este caso, más angostas, teniendo una mayor posibilidad de lograr obtener una sola cresta asociada a la frecuencia dominante promedio del sitio.

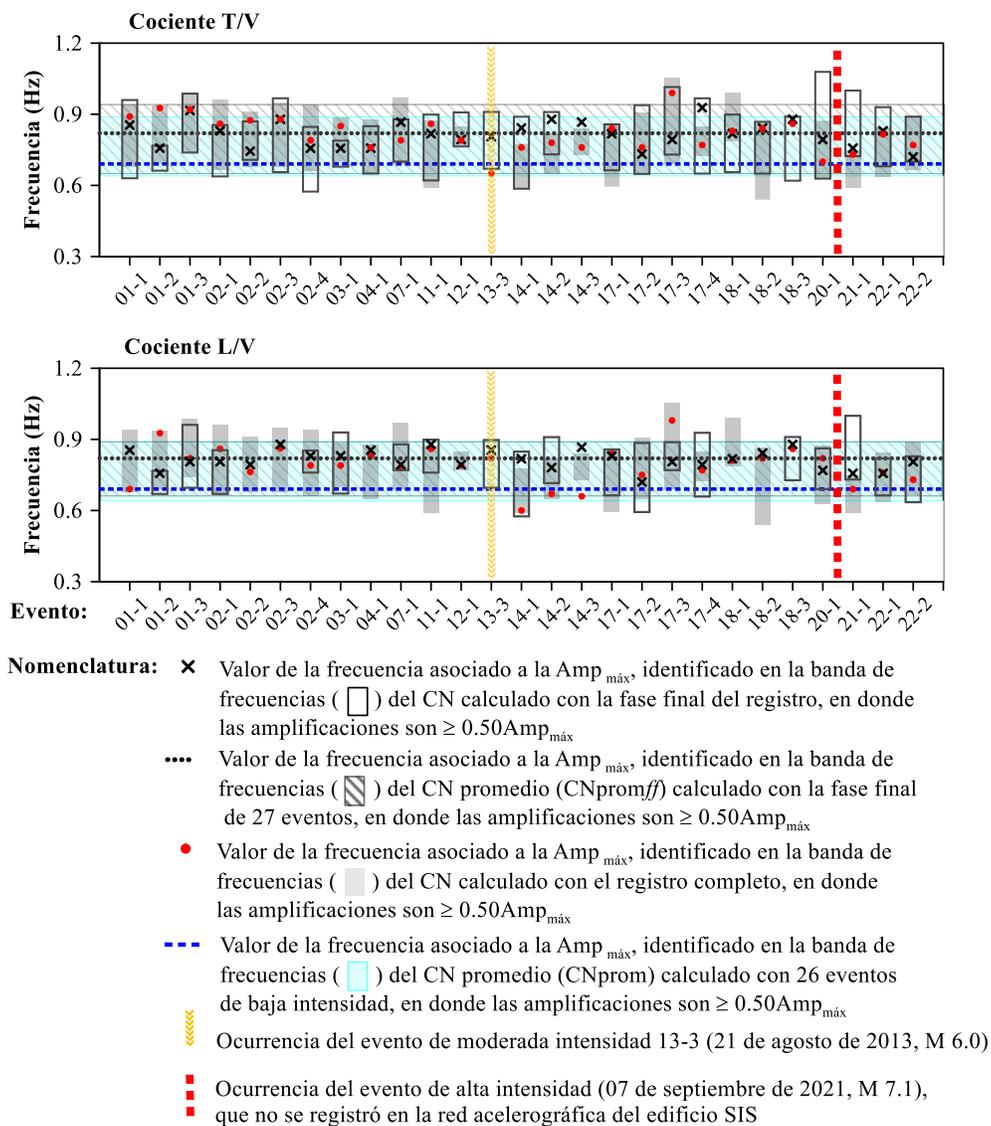


Figura 60. Comparación de las frecuencias dominantes del terreno de la estación SIS obtenidos con cocientes de Nakamura (CN) y con los cocientes de Nakamura en la fase final (CN_{ff})

Con respecto a los valores de la frecuencia f_s obtenidos en los cocientes promedio, se puede observar notables discrepancias en ambos componentes de análisis. Es evidente que en la estimación con los CN $_{ff}$ hay un mejor ajuste entre los valores puntuales de f_s obtenidos en cada evento con respecto a los valores promedios. Esto sugiere que la estimación utilizando el tramo de la fase final de los registros se obtienen de manera más precisa el comportamiento lineal del suelo.

En cuanto a los valores puntuales de la frecuencia f_s obtenidos en cada evento, se pueden apreciar notables diferencias entre ambas estimaciones, esto ocurre independientemente de la intensidad del evento sísmico. Por ejemplo, con la estimación de los registros completos estos muestran una mayor fluctuación de la frecuencia f_s entre un evento y otro, que, para ciertos eventos, los valores de f_s caen fuera de la banda de frecuencias dominante (0.64 y 0.89 Hz) obtenida del CN $_{prom}$.

Comparación de frecuencias dominantes durante el evento 13-3

En la figura 61 se ilustra la variación de la frecuencia durante el evento 13-3, en donde presentan los valores obtenidos con un análisis con CN, empleando ventanas de 20 s a cada 5 s. Así mismo se incluyen los valores obtenidos en los CN utilizando los registros completos y con el tramo de la fase final de este evento.

En la misma figura se aprecia que los valores por ventanas de la frecuencia f_s , en el componente L, se mantienen en un intervalo que va de 0.73 a 0.88 Hz, oscilando alrededor de los valores de la banda de 0.82 a 0.85 Hz, obtenida tanto con el análisis de señal completa como con el del tramo de fase final del resto de los eventos. Durante la fase intensa del evento 13-3 los valores de la frecuencia f_s por ventanas se mantienen en ~ 0.81 Hz, es decir, coinciden con el valor obtenido en el CN $_{promff}$ (análisis con el tramo de la fase final de los 27 eventos), que como se mencionó en la Sección 4.2.2, refleja un comportamiento lineal del suelo.

Por otro lado, en el componente T se aprecia que en la fase intensa los valores de la frecuencia f_s (ventanas comprendidas entre los instantes 50 a 85 s) disminuyen con respecto a los valores de su fase inicial. Entre las ventanas de la fase intensa se identifica el mínimo valor de f_s que es de 0.66 Hz, el cual se asemeja al valor de 0.65 Hz (representado con una línea continua) que fue obtenido con el análisis con registros completos, con ello se confirma una reducción de la frecuencia f_s con respecto al valor de 0.82 Hz, dicha variación de la frecuencia f_s en las distintas fases del evento 13-3 se asocia al posible comportamiento no lineal del suelo. Posteriormente, la frecuencia f_s se observa que los valores obtenidos en ventanas de la fase final son semejantes al valor de 0.82 Hz obtenido mediante el cociente CN $_{promff}$ (análisis del tramo de la fase final de 27 eventos)

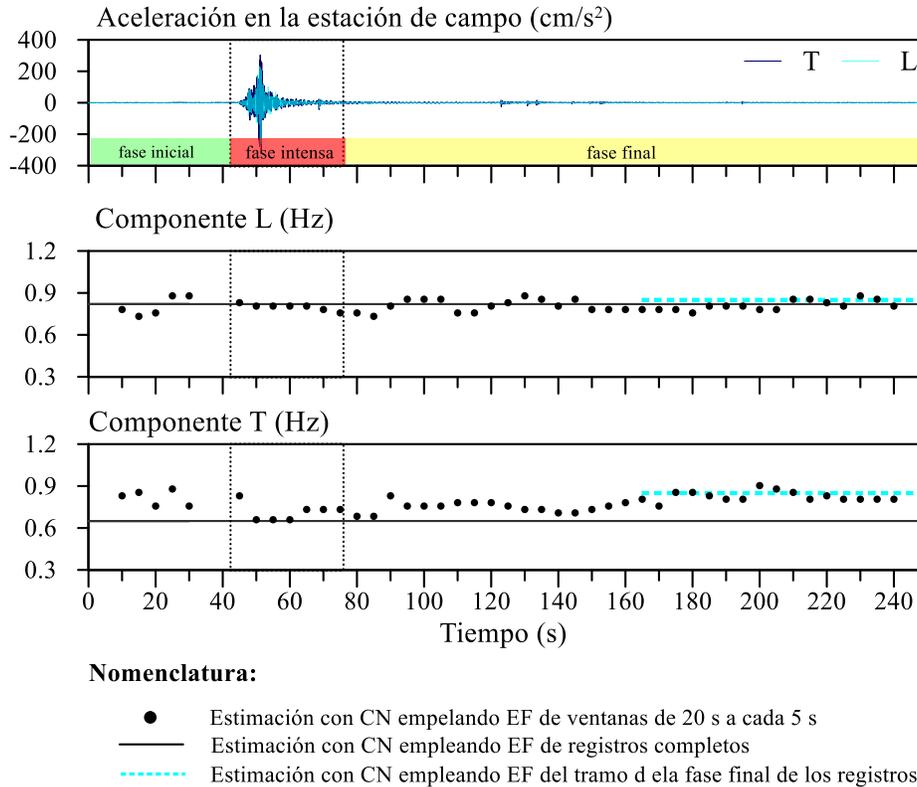


Figura 61. Variación de la frecuencia dominante del sitio SIS durante el evento 13-3 de moderada intensidad

Comparación de las frecuencias dominantes obtenidos con los CN y ERD

En la figura 62 se muestran los valores de los periodos dominantes obtenidos en los ERD presentados en la tabla 20 en términos de frecuencias, estos se comparan con respecto a los valores de las frecuencias y sus bandas de frecuencias dominantes obtenidos de los CN (valores de la tabla 16 obtenidos mediante el análisis de registros completos). La figura también contiene los valores de la frecuencia f_s de 0.81 y 0.82 Hz obtenidos de los CNpromff, que representan la frecuencia del suelo ante comportamiento lineal del suelo en los componentes ortogonales, L y T, respectivamente.

Como se puede observar en la figura 62, entre los valores obtenidos con los ERD y los CN hay congruencia en la mayoría de los eventos analizados. De las frecuencias obtenidas en ambas se tienen diferencias son inferiores al 13.5 y 15 % en los componentes L y T respectivamente. Solo en los eventos 01-2, 14-1, 14-3 y 17-3, las diferencias entre ambos métodos son hasta un 23 %, asociadas a al mismo proceso del cálculo que conduce a la estimación con los CN (calidad de las señales, tratamiento de las señales, resolución de los espectros de Fourier y posible aparición de singularidades numéricas).

Por último, es interesante destacar que en el evento 13-3, el periodo T_s obtenido en el componente T es de 1.57 s, dicho valor en términos de frecuencias es 0.64 Hz, y se asemeja al valor de 0.65 Hz, obtenido en el CN empleando los registros completos. Es decir, el comportamiento no lineal del suelo, distinguido durante este evento, se ve reflejado en la curva del ERD correspondiente (figura 59) con el incremento del periodo asociado al D_{max} .

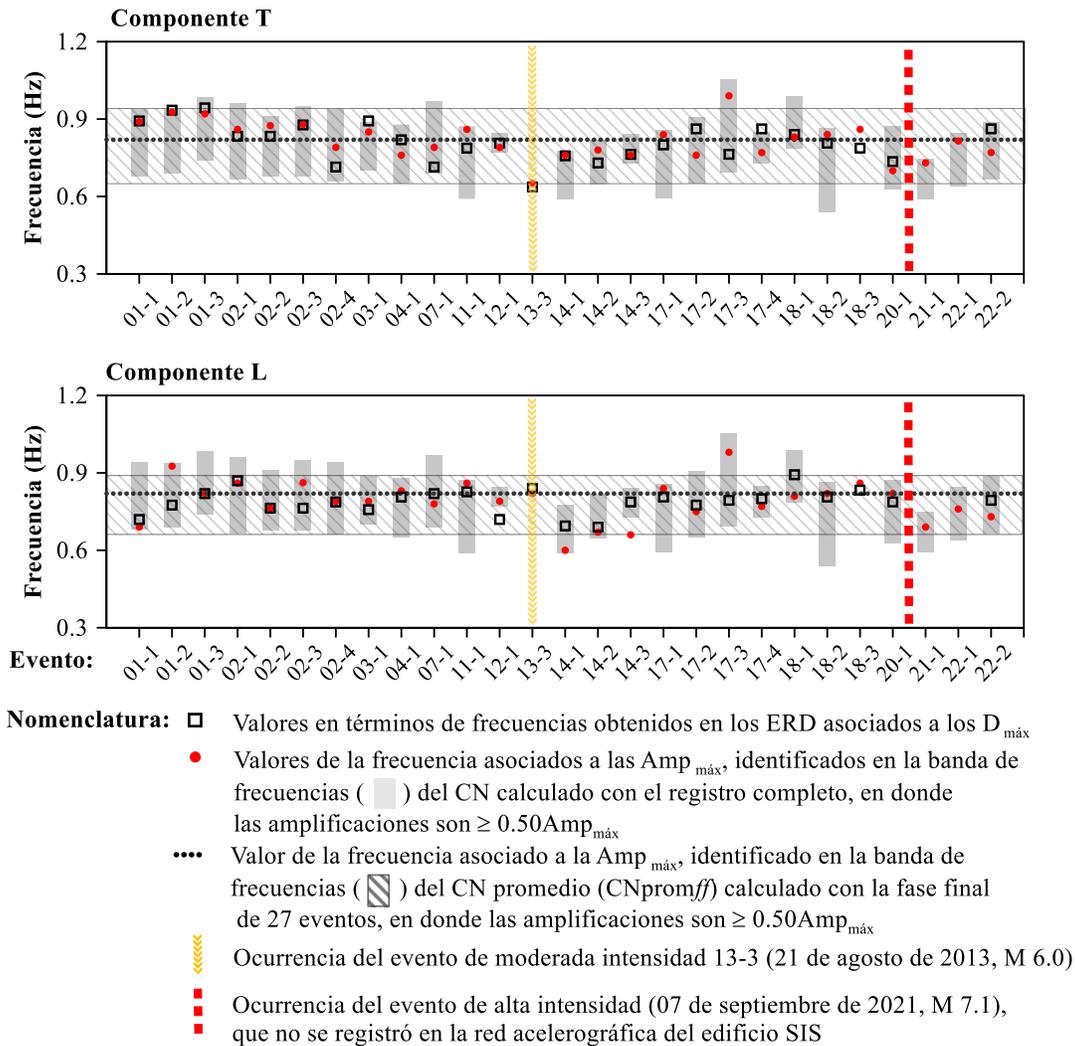


Figura 62. Comparación de las frecuencias dominantes del terreno de la estación SIS obtenidos con cocientes de Nakamura (CN) y con ERD

4.3 Análisis espectral de las estaciones de campo de Acapulco del II-UNAM

A fin de realizar un análisis comparativo entre estaciones, en esta sección se presentan los registros sísmicos los eventos más intensos (01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 14-2, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1) que fueron capturados simultáneamente en la estación SIS y en las estaciones del II-UNAM denominadas como ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA. En la tabla 21 contiene las coordenadas de dichas estaciones, indicando el tipo del suelo (I-firme, II-intermedio o transición, III-blando) en el que se ubican las distancias con respecto al sitio del edificio SIS y, en la figura 63, se tiene un mapa de isoperiodos de la ciudad de Acapulco (Chávez-García *et al.* 1998), en el que se ubica el sitio del edificio SIS y el de las estaciones del II-UNAM antes mencionadas.

De los registros de las estaciones analizados, se presentan sus espectros de Fourier respectivos, con el fin de evidenciar el contenido frecuencial de cada sitio.

Asimismo, para cada estación del II-UNAM se realiza la identificación de los periodos o frecuencias dominantes con los CN empleando espectros de Fourier de los registros completos y de los tramos de las fases finales y los resultados se complementan con la identificación de los periodos de sitio utilizando los ERA y ERD en los componentes NS y EO. Los criterios y detalles del procedimiento son los descritos en el subcapítulo 4.1.

Adicionalmente se muestra un evento de alta intensidad, ocurrido el 07 de septiembre de 2021 (M 7.1), el cual fue registrado en las estaciones ACAD y VNTA, con el objetivo de comparar: la magnitud de las aceleraciones, amplitudes espectrales de Fourier, ERD y ERD, con las del evento 13-3 de moderada intensidad.

Las estaciones SIS y AZAC se ubican en terreno tipo III (suelo blando), caracterizado por depósitos de barra con presencia de arena fina a media. Las estaciones ACAC y ACAD están ubicadas en un terreno tipo II (suelo intermedio) en el que predominan depósitos arcillo-arenosos o limo-arenoso. Para la estación ACP2 corresponde una clasificación de terreno tipo II, con una composición de granito expuesto (Gneiss granítico). La clasificación del suelo en la que se ubica la estación ACAR es tipo II, compuesto de suelos aluviales. La estación VNTA se ubica en un terreno tipo I (suelo firme) compuesto principalmente de granito (roca). La clasificación del terreno es según el MDOC-2017 (2019) y la descripción geológica es con base en la descripción del mapa regional geológico de Acapulco propuesto por Gutierrez (1991).

Tabla 21. Estaciones acelerométricas ubicadas en Acapulco

Estación	Coordenadas		Tipo de suelo ⁽¹⁾	Distancia ⁽²⁾ (km)
	Lat.	Lon.		
SIS	16.78	99.80	III	-
ACAZ	16.79	99.79	III	1.7
ACAC	16.85	99.89	II	8.9
ACAD	16.86	99.87	II	11.4
ACP2	16.87	99.89	II	13.5
ACAR	16.89	99.84	II	12.3
VNTA	16.91	99.82	I	14.8

⁽¹⁾Clasificación de acuerdo con el MDOC 2017, donde I, II y III son suelo firme, intermedio y blando, respectivamente.

⁽²⁾Distancia con respecto al edificio SIS.

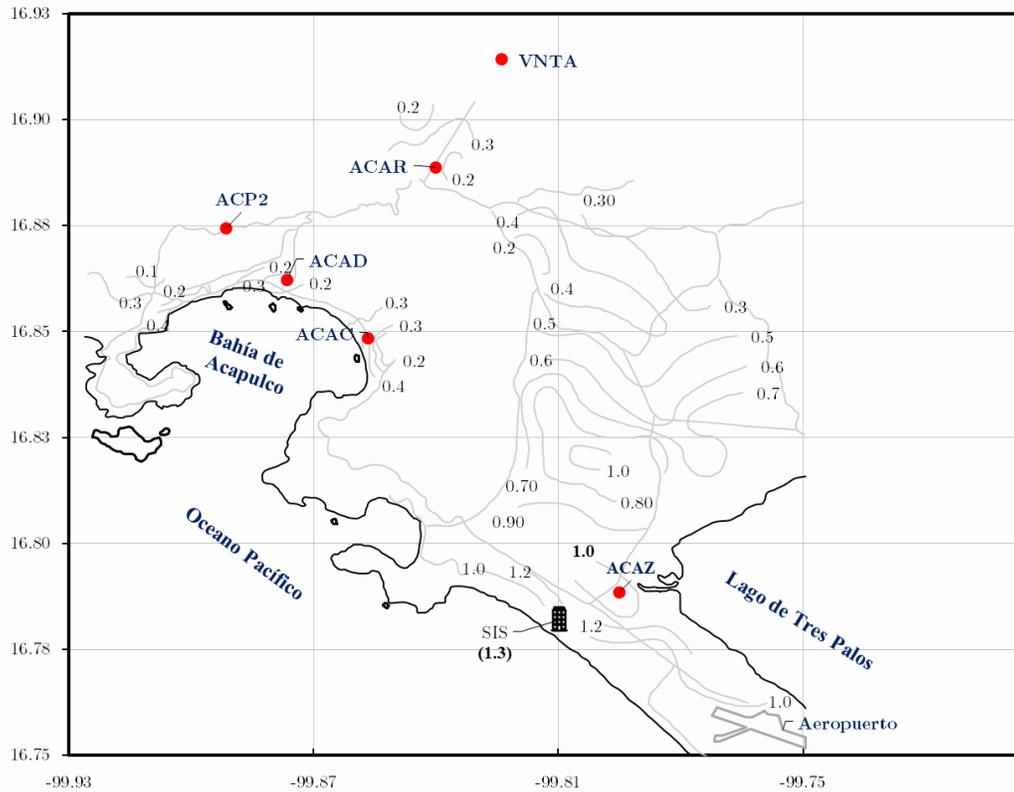


Figura 63. Mapa de isoperiodos de Acapulco (periodos en s) y ubicación de las estaciones acelerográficas ACP2, ACAD, ACAR, ACAZ, VNTA y SIS (modificado de Chávez-García et al. 1998, por Aldama y Taborda)

4.3.1 Registros sísmicos de las estaciones de campo

La tabla 22 incluye la distancia epicentral (D_{epi}), la máxima aceleración del suelo ($A_{m\acute{a}x}$) entre los componentes NS y EO, así como la intensidad de Arias horizontal ($I_{h-Arias}$) de los eventos de mayor sollicitación 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2 y 18-1.

En algunas estaciones no se dispone de ciertos registros sísmicos, tal es el caso del evento 01-1 en la estación ACP2, los registros del evento 12-1 no están disponibles en la estación ACAC; los registros del evento 17-4 en la estación VNTA; y los registros del evento 18-1 no se dispone en las estaciones ACAR y VNTA.

Los eventos 01-1, 13-3 y 17-4 son los más próximos a la bahía de Acapulco, y tienen una menor distancia epicentral y las mayores $A_{m\acute{a}x}$ registradas en el edificio SIS. El epicentro de los eventos que están más alejados a las estaciones de Acapulco son el 12-1, 14-1, 17-1, 17-2 y 18-1, estos están caracterizados por tener una intensidad $I_{h-Arias}$ menor que 30 cm/s, y una $A_{m\acute{a}x}$ menor que 100 cm/s².

En la tabla 22 se observa que las intensidades $I_{h-Arias}$ de los eventos registrados en las estaciones SIS y VNTA son parecidas entre sí, y difieren entre 3 y 35 %. Por lo general, las intensidades $I_{h-Arias}$ de los eventos registrados en las estaciones ACAC, ACAD y ACAR son superiores a las intensidades de los registros capturados en la estación SIS. Mientras que en las estaciones ACP2 y VNTA las intensidades $I_{h-Arias}$ suelen ser menores a la intensidad de los eventos registrados en la estación SIS.

En las figuras 64 a 72 se muestran las historias de aceleración en los componentes horizontales NS y EO, así como del componente vertical (V) de los eventos sísmicos (tabla 22) que fueron registrados en las estaciones de II-UNAM de Acapulco y en la estación SIS.

Los eventos 13-3 y 17-4 son los que presentan las máximas aceleraciones del suelo, en todas estaciones analizadas las $A_{m\acute{a}x}$ superan los 100 cm/s^2 . Estos eventos sísmicos se caracterizan por tener una corta duración de la fase intensa, comprendidas entre 8 y 10 s (figuras 67 y 71), mientras que las fases intensas de los eventos 01-1, 12-1, 14-1, 17-1, 17-2 y 18-1 tienen una duración entre de 20 a 30 s.

En las figuras 64 a 72 se aprecia que los acelerogramas de las estaciones SIS (suelo blando) y ACAZ (suelo blando) son semejantes en cuanto a la amplitud y duración de la fase intensa, observando una atenuación suave de las amplitudes de aceleración en la fase final.

En la estación ACAD (suelo intermedio) se registran aceleraciones mucho mayores con respecto a las otras estaciones de Acapulco. Comparando los registros de la estación ACAD y con los de la estación SIS, el evento 01-1 es el que refleja una mayor diferencia entre las $A_{m\acute{a}x}$, siendo hasta tres veces mayor a lo registrado en la estación SIS, en el resto de los eventos de la estación ACAD las $A_{m\acute{a}x}$ son mayores hasta un 165 %.

Por otro lado, en las figuras 73 a 78 se muestran los espectros de Fourier de los registros sísmicos capturados en las estaciones ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA, respectivamente. En cada figura se muestra el contenido frecuencial en los primeros 10 Hz en los componentes L, T y V.

En los espectros de Fourier correspondientes a la estación ACAZ (suelo blando) se puede observar que las amplitudes se concentran alrededor de 1.0 Hz. En frecuencias superiores se aprecian otras amplitudes de menor magnitud, estas se encuentran ubicadas en 2.2, 4.1, 5.5, 7.5 y 9.0 Hz, aproximadamente, esto se puede ver con mejor claridad en los eventos menos intensos 14-1, 17-1 y 18-1. En cambio, en los eventos 01-1 y 13-3 que tienen una mayor intensidad, las máximas amplitudes están asociadas a frecuencias cercanas de 2.2 Hz.

Los espectros de Fourier mostrados en la figura 74 que corresponden a la estación ACAC (suelo intermedio), se observa que las máximas amplitudes de Fourier se ubican cerca de la frecuencia de 1.8 Hz, con magnitudes inferiores de los 100 cm/s , a excepción del evento 13-3, en donde se las amplitudes alcanzan los 230 cm/s en el componente NS. En los espectros de Fourier también se observa que las amplitudes se atenúan para frecuencias mayores de 2 Hz, teniendo magnitudes inferiores a los 20 cm/s .

Los espectros correspondientes a la estación ACAD (suelo intermedio) se muestran en la figura 75, en donde se aprecia que las mayores amplitudes de Fourier están distribuidas entre 3.0 y 5.5 Hz a excepción del evento 13-3, en donde las amplitudes están distribuidas en una banda de frecuencias comprendida entre 2.2 y 5.0 Hz. En la figura se puede diferenciar que en el evento 13-3, las amplitudes de Fourier son superiores en más de dos veces a las amplitudes de los eventos 01-1, 07-1, 12-2, 14-1, 14-2, 17-2, 17-4 y 18-1.

Tabla 22. Características de los sismos registrados en las estaciones del II-UNAM ubicadas en Acapulco y de la estación SIS

Evento	Ubicación	Fecha	M	Intensidad ⁽¹⁾	Estación							
					Parámetro	SIS	ACAZ	ACAC	ACAD	ACP2	ACAR	VNTA
01-1	Guerrero	07/10/2001	6.1	baja	Depi (km)	45	42	33	31	33.4	34	35
					I _{h-Arias} (cm/s)	16.4	15.9	10.1	88.6	n.d.	134.2	2.4
					A _{máx} (cm/s ²)	101.9	78.6	81.9	334.5	n.d.	256.8	38.6
07-1	Guerrero	13/04/2007	6.3	baja	Depi (km)	78	79	70	67	65	70	71
					I _{h-Arias} (cm/s)	9.2	16.2	18.0	40.0	15.0	17.2	1.2
					A _{máx} (cm/s ²)	98.0	87.8	98.7	202.9	98.0	117.9	25.3
12-1	Guerrero	20/03/2012	6.5	baja	Depi (km)	158	157	165	168	170	166	164
					I _{h-Arias} (cm/s)	6.6	7.1	n.d.	8.3	1.8	4.1	0.4
					A _{máx} (cm/s ²)	30.9	35.6	n.d.	53.3	24.1	30.8	9.5
13-3	Guerrero	21/08/2013	6.0	moderada	Depi (km)	27	25	33	35	37	32	32
					I _{h-Arias} (cm/s)	119.1	153.1	185.6	285.0	59.6	105.0	15.8
					A _{máx} (cm/s ²)	323.9	331.6	370.2	587.4	250.6	413.9	152.9
14-1	Guerrero	18/04/2014	7.2	baja	Depi (km)	159	160	152	149	147	152	154
					I _{h-Arias} (cm/s)	14.5	22.7	24.4	28.1	13.4	26.6	1.1
					A _{máx} (cm/s ²)	43.4	66.1	66.1	99.6	57.9	78.5	13.8
17-1	Chiapas	07/09/2017	8.2	baja	Depi (km)	661	664	673	675	677	673	672
					I _{h-Arias} (cm/s)	2.9	2.5	4.1	1.9	0.4	1.0	0.1
					A _{máx} (cm/s ²)	13.1	20.7	20.9	17.8	7.1	14.1	3.3
17-2	Puebla	19/09/2017	7.1	baja	Depi (km)	214	210	208	209	209	204	201
					I _{h-Arias} (cm/s)	12.7	14.7	24.5	19.2	7.5	10.5	0.9
					A _{máx} (cm/s ²)	35.1	44.8	58.7	60.8	35.4	35.7	10.6
17-4	Guerrero	25/12/2017	5.0	baja	Depi (km)	10	10.2	13	12	12	9	6.9
					I _{h-Arias} (cm/s)	6.7	9.1	15.5	14.9	7.8	7.8	n.d.
					A _{máx} (cm/s ²)	124.5	175.8	268.2	207	108.5	101.6	n.d.
18-1	Guerrero	16/02/2018	7.2	baja	Depi (km)	204	205	214	216	218	205.3	204.6
					I _{h-Arias} (cm/s)	6.5	7.6	8.6	3.6	1.0	n.d.	n.d.
					A _{máx} (cm/s ²)	25.9	29	43.4	27.9	18	n.d.	n.d.
21-0	Guerrero	07/09/2021	7.1	alta	Depi (km)	13.4	14.9	11.3	11.1	11.47	15.8	19
					I _{h-Arias} (cm/s)	n.d.	n.d.	419.9	n.d.	n.d.	n.d.	65.3
					A _{máx} (cm/s ²)	n.d.	n.d.	533.8	n.d.	n.d.	n.d.	206.1

Donde M , D_{epi} , $I_{h-Arias}$, $A_{máx}$, es la escala sismológica, la distancia epicentral, la intensidad de Arias horizontal y la aceleración máxima horizontal, respectivamente. n.d.-Dato no disponible porque no se tienen los registros.

⁽¹⁾Clasificación de los eventos registrados en la estación SIS de acuerdo con los umbrales de intensidades del sistema de AlertaE (tabla 1)

La figura 76 se muestran los espectros de Fourier de los eventos registrados en la estación ACP2 (suelo intermedio). Las máximas amplitudes de Fourier se encuentran dentro en una banda de frecuencias comprendida entre 3.0 y 5.5 Hz, aproximadamente. Se observará que esta banda es más angosta en los sismos menos intensos, tal como se aprecia en los eventos 17-1 y 17-2.

Los espectros de Fourier de la estación ACAR (suelo intermedio) se indican en la figura 77. Las máximas amplitudes ocurren en un intervalo definido entre 2.5 y 4.5 Hz. En los eventos 01-1, 13-3 y 14-1 la máxima amplitud supera los 120 cm/s, mientras que en el resto de los eventos la amplitud es menor que 100 cm/s.

Los espectros de Fourier de la estación VNTA (suelo firme) contienen amplitudes menores que 15 cm/s, (figura 78). Las máximas amplitudes de Fourier se ubican en una banda de frecuencias comprendida entre 1.80 y 8.4 Hz aproximadamente. En los eventos de menor intensidad como el 12-1, 14-1 y 17-1 se concentran múltiples amplitudes en frecuencias menores que 2.0 Hz.

Por último, en la figura 79 se muestra la comparación de los registros y espectros de Fourier del evento 21-0 de alta intensidad para las estaciones ACAC (suelo intermedio) y VNTA (suelo firme)

en los cuales se dispone de este evento. En la figura también se incluyen los registros y espectros de Fourier del evento 13-3 de moderada intensidad capturado en estas dos estaciones y en la estación SIS.

En dicha figura se aprecia que las amplitudes de aceleración registradas en la estación VNTA (suelo blando) durante el evento 21-0 son menores con respecto a las registradas en la estación ACAC (suelo intermedio). En esta última estación, los registros del evento 21-0 están truncados en los tres componentes, contando solo con las amplitudes asociadas a la fase intensa del registro, es decir, que sí se cuenta con un contenido frecuencial que puede ser suficiente para los fines comparativos de este estudio.

El evento 21-0 registrado en la estación ACAC se tiene una intensidad de 419.9 cm/s, que es 2.3 veces mayor a la intensidad del evento 13-3, esta diferencia de intensidades se evidencia en las en los registros mostrados en la figura 79. Durante la ocurrencia del evento 13-3 se observa una semejanza entre los registros capturados en la estación SIS y ACAC, permitiendo suponer que durante el evento 21-0, en la estación SIS se podría haber alcanzado magnitudes de aceleración parecidos a los registrados en la estación ACAC, que está a 8.9 kilómetros del edificio SIS.

Al comparar los espectros de Fourier durante el evento 21-0 con respecto a los obtenidos con el evento 13-3 se observa que predominan un mayor número de crestas de igual o mayor magnitud, las cuales están distribuidas en una banda de frecuencias más amplia (de 1 a 10 Hz), esto se aprecia tanto en la estación ACAC como en la estación VNTA.

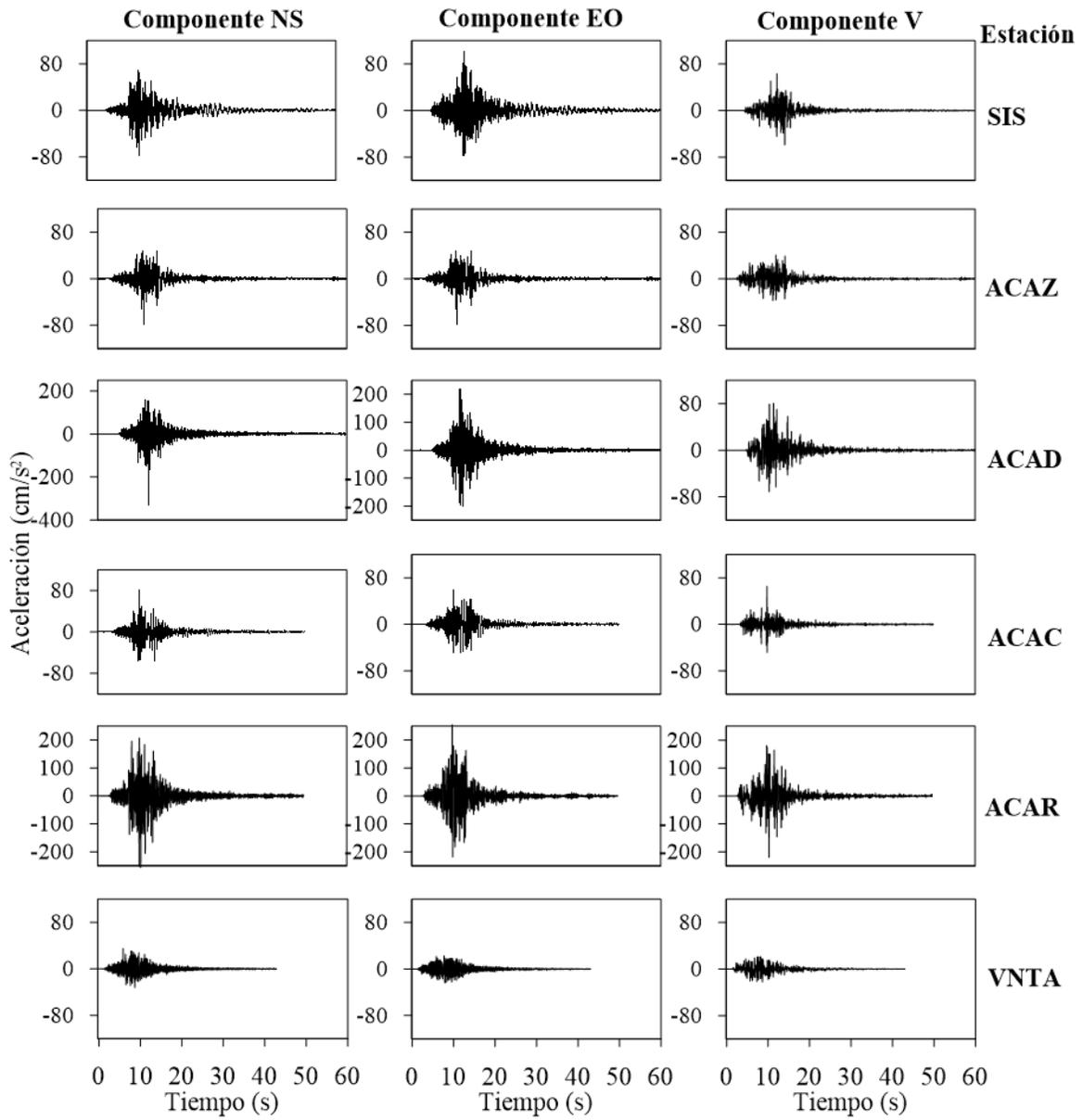


Figura 64. Acelerogramas de componentes horizontales (NS y EO), y vertical (V) de las estaciones de Acapulco del evento 01-1

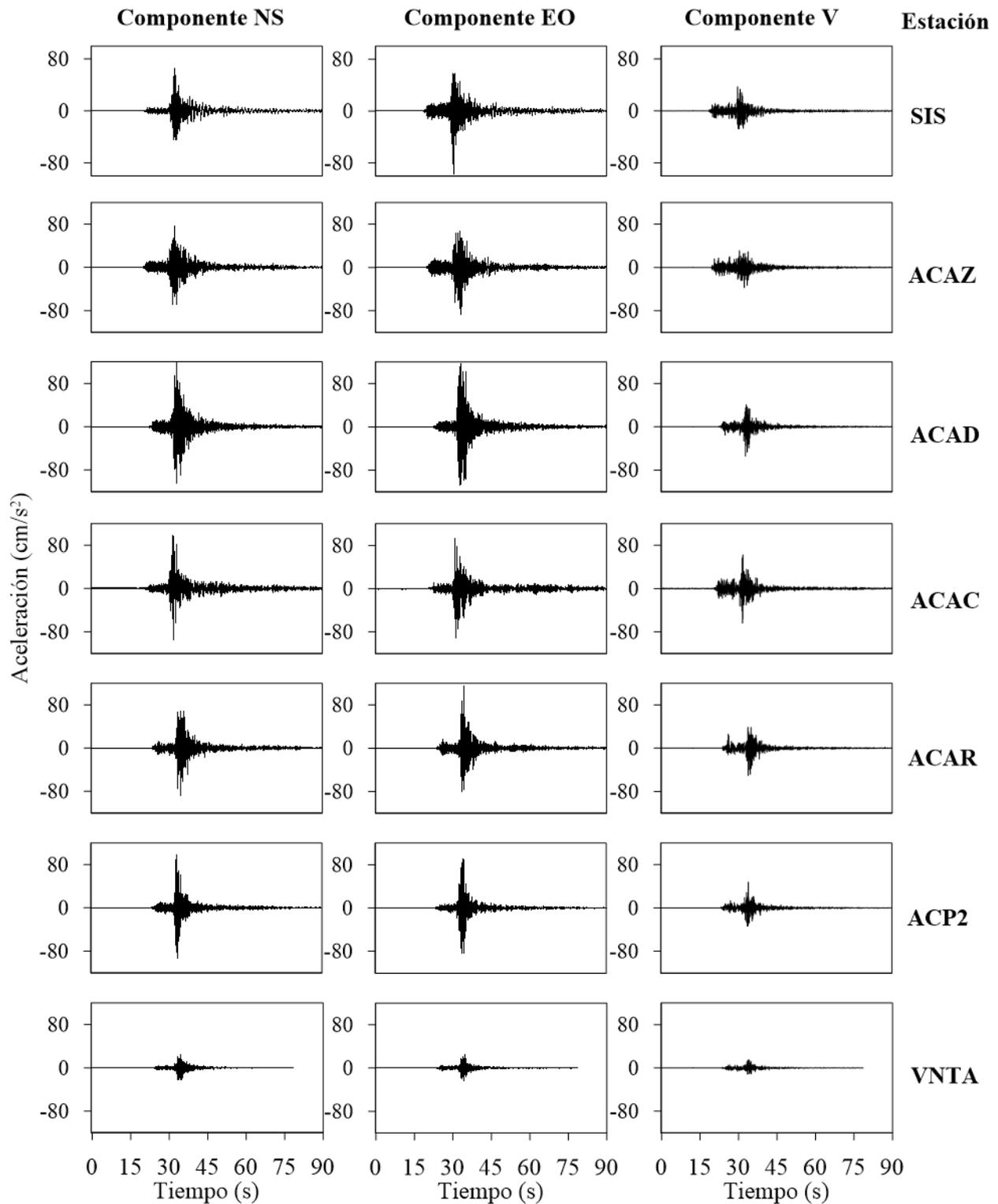


Figura 65. Acelerogramas de los componentes horizontales (NS y EO), y vertical (V) de las estaciones de Acapulco del evento 07-1

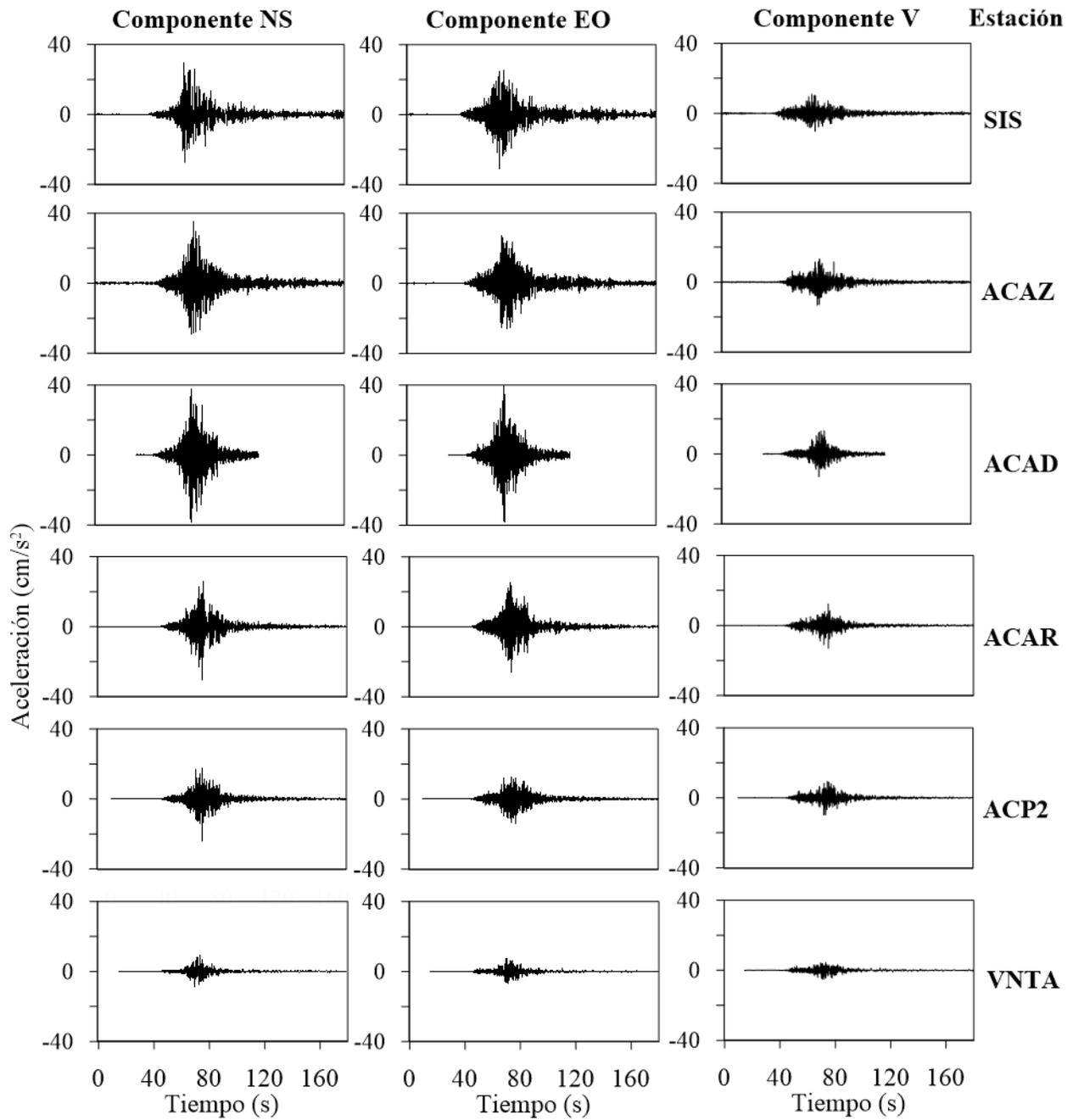


Figura 66. Acelerogramas de los componentes horizontales (NS y EO), y vertical (V) de las estaciones de Acapulco del evento 12-1

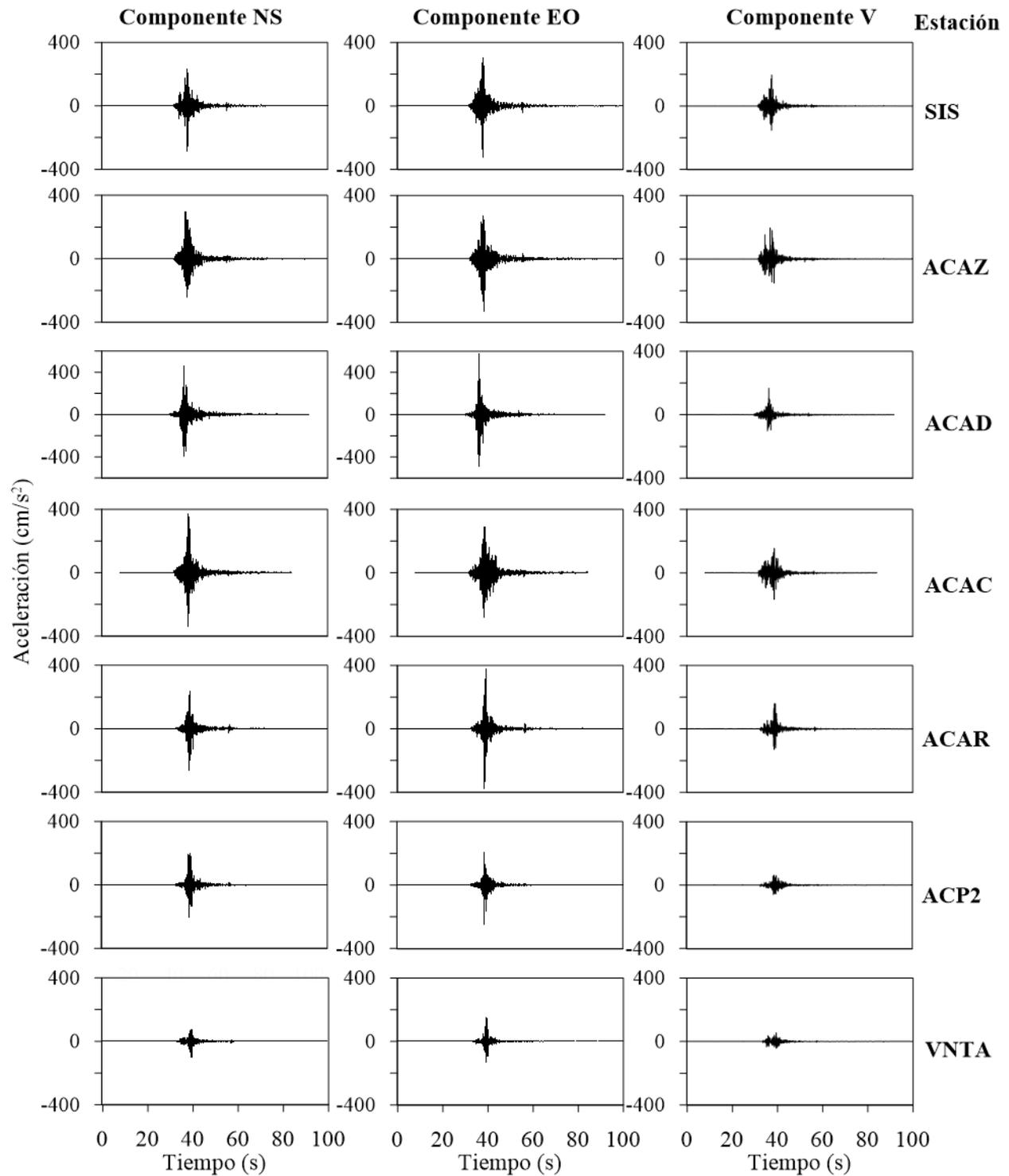


Figura 67. Acelerogramas de los componentes horizontales (NS y EO), y vertical (V) de las estaciones de Acapulco del evento 13-3

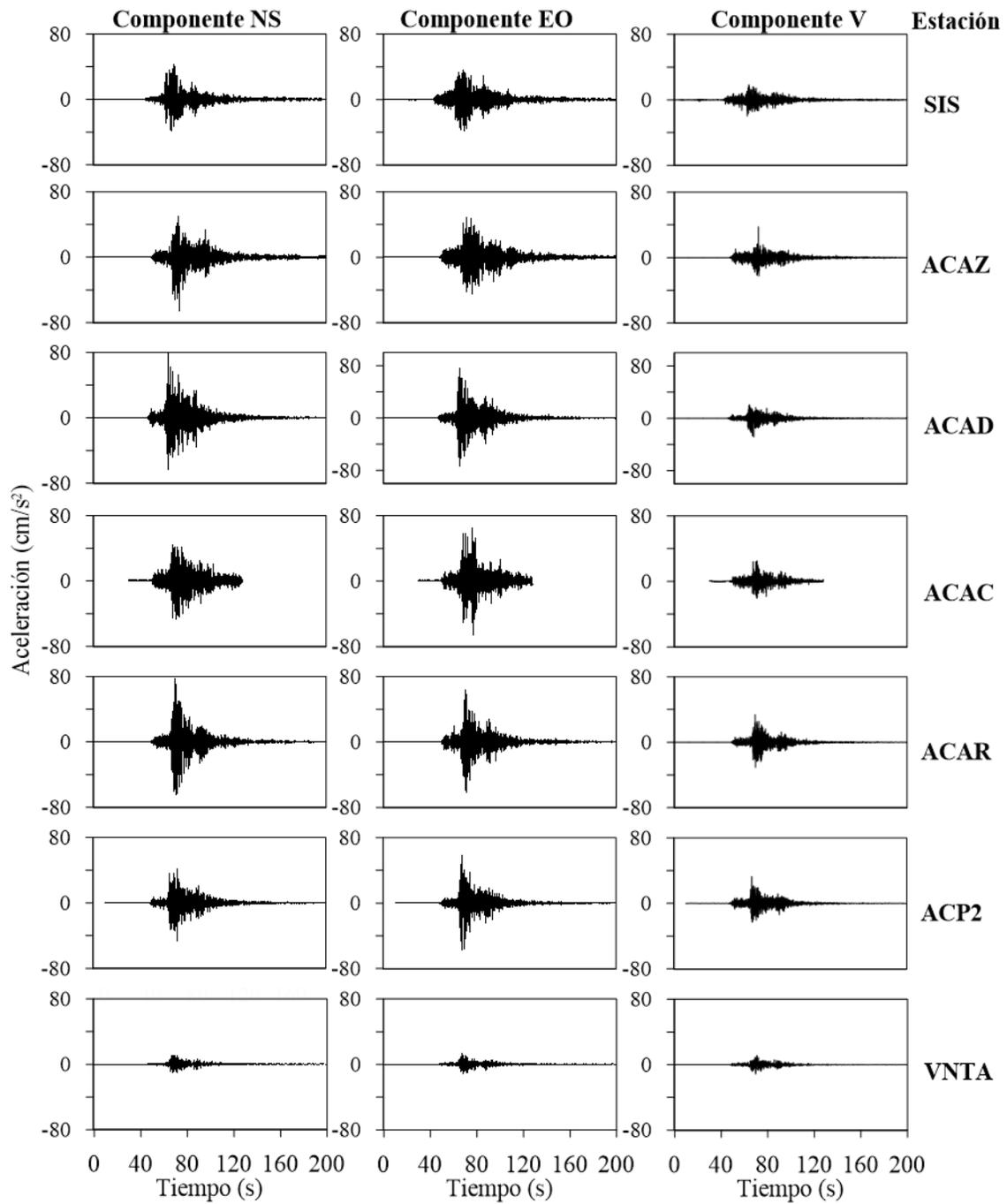


Figura 68. *Acelerogramas de los componentes horizontales (NS y EO) y vertical (V) de las estaciones de Acapulco del evento 14-1*

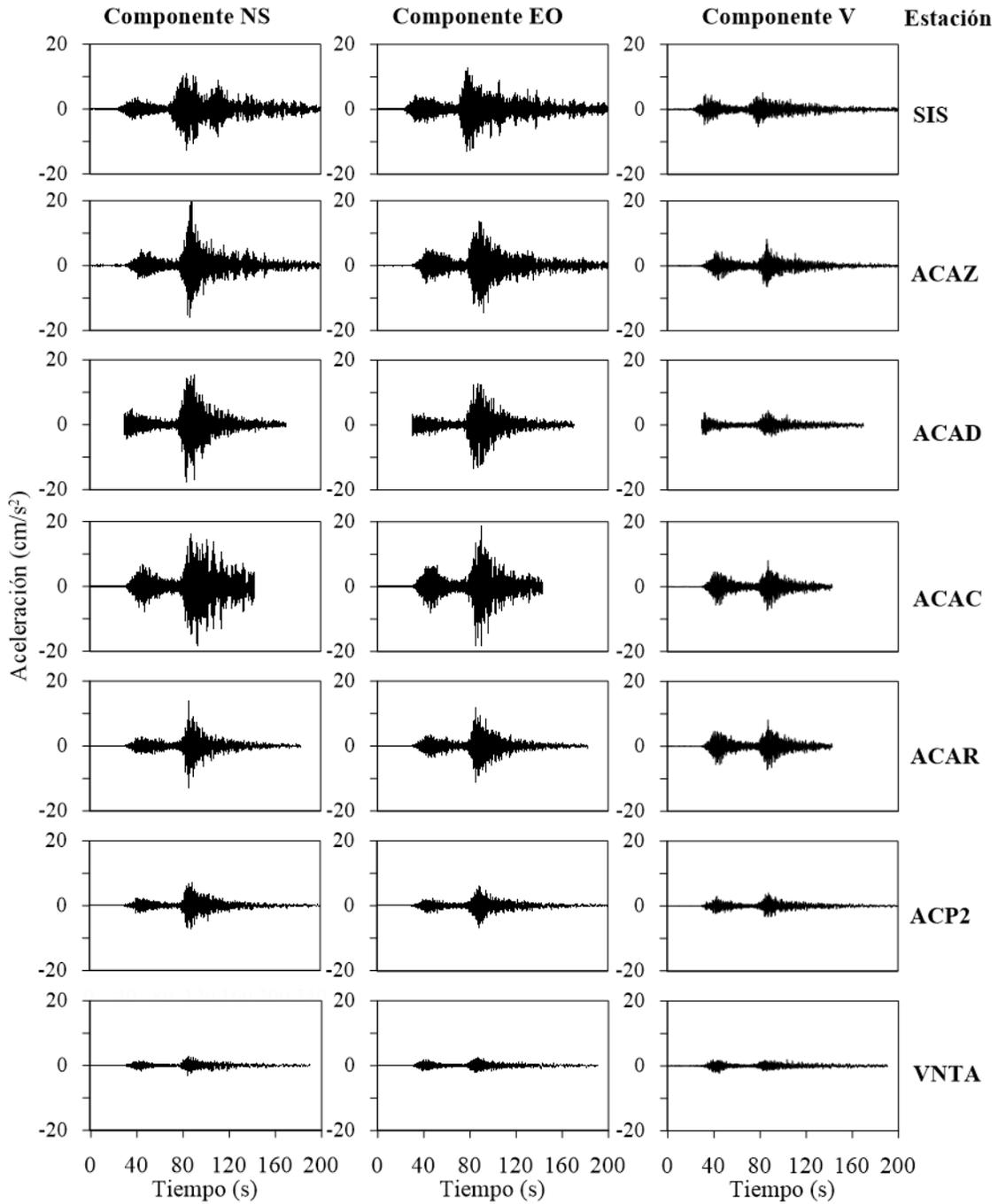


Figura 69. Acelerogramas de los componentes horizontales (NS y EO) y vertical (V) de las estaciones de Acapulco del evento 17-1

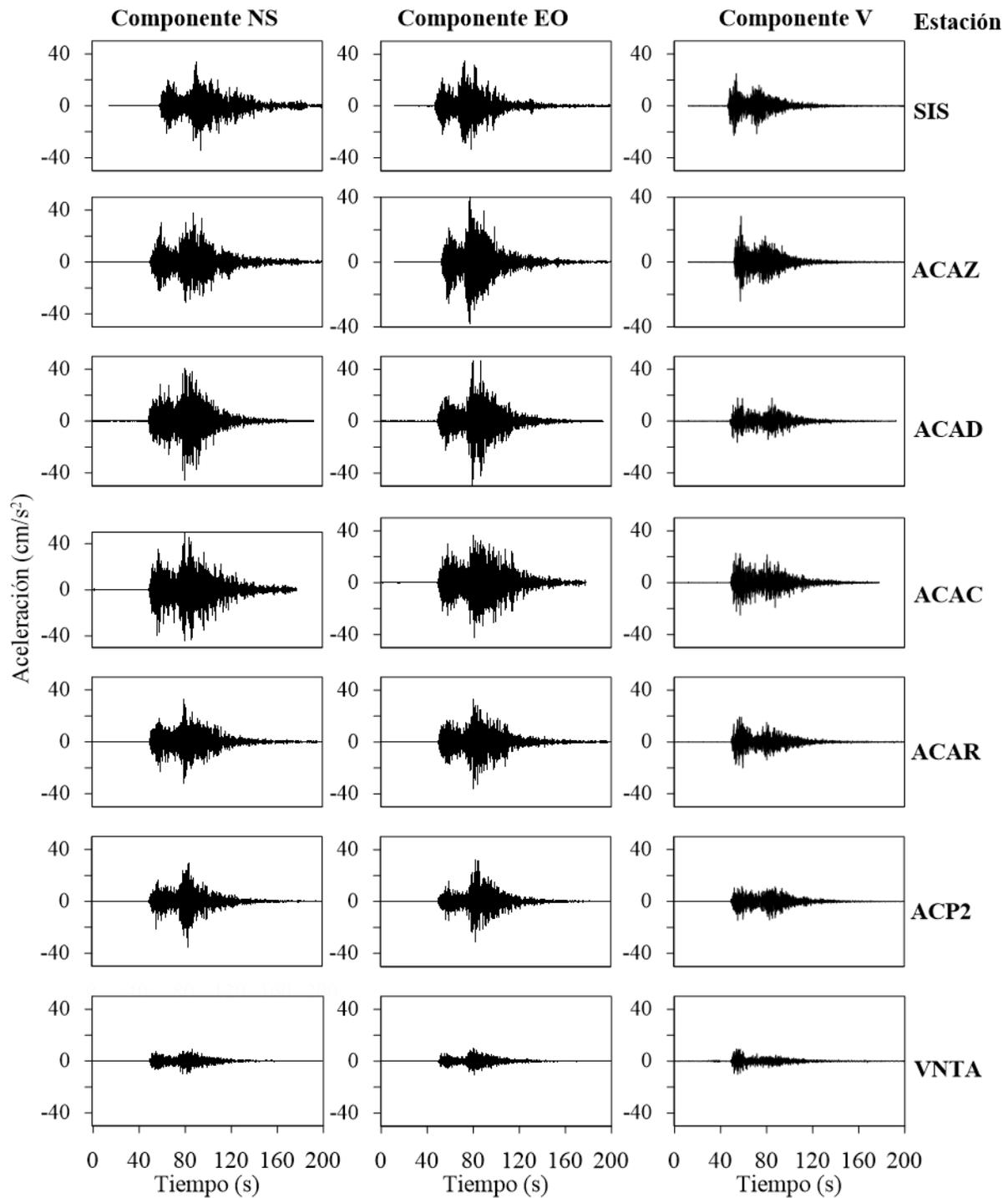


Figura 70 Acelerogramas de los componentes horizontales (NS y EO) y vertical (V) de las estaciones de Acapulco del evento 17-2

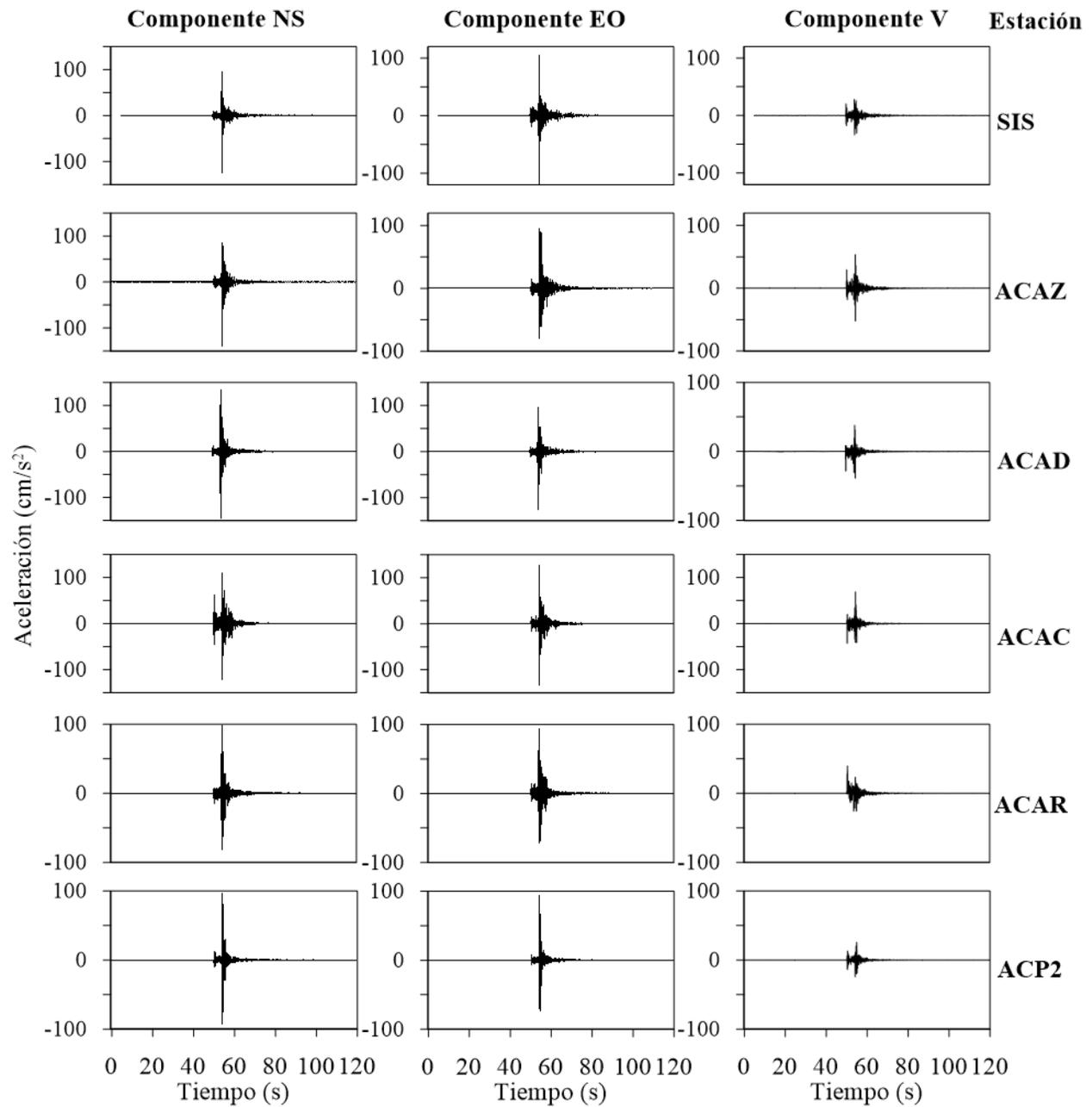


Figura 71. Acelerogramas de los componentes horizontales (NS y EO) y vertical (V) de las estaciones de Acapulco del evento 17-4

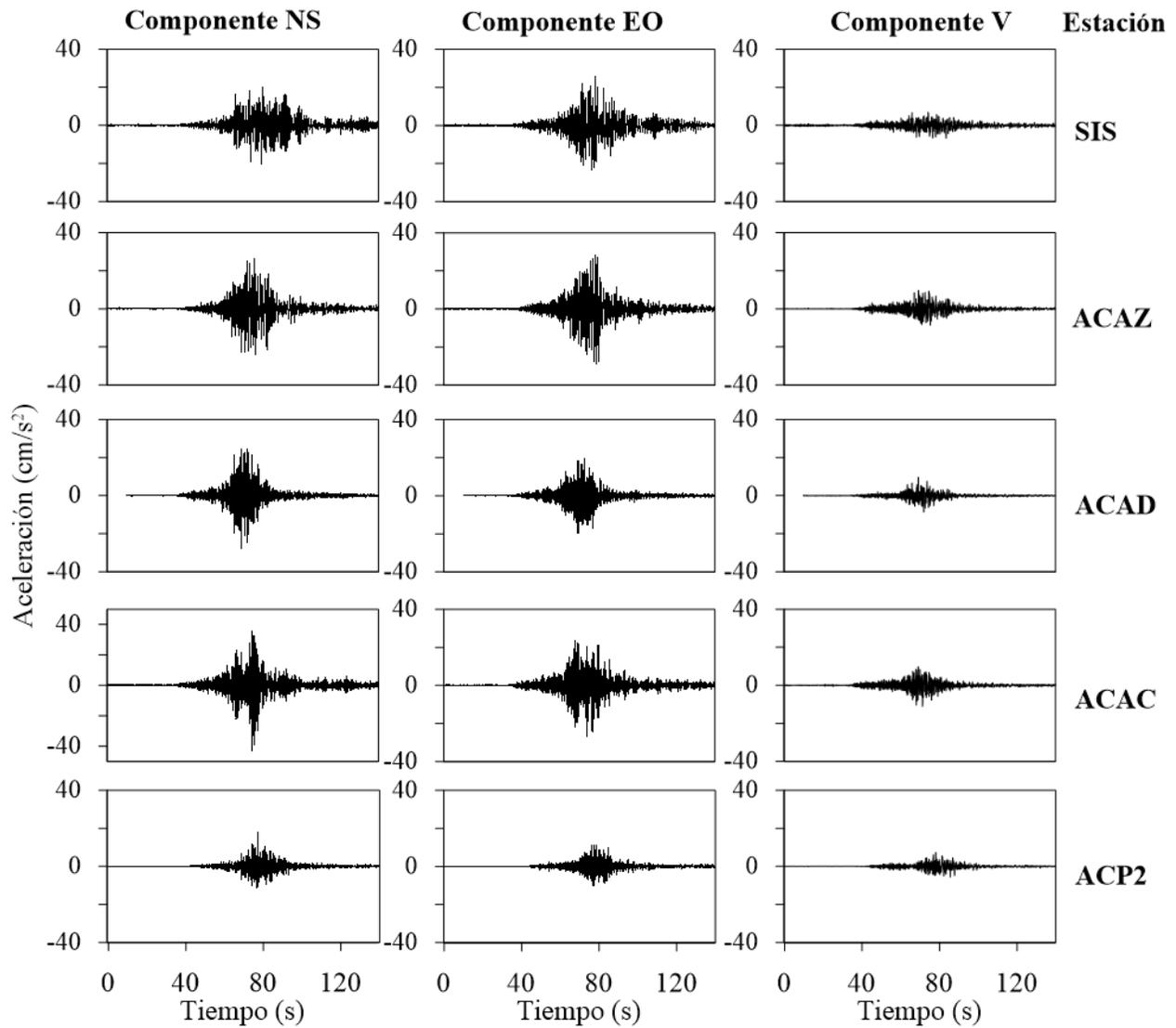


Figura 72. Acelerogramas de los componentes horizontales (NS y EO) y vertical (V) de las estaciones de Acapulco del evento 18-1

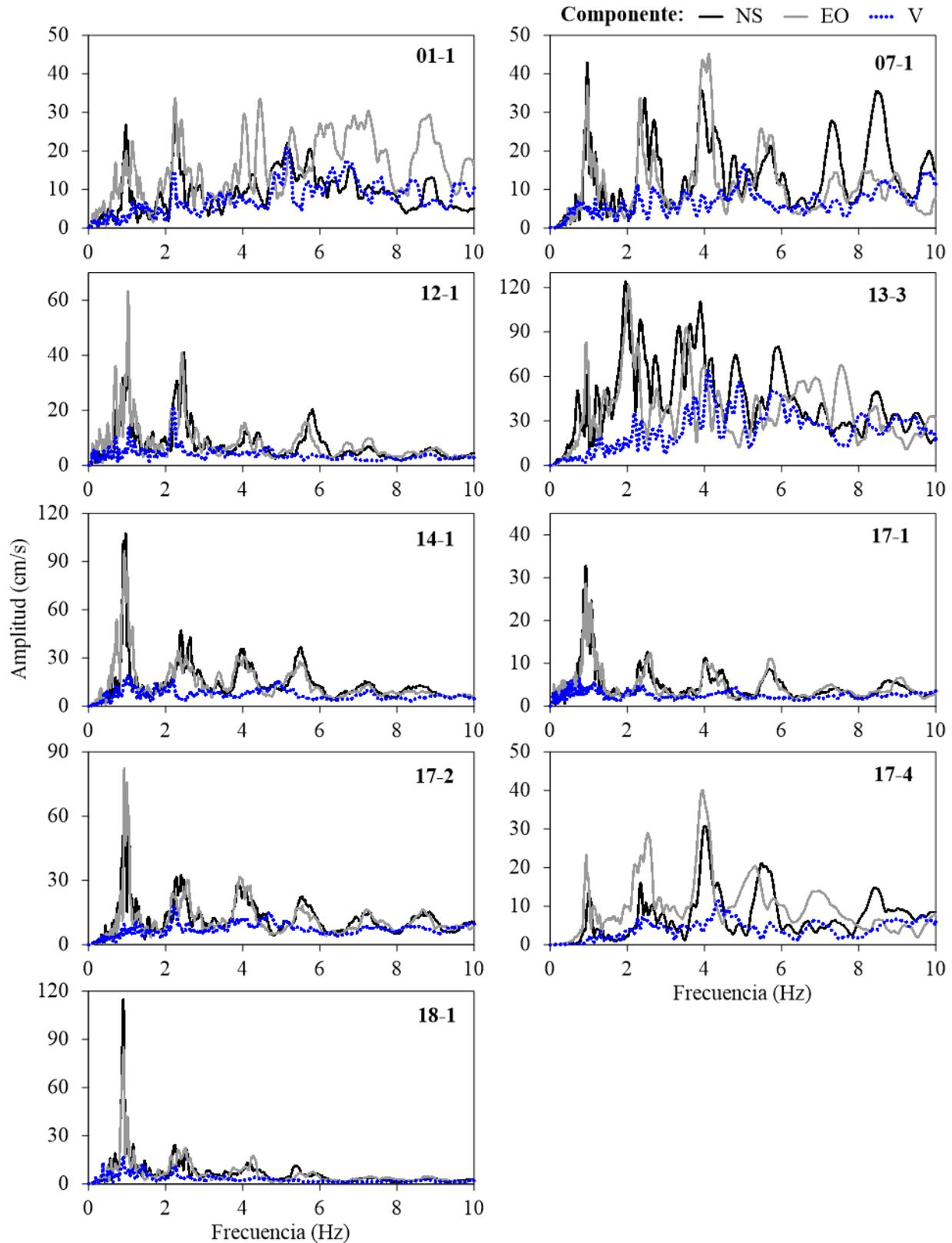


Figura 73. Espectros de Fourier de los componentes NS, EO y V de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación ACAZ

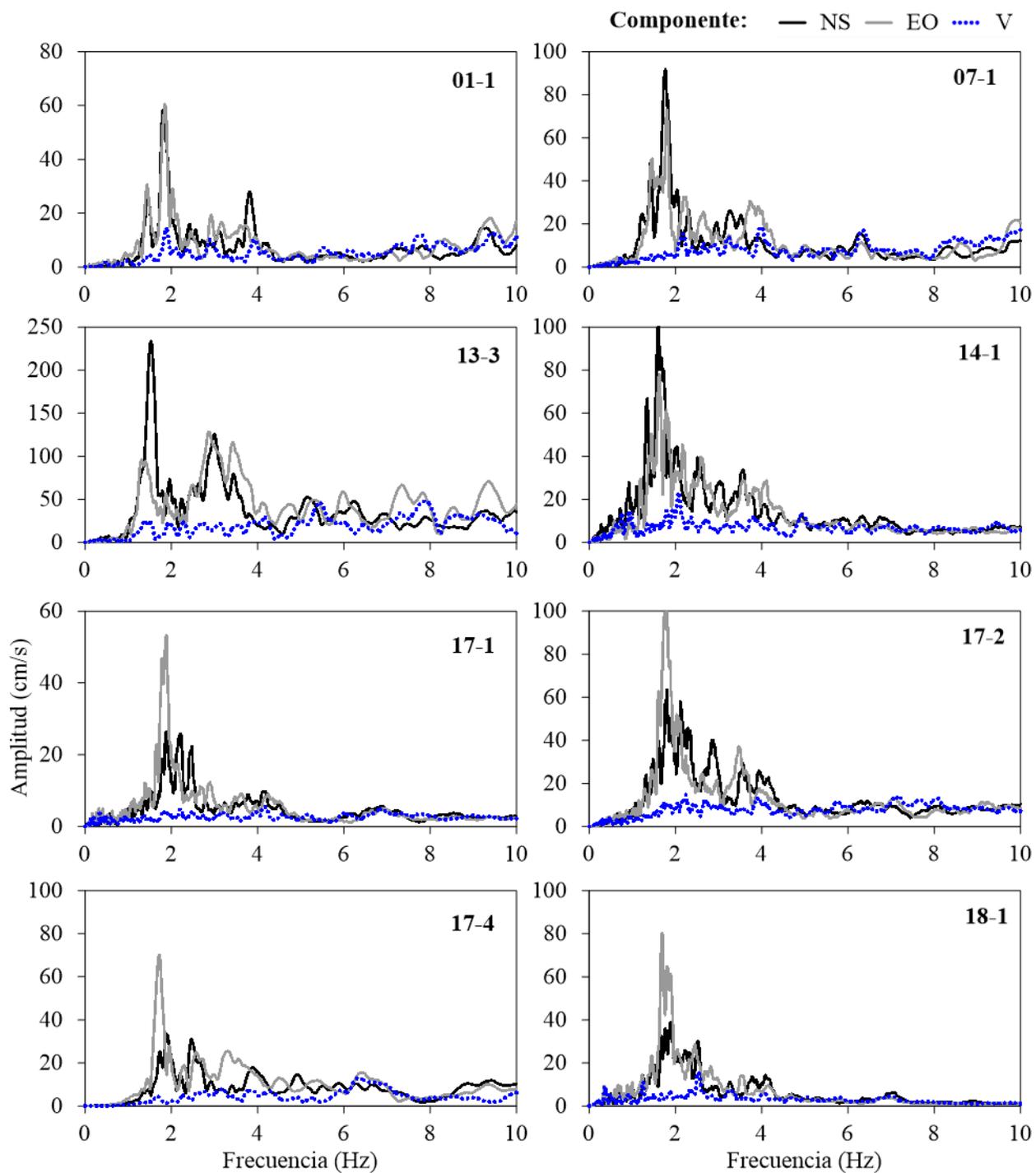


Figura 74. Espectros de Fourier de los componentes NS, EO y V de los eventos 01-1, 07-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación ACAC

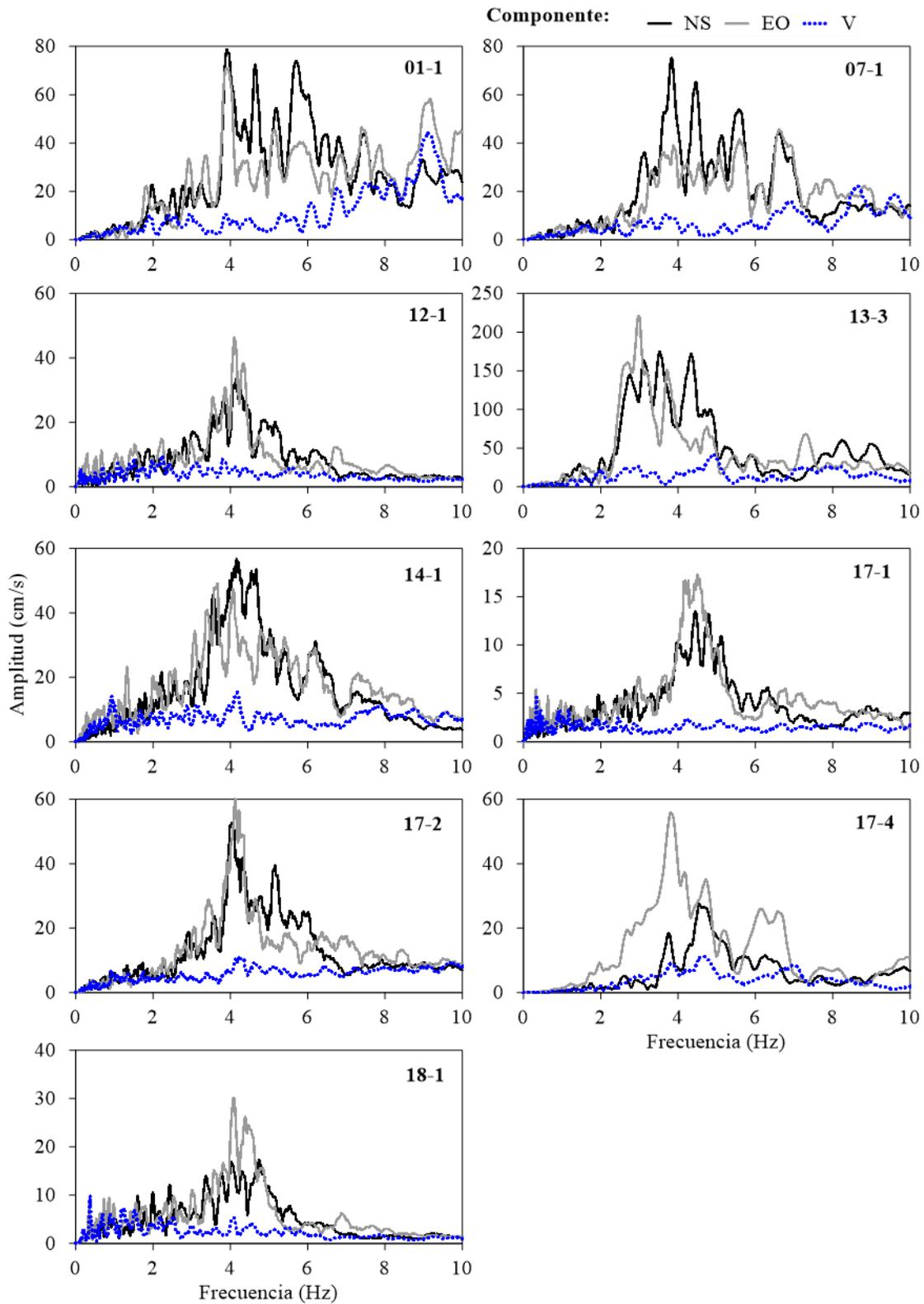


Figura 75. Espectros de Fourier de los componentes NS, EO y V de los eventos 01-1, 07-1, 12-1 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación ACAD

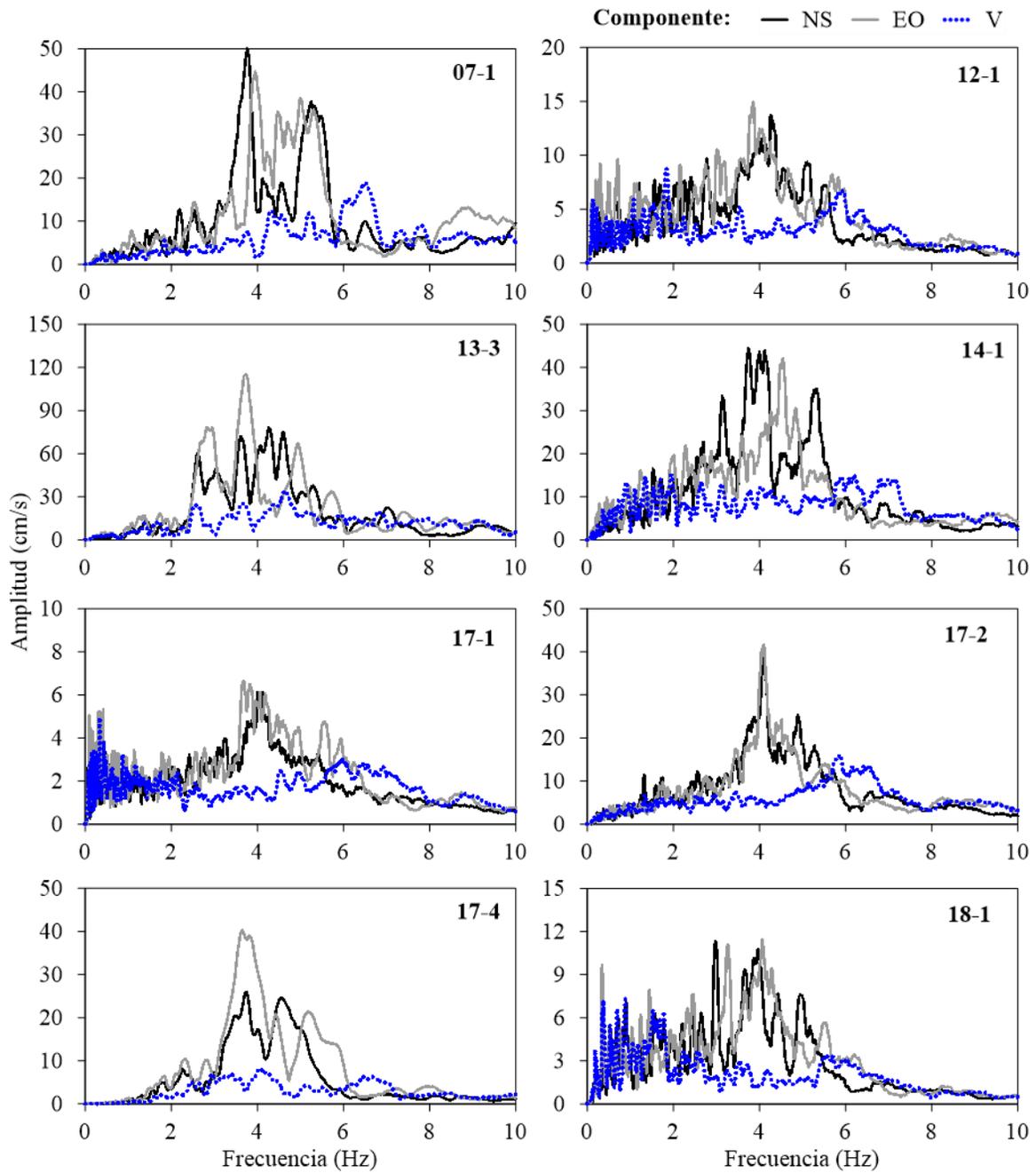


Figura 76. Espectros de Fourier de los componentes NS, EO y V de los eventos 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación ACP2

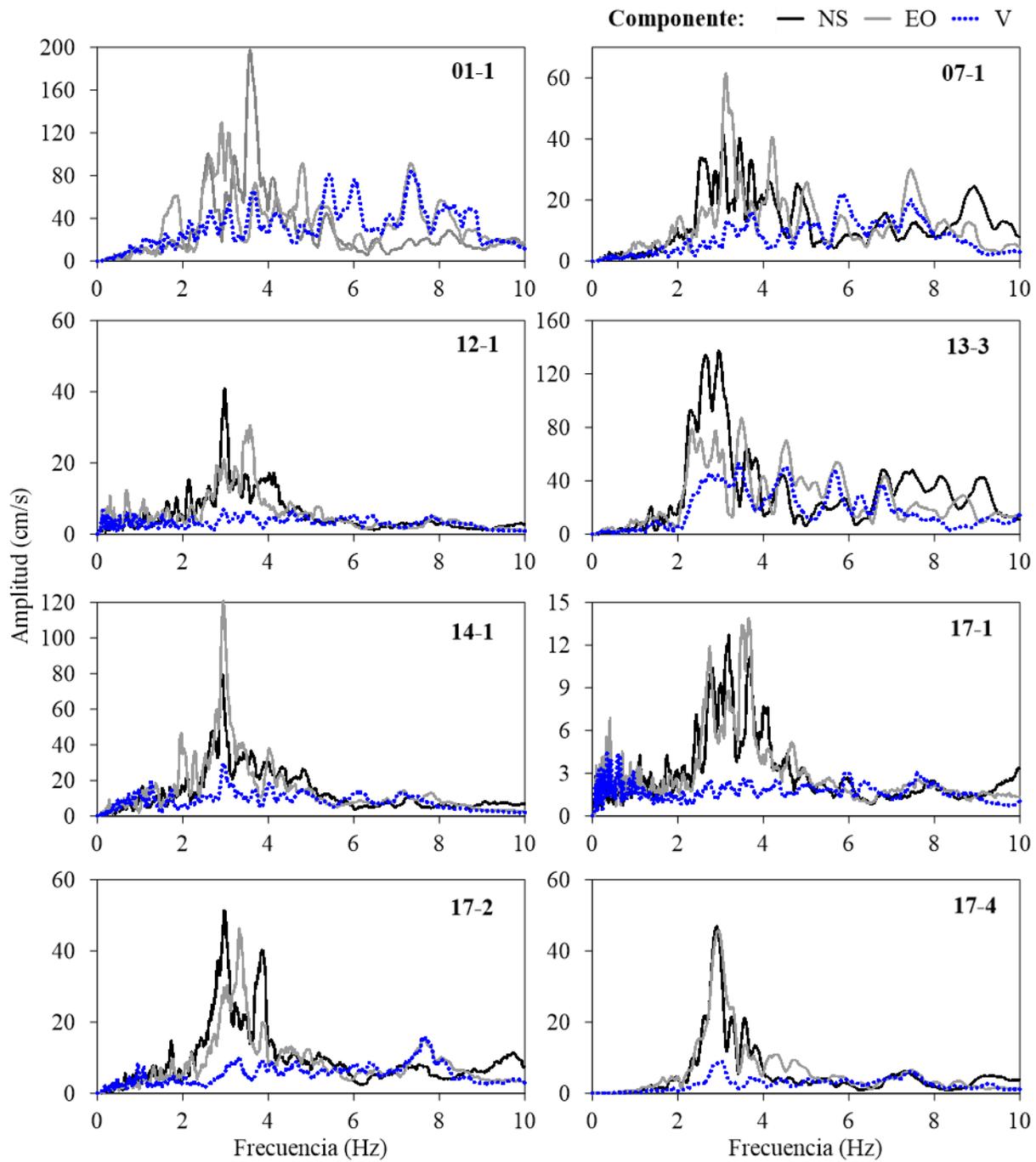


Figura 77. Espectros de Fourier de los componentes NS, EO y V de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2 y 17-4 registrados en la estación ACAR

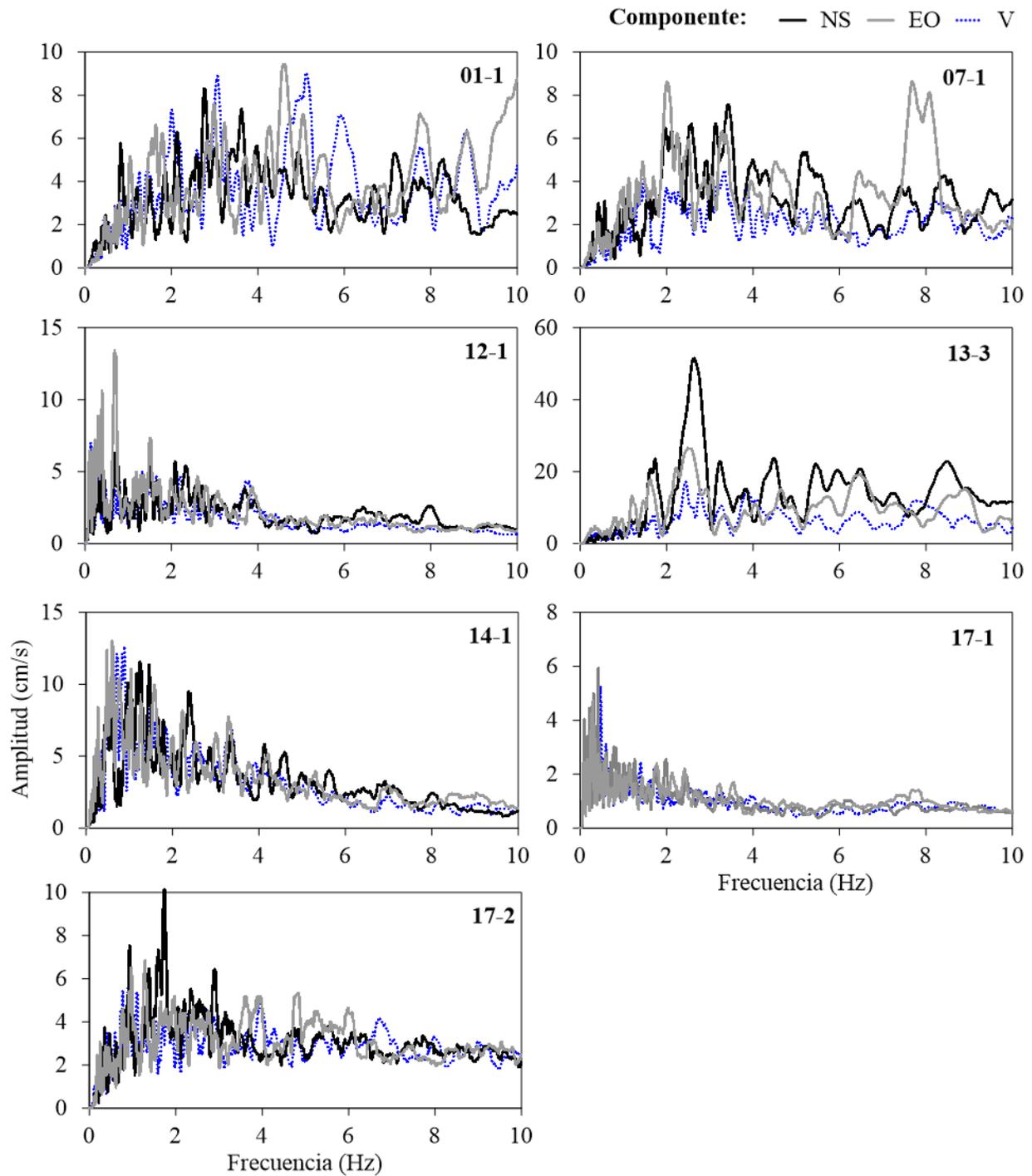


Figura 78. Espectros de Fourier de los componentes NS, EO y V de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1 y 17-2 registrados en la estación VNTA

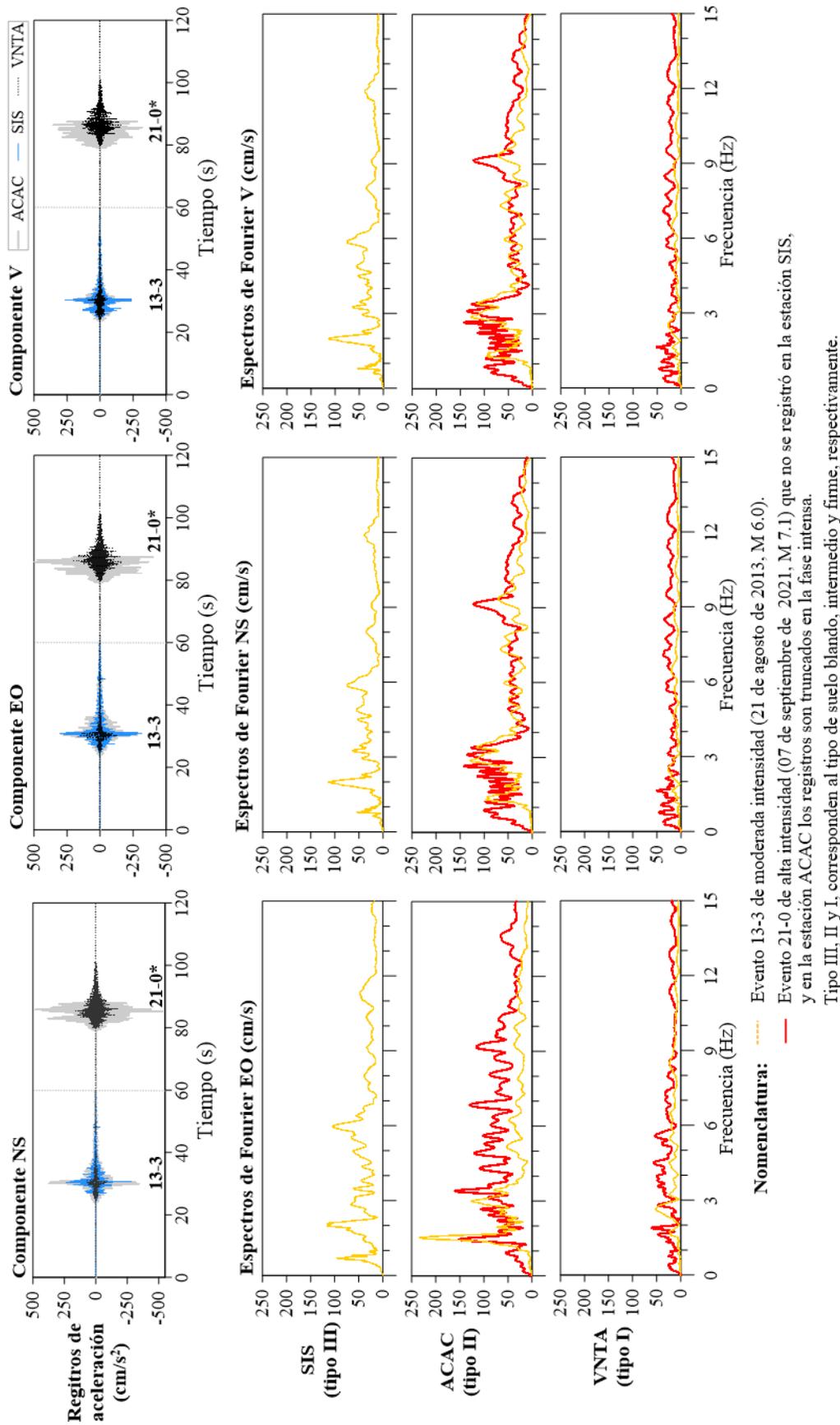


Figura 79. Comparación de los registros de aceleración y espectros de Fourier del evento 21-0 de alta intensidad con el evento 13-3 de moderada intensidad registrados en las estaciones SIS, ACAC y VNTA

4.3.2 Estimación de las frecuencias o periodos dominantes

Se hace una estimación de las frecuencias o dominantes la estación de jardín del edificio SIS con respecto a las frecuencias dominantes de las estaciones de campo del II-UNAM ubicadas en Acapulco (ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA).

La comparación de la identificación de frecuencias o periodos dominantes se realiza con los cocientes de Nakamura (CN) calculados con los registros completos, con la fase final de los registros, y con los ERA y ERD a partir de los criterios y procedimientos descritos en el subcapítulo 4.1.

Las tablas 23 y 24 resumen los valores de las frecuencias identificados en los CN (estimación con los registros completos) y en los CN_{ff} (estimación con la fase final de los registros), respectivamente, en ambos casos los valores se muestran también en términos de periodos. La identificación de estas frecuencias o periodos se realiza en los componentes horizontales NS y EO por separado.

En las figuras C.4 a C.8 del Apéndice C se presenta los CN y CN_{ff} calculados de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 que fueron registrados de las estaciones de campo del II-UNAM y en las tablas C.1 y C.2 del mismo apéndice se muestran los valores de las Amp_{máx} a los que están asociadas las frecuencias o periodos de las tablas 23 y 24, respectivamente.

Por otro lado, en las tablas 25 y 26 se presentan los valores de los periodos obtenidos con los ERA y ERD, respectivamente; la estimación se realiza en los componentes traslacionales NS y EO. Los valores de los periodos están asociados a la máxima respuesta de aceleración y desplazamiento mostrados en las tablas C.3 y C.4 del apéndice C.

Tabla 23. Periodos dominantes en s de las estaciones del II-UNAM, identificados en los CN calculados con los registros completos, en los componentes EO y NS

Evento	ACAZ		ACAC		ACAD		ACP2		ACAR		VNTA	
	EO/V	NS/V										
01-1	1.02	1.02	0.56	0.56	0.17	0.17	n.d.	n.d.	0.40	0.55	0.28	0.22
07-1	1.02	0.90	0.58	0.55	0.22	0.22	0.25	0.25	0.41	0.42	0.29	0.13
12-1	1.13	1.16	n.d.	n.d.	0.24	0.24	0.23	0.26	0.47	0.37	0.27	0.26
13-3	1.09	1.09	0.62	0.62	0.27	0.27	0.33	0.33	0.48	0.48	0.22	0.15
14-1	1.13	1.17	0.61	0.61	0.22	0.27	0.25	0.21	0.37	0.52	0.30	0.30
17-1	1.08	1.08	0.47	0.58	0.21	0.22	0.24	0.26	0.34	0.36	0.28	0.29
17-2	1.11	1.01	0.62	0.62	0.25	0.25	0.24	0.24	0.40	0.40	0.32	0.21
17-4	1.17	1.16	0.52	0.55	0.20	0.27	0.20	0.27	0.50	0.50	n.d.	n.d.
18-1	1.13	1.08	0.57	0.58	0.26	0.26	0.26	0.26	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Promedio ⁽¹⁾	1.10	1.07	0.57	0.58	0.23	0.24	0.25	0.26	0.42	0.45	0.28	0.22
DE	0.05	0.09	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03	0.06	0.07	0.03	0.07
CV (%)	4.7	8.2	9.2	5.1	14.0	13.8	14.8	13.0	13.4	16.0	11.1	29.5

DE y CV son la desviación estándar y el coeficiente de variación. n.d.-Dato no disponible porque no se tienen registros. ⁽¹⁾Promedio estimado con los valores disponibles.

Tabla 24. Periodos dominantes en s de las estaciones del II-UNAM, identificados en los CNff calculados con la fase final de los registros, en los componentes EO y NS

Evento	ACAZ		ACAC		ACAD		ACP2		ACAR		VNTA	
	EO/V	NS/V										
01-1	1.04	1.00	0.55	0.57	0.20	0.19	n.d.	n.d.	0.27	0.30	0.12	0.12
07-1	1.11	1.09	0.52	0.53	0.21	0.22	0.26	0.22	0.33	0.34	0.15	0.15
12-1	1.05	1.04	n.d.	n.d.	0.24	0.26	0.25	0.22	0.31	0.32	0.18	0.18
13-3	1.11	1.12	0.58	0.58	0.25	0.25	0.20	0.22	0.32	0.32	0.11	0.16
14-1	1.11	1.11	0.54	0.59	0.25	0.25	0.26	0.23	0.35	0.35	0.13	0.13
17-1	1.08	0.98	0.59	0.58	0.23	0.23	0.26	0.24	0.33	0.29	0.17	0.22
17-2	1.11	1.02	0.55	0.54	0.24	0.25	0.25	0.23	0.32	0.32	0.13	0.16
17-4	1.11	1.01	0.56	0.56	0.21	0.23	0.25	0.24	0.33	0.33	n.d.	n.d.
18-1	0.96	1.15	0.55	0.55	0.24	0.23	0.23	0.22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Promedio ⁽¹⁾	1.08	1.06	0.56	0.56	0.23	0.23	0.25	0.23	0.32	0.32	0.14	0.16
DE	0.05	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03
CV (%)	4.8	5.7	4.0	3.8	8.1	9.1	8.4	3.9	7.3	6.1	18.5	20.7

DE y CV son la desviación estándar y el cociente de variación. n.d.-Dato no disponible porque no se tiene registros. ⁽¹⁾Promedio estimado con los valores disponibles.

Tabla 25. Periodos dominantes en s de las estaciones del II-UNAM identificados en los ERA de los componentes EO y NS

Evento	ACAZ		ACAC		ACAD		ACP2		ACAR		VNTA	
	EO	NS										
01-1	0.19	0.14	0.52	0.55	0.11	0.16	n.d.	n.d.	0.14	0.29	0.06	0.10
07-1	0.12	0.25	0.58	0.56	0.19	0.26	0.21	0.19	0.24	0.11	0.12	0.13
12-1	0.41	0.42	n.d.	n.d.	0.24	0.24	0.26	0.24	0.29	0.34	0.13	0.26
13-3	0.24	0.14	0.33	0.28	0.34	0.26	0.26	0.21	0.24	0.36	0.11	0.12
14-1	0.18	1.01	0.61	0.39	0.24	0.24	0.24	0.19	0.21	0.34	0.21	0.26
17-1	0.23	0.17	0.40	0.54	0.24	0.21	0.26	0.24	0.29	0.36	0.22	0.12
17-2	0.25	0.25	0.47	0.57	0.24	0.24	0.24	0.24	0.26	0.29	0.14	0.20
17-4	0.10	0.20	0.50	0.58	0.26	0.21	0.26	0.24	0.36	0.34	n.d.	n.d.
18-1	1.11	1.10	0.56	0.56	0.21	0.21	0.24	0.26	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Promedio ⁽¹⁾	0.31	0.41	0.50	0.50	0.23	0.23	0.25	0.23	0.25	0.30	0.14	0.17
DE	0.31	0.38	0.09	0.11	0.06	0.03	0.02	0.03	0.06	0.08	0.06	0.07
CV (%)	99.1	92.1	19.0	21.6	26.5	14.0	7.2	11.6	25.4	27.3	39.9	40.6

DE - desviación estándar, CV coeficiente de variación. n.d.-Dato no disponible porque no se tienen los registros. ⁽¹⁾Promedio estimado con los valores disponibles.

Al comparar los valores identificados en los CN con los valores identificados en los CNff, se observa que la estimación con registros completos (CN) se obtienen periodos ligeramente mayores. Es en las estaciones ACAR y VNTA donde se presentan las mayores diferencias entre ambas estimaciones, de 16 a 50 %. Cabe destacar que los valores de los periodos dominantes de las estaciones ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2 y ACAR, identificados con los CNff, tienen una menor variación, ya que los CV son moderadamente bajos $CV \leq 9.1 \%$.

Tabla 26. Periodos dominantes en s de las estaciones del II-UNAM identificados en los ERD de los componentes EO y NS

Evento	ACAZ		ACAC		ACAD		ACP2		ACAR		VNTA	
	EO	NS										
01-1	1.08	1.47	0.54	0.55	0.25	0.25	n.d.	n.d.	0.38	0.38	n.a.	n.a.
07-1	1.10	1.05	0.58	0.65	0.27	0.27	0.24	0.28	0.32	0.38	n.a.	n.a.
12-1	1.01	1.42	n.d.	n.d.	0.24	0.34	0.28	0.24	0.33	0.35	n.a.	n.a.
13-3	1.42	1.16	0.71	0.76	0.36	0.34	0.28	0.26	0.38	0.38	n.a.	n.a.
14-1	1.08	1.05	0.63	0.70	0.24	0.25	0.28	0.25	0.35	0.36	n.a.	n.a.
17-1	1.08	1.08	0.55	0.55	0.24	0.25	0.28	0.25	0.36	0.37	n.a.	n.a.
17-2	1.10	1.06	0.57	0.57	0.26	0.25	0.24	0.24	0.30	0.34	n.a.	n.a.
17-4	1.00	1.08	0.55	0.59	0.27	0.21	0.28	0.26	0.35	0.36	n.a.	n.a.
18-1	1.12	1.13	0.56	0.59	0.24	0.28	0.25	0.26	n.d.	n.d.	n.a.	n.a.
Promedio ⁽¹⁾	1.11	1.17	0.59	0.62	0.26	0.27	0.27	0.26	0.35	0.37	n.a.	n.a.
DE	0.12	0.16	0.06	0.08	0.04	0.04	0.02	0.01	0.03	0.02	n.a.	n.a.
CV (%)	11.1	13.9	9.8	12.3	14.6	16.0	7.2	5.1	8.2	4.1	n.a.	n.a.

DE - desviación estándar, CV coeficiente de variación. n.d.-Dato no disponible porque no se tienen los registros. n.a – valores que no son ⁽¹⁾Promedio estimado con los valores disponibles

En la tabla 27 se muestra el resumen de los valores promedio de los periodos dominantes calculados con los valores identificados en los CN, CN_{ff}, ERA y ERD, y se incluyen además los valores aproximados que se identifican en el mapa de isoperiodos de la figura 59.

Nótese que la estimación de los periodos dominantes del sitio SIS (suelo blando) con los CN, CN_{ff} y ERD, tienen una semejanza entre sí, los valores obtenidos con estos métodos varían entre 1.22 a 1.29 s, teniendo congruencia con el intervalo de 1.20 a 1.30 s obtenido del mapa de isoperiodos.

Los valores promedio de los periodos estimados en la estación ACAZ (suelo blando) identificados con los CN, CN_{ff} y ERD son del orden de 1.1 s en ambos componentes, este valor se encuentra dentro del intervalo de valores que va de 1.0 a 1.2 s que definen a las curvas de isoperiodos de la figura 59. En cuanto a los valores obtenidos con los ERA, se obtienen diferencias significativas con respecto a los obtenidos con los otros métodos; debido a que los valores promedio 0.31 y 0.41 s no se asemejan entre sí, además que son caracterizados por un alto CV ($\geq 18.5\%$), es posible decir que, con la información disponible, los valores no son representativos al periodo dominante de la estación ACAZ.

Como se ha mostrado en la sección 4.2, en sitio SIS correspondiente a un suelo blando no fue posible obtener valores del periodo dominante congruentes a partir de los ERA. Este mismo hecho ocurre con la estimación de los periodos dominantes de la estación ACAZ (suelo blando), ya que las ordenadas máximas están asociadas para periodos menores de 0.15 s, difiriendo con el valor de 1.1 s obtenido mediante los CN, CN_{ff} y ERD.

En la estación ACAC (suelo intermedio) los valores promedio obtenidos de los CN, CN_{ff}, ERA y ERD varían entre 0.56 y 0.62 s en ambos componentes horizontales, evidenciando un intervalo de periodos ligeramente más amplio en comparación con el resto de las estaciones. Se podrá notar que los valores de los periodos dominantes obtenidos en las distintas estimaciones no coinciden con el intervalo de periodos de 0.20 y 0.30 s identificados den le mapa de isoperiodos.

En la estación ACAD (suelo intermedio) se observa que los periodos dominantes promedio obtenidos de los CN, CN_{ff} y ERA coinciden en el valor de 0.23 s en ambos componentes horizontales. Mientras

que, los valores promedio de 0.26 y 0.27 obtenidos en la identificación con los ERD los componentes EO y NS, respectivamente estos difieren en 13 y 17 % con respecto al valor de 0.23 s citado previamente. Comparando con el valor de 0.20 s obtenido del mapa de isoperiodos se puede decir que la aproximación coherente con respecto al valor promedio de 0.23 obtenido mediante los CN, CN \dot{f} o ERA.

Los periodos dominantes en la estación VNTA (suelo firme) identificados en los CN tienen una alta variación entre componentes y entre eventos, posiblemente relacionado con el alto contenido frecuencial en los espectros de Fourier (figura 74), en especial en sitios cercanos a la fuente. En estos casos, las amplificaciones más significativas en los CN suelen estar distribuidas en una banda amplia de frecuencias comprendida entre 1 a 10 Hz, por lo que se dificulta la identificación de un valor único del periodo, de manera similar ocurre con en la identificación de los periodos o frecuencias con los CN \dot{f} . Por otro lado, la identificación de periodo en los ERA es más directa, ya que las máximas aceleraciones se concentran entre 0.06 y 0.26 s (3.8 a 16.7 Hz), en ambos componentes horizontales, tal como se aprecia en la figura C.14 del Apéndice C. En cuanto a la estimación con los ERD no es posible identificar un valor único o un intervalo de periodos, las ordenadas espectrales asociadas a periodos menores de 2.0 s no definen una cresta.

De los sitios analizados, los periodos dominantes identificados en las estaciones ACAD, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA son menores con respecto al periodo del sitio donde está el edificio SIS (1.2 y 1.3 s). En cambio, en el sitio de la estación ACAZ se obtienen periodos dominantes parecidos al del sitio del SIS.

Tabla 27. Periodos dominantes promedio en s de las estaciones del II-UNAM ubicadas en Acapulco

Estación	Tipo de Suelo	Identificación con los CN		Identificación con los CN \dot{f}		Identificación con los ERA		Identificación con los ERD		Valor de la curva del isoperiodo ⁽¹⁾
		EO	NS	EO	NS	EO	NS	EO	NS	
SIS	III	1.29	1.26	1.23	1.22	0.57	0.35	1.27	1.23	1.20 - 1.30
ACAZ	III	1.10	1.07	1.08	1.06	0.31	0.41	1.11	1.17	1.00 - 1.20
ACAC	II	0.57	0.58	0.56	0.56	0.50	0.50	0.59	0.62	0.20 - 0.30
ACAD	II	0.23	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.26	0.27	0.20
ACP2	II	0.25	0.26	0.25	0.23	0.25	0.23	0.27	0.26	0.10
ACAR	II	0.42	0.45	0.32	0.32	0.25	0.30	0.35	0.37	0.20
VNTA	I	0.28	0.22	0.15	0.15	0.14	0.17	n.d.	n.d.	0.20 - 30

⁽¹⁾Valores identificados en el mapa de isoperiodos. n.d.-Dato no disponible porque no

4.4 Análisis comparativo entre estaciones de campo

El análisis comparativo se realiza para la estación de jardín del edificio SIS con respecto a las seis estaciones acelerométricas del II-UNAM ubicadas en la ciudad de Acapulco, con el objetivo de conocer la variación del movimiento del sitio SIS ante la ocurrencia de los eventos más intensos registrados simultáneamente en otros sitios. Es importante anotar que en el análisis comparativo entre estaciones se abordan los mismos puntos descritos en el subcapítulo 4.1.

Comparación de las amplitudes de Fourier

Los espectros de Fourier que se comparan son calculados con los registros de los nueve eventos más intensos seleccionados (01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1). En la figura 80 se muestran los espectros de Fourier de la estación SIS y de las seis estaciones del II-UNAM, agrupando los espectros por eventos, en los componentes NS y EO.

En las figuras 13 a 15 del subcapítulo 1.3 se muestran a detalles los espectros de Fourier estimados en la estación SIS, y en las figuras 72 a 78 se muestran los espectros de Fourier de las estaciones de las estaciones ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA, respectivamente.

En la figura 80 se observa que por lo general en las estaciones SIS y ACAZ (suelos blandos), las máximas amplitudes se concentran en frecuencias menores de 1.5 Hz, y para frecuencias mayores a este valor, las amplitudes de Fourier se atenúan.

En la estación ACAC (suelo intermedio) las máximas amplitudes espectrales se concentran entre 1.0 y 3.0 Hz; en la estación ACAR (suelo intermedio) entre 2.0 y 4.0 Hz; en la estación ACAD (suelo intermedio) las máximas amplitudes están entre 3.0 y 5.0 Hz; en la estación ACP2 (suelo intermedio) la banda de frecuencias está comprendida entre 2.5 y 6.0 Hz; y en la estación VNTA (suelo firme) las amplitudes más significativas están distribuidas en una banda mucho más angosta comprendida entre 0.50 y 10.0 Hz.

En resumen, en las estaciones ACAC, ACAC y SIS se evidencian las mayores amplitudes de Fourier durante la ocurrencia del evento 13-3 de moderada intensidad, las cuales superan los 100 cm/s. Además, cabe destacar que en el sitio SIS, en donde el periodo de sitio (1.22 s) es mayor con respecto al resto de las estaciones, se tienen amplitudes mayores con respecto al resto de las estaciones durante los eventos 12-1, 17-1 y 18-1, cuyas magnitudes están comprendidas entre los 50 y 100 cm/s.

Particularmente en la estación la VNTA (suelo firme) se observa que las amplitudes de Fourier son menores con respecto al resto de las estaciones. En los eventos de baja intensidad la magnitud de las amplitudes no supera los 15 cm/s, mientras que en el evento 13-3, de moderada intensidad, las amplitudes de Fourier oscilan alrededor de los 50 cm/s en todo el dominio de frecuencias mostrado.

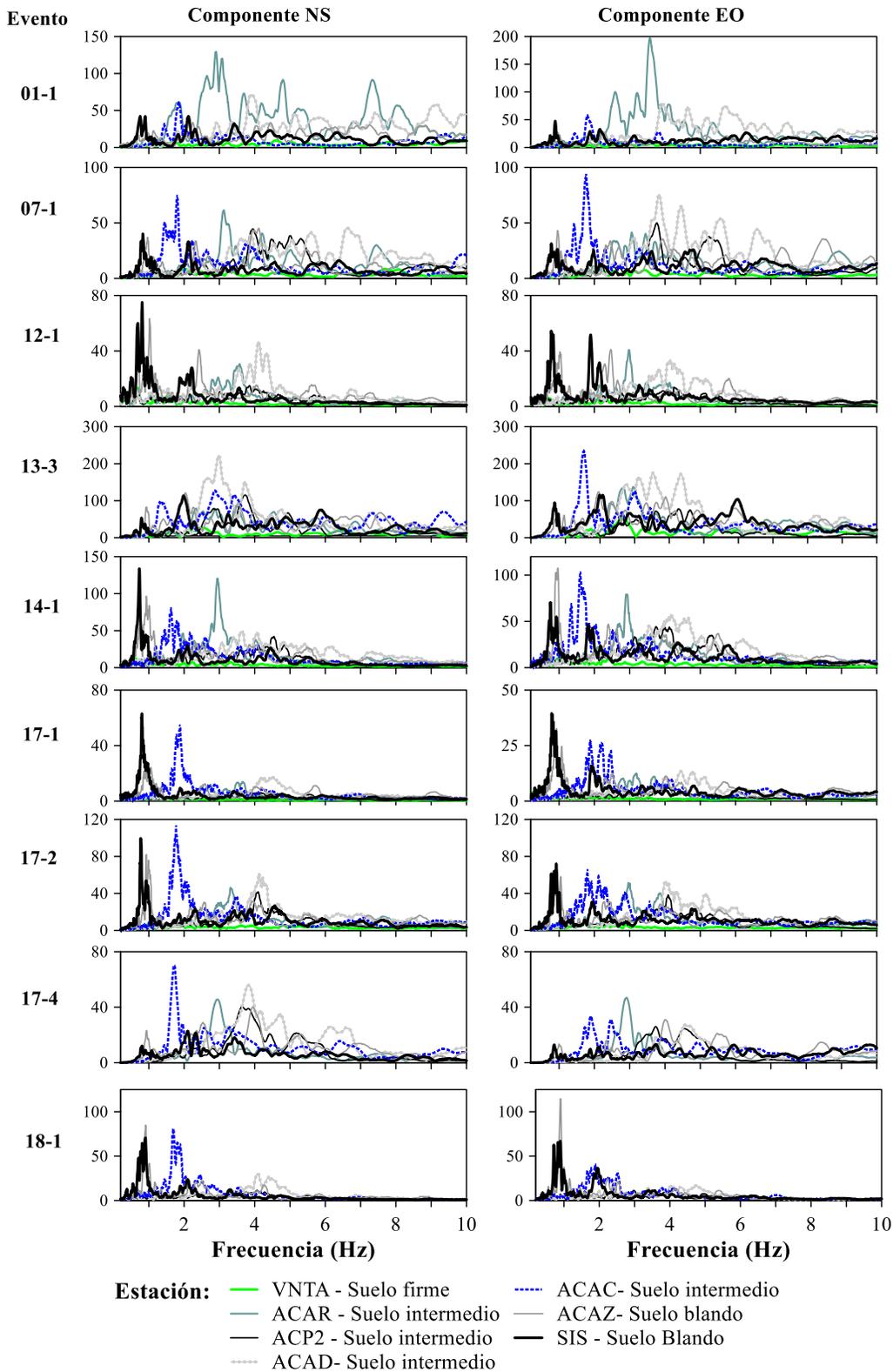


Figura 80. Comparación de las amplitudes de Fourier en cm/s en los componentes NS y EO, de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en las estaciones SIS, ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA

Comparación de la respuesta con ERA y ERD

En las figuras 81 y 82 se muestran los ERA y ERD, respectivamente, agrupando los espectros por estaciones, y por componentes NS y EO. En los espectros se representa con franjas de color gris tenue los intervalos de frecuencias o periodos dominantes obtenidos con el análisis de los CN en los subcapítulos 4.2 y 4.3.

En las figuras 58 y 59 del subcapítulo 4.2 se puede consultar con mayor detalle las curvas ERA y ERD calculados con los registros de la estación SIS. Complementariamente, en las figuras C.9 a C.14 del apéndice C, se presentan los espectros de aceleración y de desplazamientos de las estaciones ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA, respectivamente.

En la figura 81 se observa que en las estaciones ACAD, ACP2, ACAR (suelos intermedios) y VNTA (suelo firme) las máximas aceleraciones ($a_{m\acute{a}x}$) están asociadas a la banda de periodos dominante del sitio (franjas grises). En cambio, en las estaciones SIS y ACAZ (suelos blandos) las $a_{m\acute{a}x}$ están asociadas a periodos cercanos al valor de 0.5 s, difiriendo con la banda de periodos dominantes obtenidos con los CN. Así mismo, en la estación ACAC (suelo intermedio), las máximas aceleraciones están asociadas a un intervalo de periodos comprendido entre 0.1 y 1.20 s, que de igual manera difiere con su banda de periodos dominantes (franja gris).

En las estaciones ACAD, ACP2, ACAR y VNTA se aprecia que las amplitudes de aceleración asociadas a periodos mayores de 1.0 s se atenúan, en cambio en las estaciones SIS, ACAZ y ACAC las amplitudes de aceleración comprendidas entre 0.50 y 1.25 s definen una segunda cresta con magnitudes aun significativas.

En los ERA se evidencia que el evento 13-3, de moderada intensidad, destaca por tener las mayores aceleraciones de todas las estaciones analizadas. En este evento las aceleraciones superan los 1000 cm/s^2 en las estaciones SIS, ACAZ, ACAC, ACAD y ACAR, siendo la estación ACAD (suelo intermedio) la que supera los 1500 cm/s^2 en ambos componentes. En contraste, en la estación ACP2 (suelo intermedio), las $a_{m\acute{a}x}$ durante el evento 13-3 varía entre 500 y 1000 cm/s^2 y en la estación VNTA (suelo firme) las $a_{m\acute{a}x}$ es del orden de 500 cm/s^2 .

Por otro lado, en los ERD (figura 82) se observa que los $D_{m\acute{a}x}$ están asociados a la banda de periodos dominantes respectivos de cada sitio, advirtiendo que en las estaciones SIS y ACAZ las crestas coinciden con las franjas grises.

Durante el evento 13-3, de moderada intensidad, en la estación SIS se tiene el mayor $D_{m\acute{a}x}$ con respecto a las demás estaciones, el cual es de 9.4 cm en el componente EO. En cambio, en el resto de las estaciones los $D_{m\acute{a}x}$ son inferiores de los 6.0 cm durante el evento de 13-3, a excepción de la estación ACAC que es de 8.3 cm en el componente EO.

En las estaciones SIS, ACAZ, ACAC Y ACAD se aprecia que los desplazamientos asociados a periodos superiores de 2 s se mantienen entre 0.5 y 4.0 cm es decir no hay una atenuación de la respuesta. Mientras que en las estaciones ACP2, ACAR y VNTA se suele tener una tendencia creciente en los eventos más intensos, tal como se aprecia en los eventos 12-1, 13-3 y 14-1.

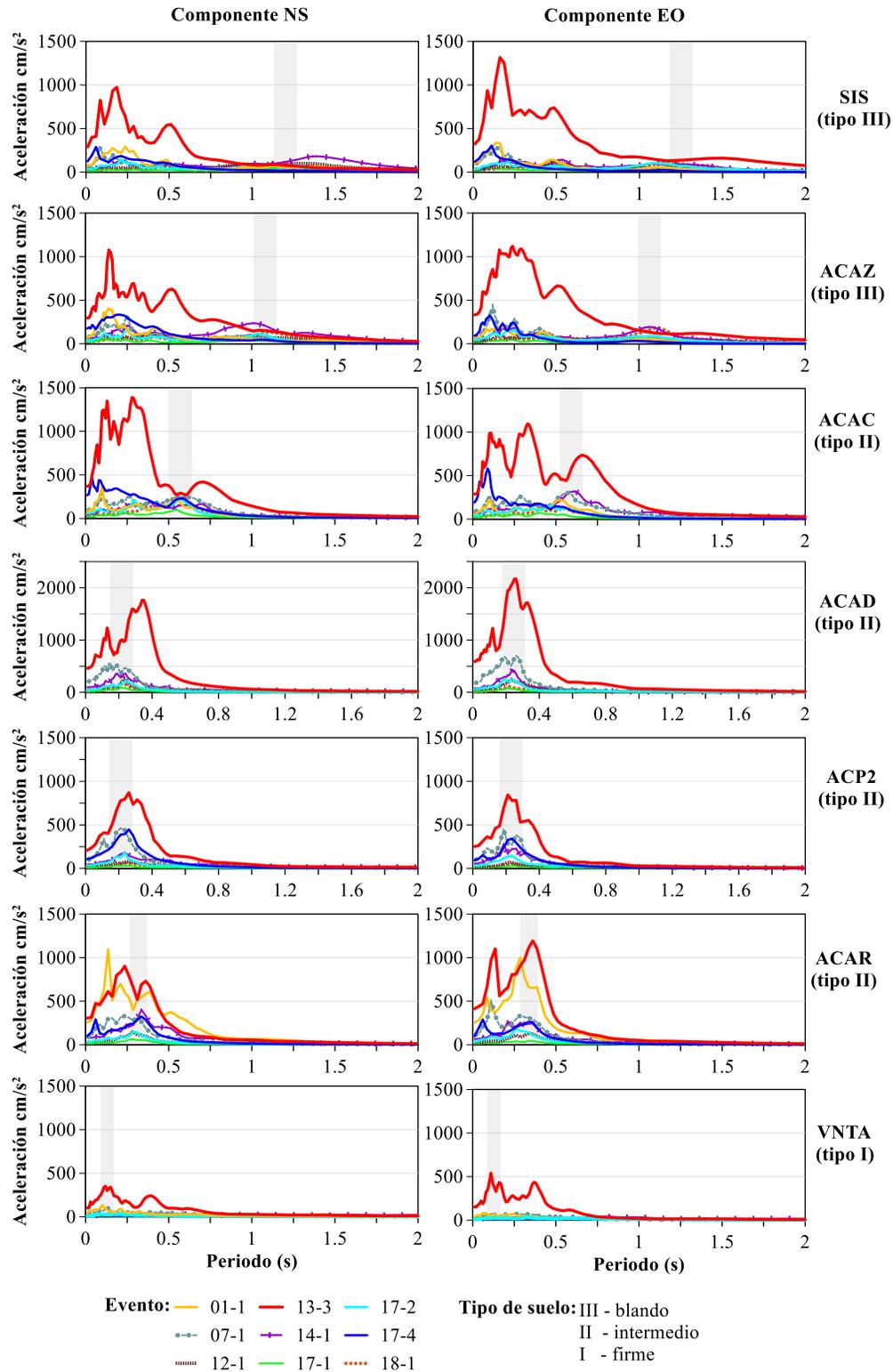


Figura 81. Comparación de los espectros de respuesta de aceleración en los componentes EO y NS, durante los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en las estaciones SIS, ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA

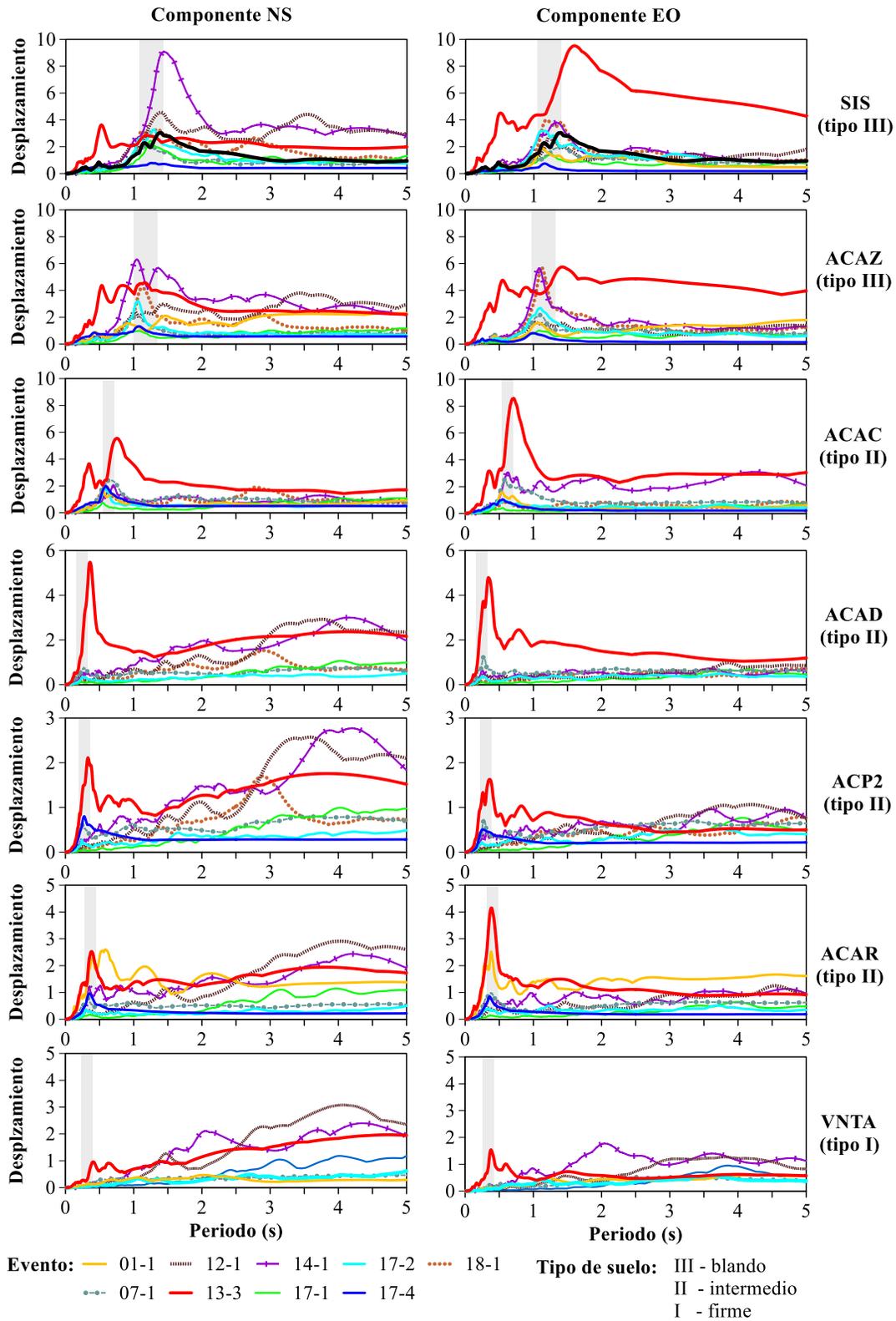


Figura 82. Comparación de los espectros de respuesta de desplazamiento en cm en los componentes NS y EO durante los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en las estaciones SIS, ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA

Comparación de las amplificaciones de los CN y de los CN_{ff}

En las figuras 83 y 84 se muestran respectivamente los cocientes CN y CN_{ff}, agrupando los por estaciones, y por componente (EO y NS). En los cocientes se incluye una franja de color gris tenue que representa las bandas de frecuencias dominantes, obtenidos en subcapítulos 4.2 y 4.3. En el apéndice C, en las figuras C.4 y C.9, se presentan las curvas de los cocientes de las estaciones ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA, respectivamente.

En la estación SIS (suelo blando) las Amp_{máx} identificados en los CN se concentran en la franja gris asociada a la frecuencia del terreno. Las curvas de los CN de la estación SIS (suelo blando) son semejantes a los CN de la estación ACAZ (suelo blando), en ambas estaciones las amplitudes de Fourier en los componentes horizontales se amplifican en más de 20 veces en comparación con las amplitudes verticales.

En la figura 83, se observa que en la estación ACAC (suelo intermedio) las Amp_{máx} están ubicadas entre 1.5 y 2.0 Hz cuyas magnitudes están entre 10 y 30; en la estación ACAD (suelo intermedio) las Amp_{máx} se encuentran entre 3.0 y 7.0 Hz con magnitudes de 5 a 15 unidades; en la estación ACAC (suelo intermedio) las Amp_{máx} varían entre 5 y 10, en un intervalo de frecuencias comprendido entre 2.5 y 6.0 Hz; y en la estación ACAR (suelo intermedio) las magnitudes de las Amp_{máx} son entre 5 y 15, comprendidas entre 4 y 8 Hz. De las estaciones ACAD, ACP2 y ACAR, catalogados como suelos intermedios, en general las Amp_{máx} son menores en comparación con las obtenidas en la estación SIS (suelo blando).

En la estación VNTA (suelo firme) las amplificaciones más significativas se presentan en una amplia banda de frecuencias comprendidas entre 0.50 y 10 Hz, aproximadamente, las magnitudes de las Amp_{máx} con magnitudes inferiores de 5 en los eventos de baja intensidad, mientras que en el evento 13-3 de moderada intensidad las magnitudes de las Amp_{máx} oscilan entre 5 y 10.

En la figura 83 se aprecia que durante el evento 13-3 de moderada intensidad ocurren las mayores amplificaciones entre los componentes EO/V de las estaciones del II-UNAM y la estación SIS, cuyas magnitudes son iguales o mayores que 42, 42, 39, 41, 19, y 9, respectivamente a las estaciones SIS, ACAZ, ACAZ, ACAD, ACP2 y VNTA.

Por otro lado, en los CN_{ff} (estación con la fase final de los registros) se observa que en el evento 13-3 las Amp_{máx} son del mismo orden a las obtenidas en los eventos de baja intensidad, caso que es de esperarse por tratarse de amplitudes de aceleración muy pequeñas y semejantes entre sí.

En la figura 84 se comparan las Amp_{máx} que están asociadas a las frecuencias dominantes de cada estación obtenidas con los CN (estimación con los registros completos) y con los CN_{ff} (estimación con la fase final de los registros) entre los componentes NS/V y EO/V.

En los eventos 01-1, 07-1, 12-1 13-3 y 17-4 se presentan las mayores amplificaciones, con magnitudes mayores de 20 unidades en las estaciones SIS, ACAZ y ACAD. En las estaciones ACP2, ACAR, y VNTA las amplificaciones son más pequeñas, en donde las magnitudes son menores de 20 veces, exceptuando las particularidades del evento 07-1 en la estación ACP2 y del evento 13-3 en la estación VNTA.

En el evento de moderada intensidad 13-3 se presenta la mayor amplificación en cada estación, exceptuando la estación ACAR.

Se puede anotar que, a partir de lo observado, en las estaciones SIS y ACAZ clasificadas como suelos blandos se suele tener las mayores amplificaciones con respecto a las estaciones ACAD, ACP2, ACAR (suelos blandos) y VNTA (suelo firme).

Las $Amp_{m\acute{a}x}$ identificadas en los CN_{ff} de los eventos 01-1, 12-1, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en las estaciones SIS y ACAZ suelen ser aproximadamente del mismo orden a las amplificaciones identificadas en los CN (estimaci3n con los registros completos), en cambio en las estaciones ACAC, ACAD, ACP2 y VNTA, con los eventos analizados, se suelen observar atenuaciones asociadas a las frecuencias dominantes cuando se estiman los CN_{ff} .

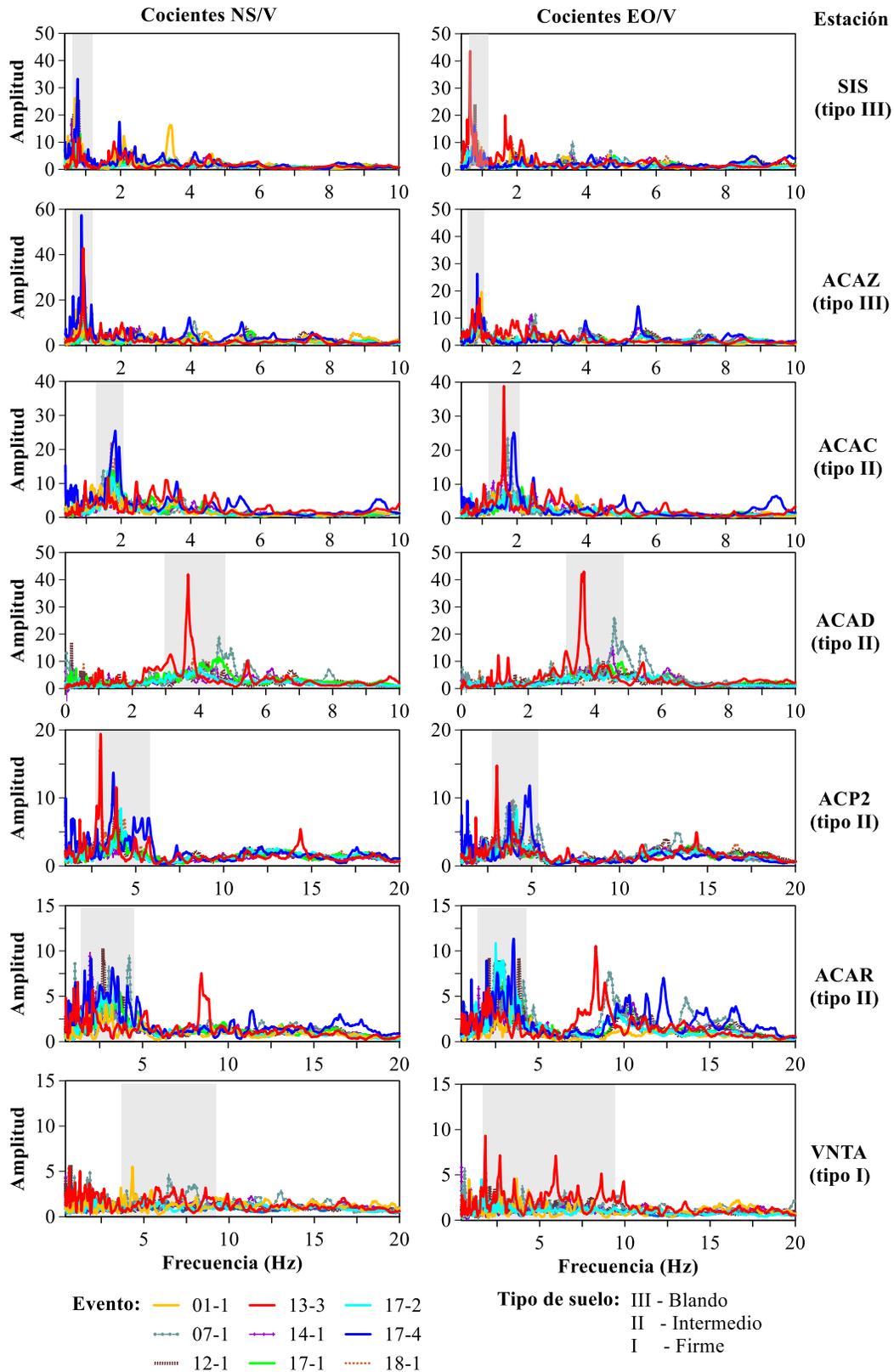


Figura 83. Comparación de los CN entre los componentes NS/V y EO/V calculados con los registros completos de los eventos registrados en las estaciones SIS, ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA. Las bandas en gris representan los intervalos en los que se identifican las frecuencias dominantes de cada sitio

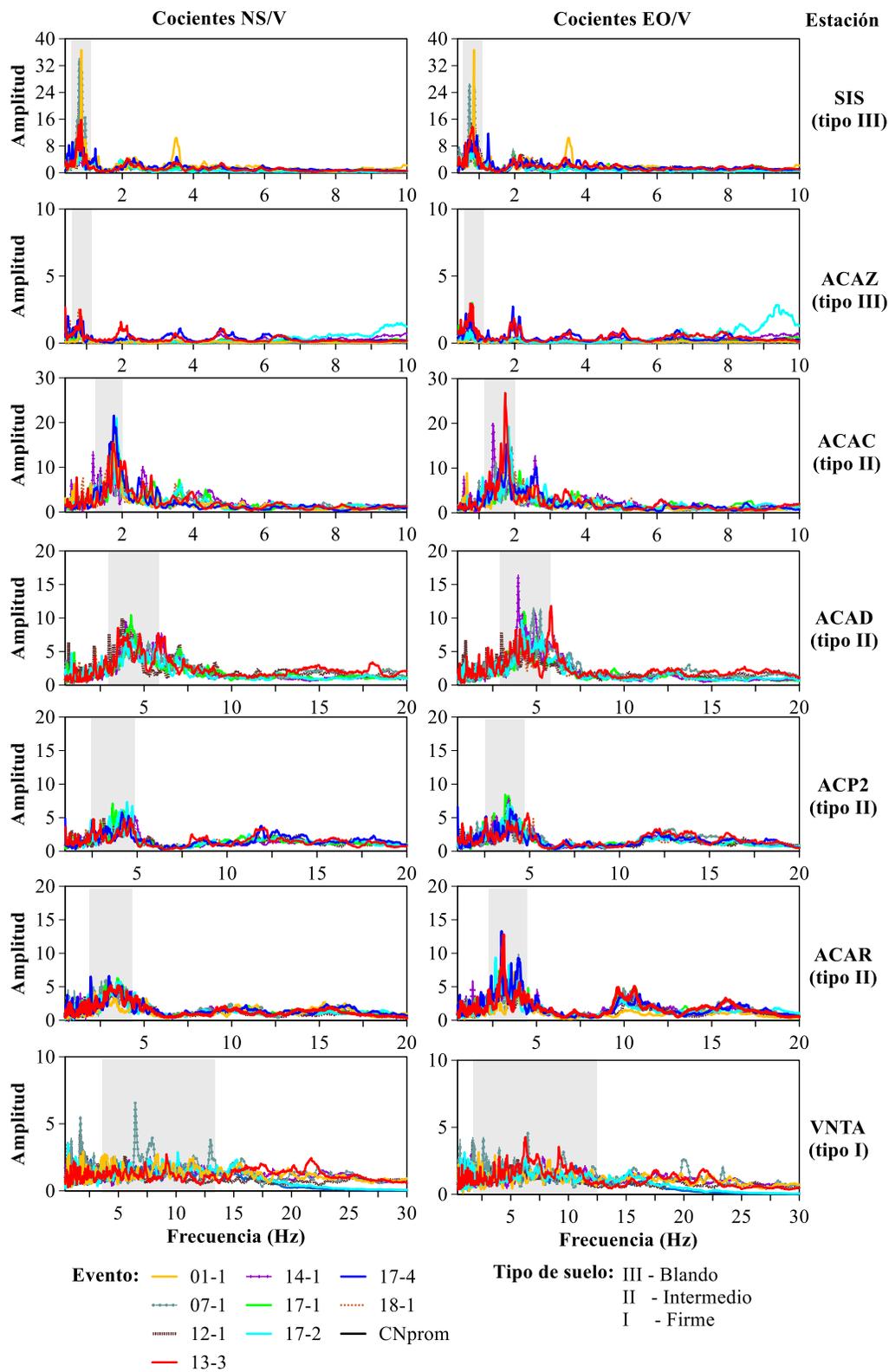


Figura 84. Comparación de los CNff entre los componentes NS/V y EO/V calculados con la fase final de los registros de las estaciones SIS, ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA. Las franjas en gris representan los intervalos en los que se identifican las frecuencias dominantes de cada sitio

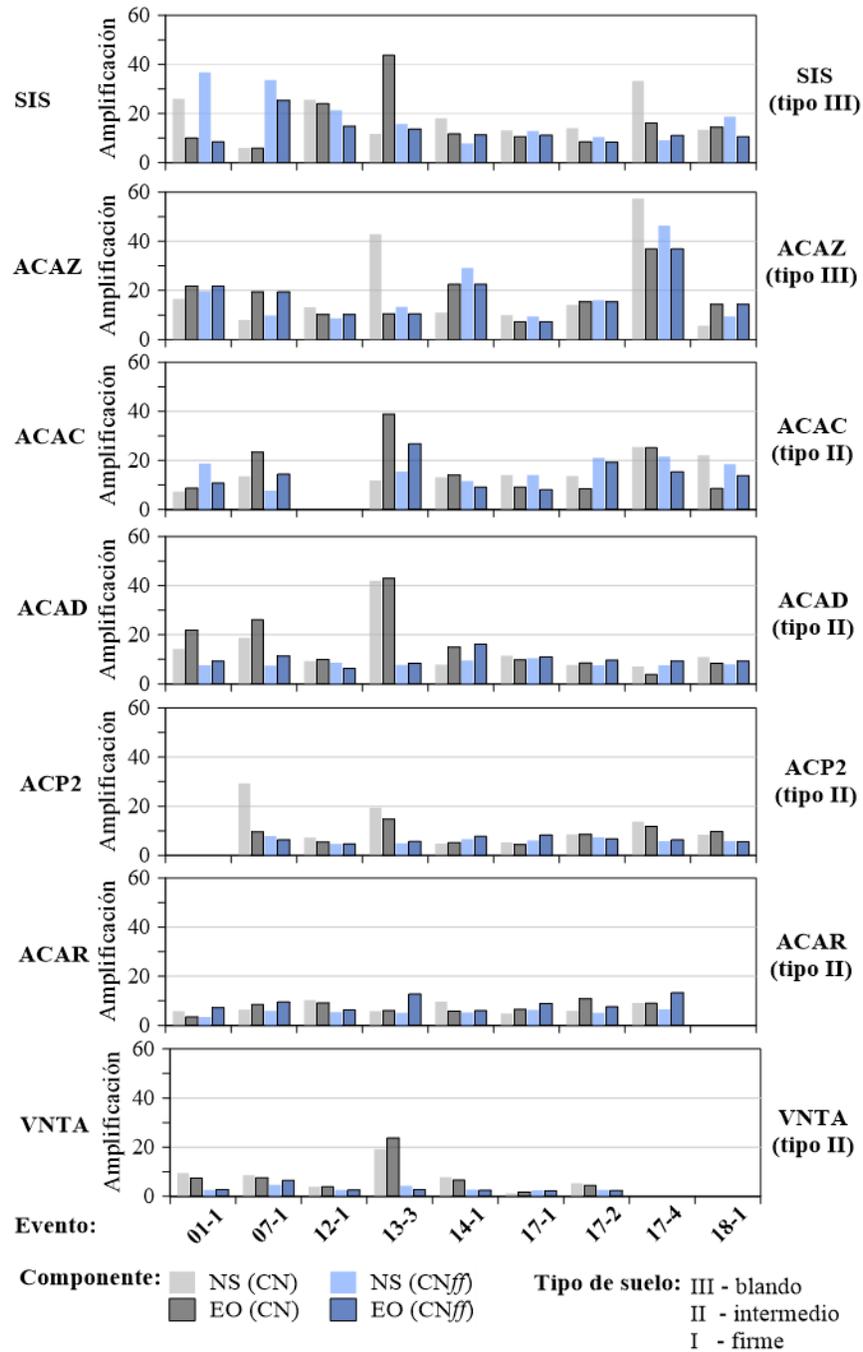


Figura 85. Comparativa de las Amp_{max} identificadas en los CN estimados con los registros completos y en los CNff estimados con la fase final de los registros, asociados a las frecuencias dominantes de las estaciones de campo SIS, ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR Y VNTA

Amplificaciones y atenuaciones relativas de la estación SIS

La comparación de las amplificaciones o atenuaciones son deducidas a partir de las FT entre la estación SIS y las estaciones del II-UNAM, en el intervalo de frecuencias comprendido entre 0.60 y 1.0 Hz, dado que es de interés mostrar las diferencias que ocurren en la banda de amplitudes asociadas a la frecuencia dominante de la estación SIS.

En la figura 86 se muestran las FT de Fourier de la estación SIS con respecto a las estaciones ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA, mediante un procesamiento de los registros completos. Las FT de Fourier en los componentes NS y EO se muestran con mayor detalle en las figuras C.15 a C.21 en el Apéndice C.

En las FT con respecto a las estaciones ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA se observa que las amplitudes de Fourier de la estación SIS se amplifican entre 10 y 40 veces, mientras que en la estación ACAZ las amplificaciones asociadas a la banda de frecuencias dominante son inferiores que 20 veces.

Por otro lado, en la figura 86 también en las FT se presentan atenuaciones del movimiento asociadas a las frecuencias dominantes, distinguidas por tener magnitudes menores que la unidad. A partir de las FT calculadas se observa que la atenuación de las amplitudes de Fourier de la estación SIS con respecto a las seis estaciones del II-UNAM aparece entre 1.2 y 1.8 Hz, y en las FT entre las estaciones SIS/ACAZ, SIS/ACAC y SIS/ACAR las atenuaciones predominan hasta los 2.8 Hz ilustrados.

En la tabla 28 se muestran los valores de las $Amp_{m\acute{a}x}$ identificados de las FT de la figura 86 las cuales están asociadas a la banda de frecuencias dominante de la estación SIS.

En las FT entre las estaciones SIS/ACAZ (suelo blando/suelo blando) las $Amp_{m\acute{a}x}$ asociadas a los primeros 10 Hz son menores que 12 veces. En el componente NS la amplificación más destacable ocurre con el evento 17-2 y para el componente EO sobresalen las crestas de los eventos 01-1 y 17-4. En los cocientes espectrales se observan también algunas crestas adicionales que están distribuidas entre 0.40 y 0.60 Hz, las cuales difieren con respecto a la banda de frecuencias dominantes del sitio (0.63-0.89 Hz).

Tabla 28. Comparación de las $Amp_{m\acute{a}x}$ relativas asociadas a la frecuencia dominante de la estación SIS, calculados en los componentes NS y EO

Evento	SIS/ACAZ		SIS/ACAC		SIS/ACAD		SIS/ACP2		SIS/ACAR		SIS/VNTA	
	NS	EO										
01-1	4.8	11.5	57.0	31.7	80.3	17.0	n.d.	n.d.	24.2	9.0	37.8	15.0
07-1	5.9	8.4	17.9	9.4	14.6	18.2	23.7	15.9	28.5	14.5	32.5	64.3
12-1	5.2	4.5	n.d.	n.d.	21.3	26.8	45.0	44.0	17.1	20.4	28.4	33.2
13-3	2.0	2.9	22.3	35.4	20.6	43.1	49.0	57.7	16.0	36.2	8.7	54.6
14-1	3.2	8.2	25.4	8.5	13.8	26.7	33.9	30.3	16.8	11.7	15.6	32.6
17-1	6.1	3.6	25.6	36.1	43.8	31.3	46.0	24.8	45.9	20.4	27.3	44.3
17-2	12.0	4.3	28.5	26.4	39.4	38.3	37.5	25.9	37.0	19.4	27.3	27.3
17-4	3.9	11.2	9.7	38.3	12.6	24.2	45.3	23.3	19.0	21.6	n.d.	n.d.
18-1	8.0	4.7	15.6	20.9	18.6	31.2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Promedio	4.8	4.7	16.1	14.0	21.3	15.5	23.0	15.9	17.5	13.0	17.8	28.2

n.d.-Dato no disponible porque no se tienen los registros.

En las FT entre las estaciones SIS y ACAC (suelo blando/suelo intermedio) las mayores amplificaciones se concentran entre 0.2 y 1.2 Hz, y en frecuencias mayores a 1.2 Hz las amplificaciones son menores de 10 veces. Las mayores amplificaciones ocurren en el evento 01-1, en el componente NS, con factor de 57 veces, y de 30 veces el componente EO para los eventos 13-3, 17-1 y 17-4. Para el resto de los eventos, las amplificaciones resultan en promedio en 16 y 14 veces en los componentes NS y EO, respectivamente.

Las mayores amplificaciones con respecto a la estación ACAD (suelo intermedio) ocurren en el evento 01-1, siendo de hasta 80 veces en el componente NS. En el componente EO, las máximas amplificaciones ocurren en los eventos 13-3, y 17-2, y son de 43 y 38 veces, respectivamente.

La respuesta del SIS se amplifica con respecto a la estación ACP2 (suelo intermedio) entre 23 y 46 veces en el componente NS, y entre 15 a 57 veces en el componente EO, teniendo los eventos 07-1, 13-3, 17-1 y 17-4 las mayores amplificaciones.

En la banda de frecuencias dominante del sitio SIS comprendida entre 0.63 y 0.89 Hz el terreno de la estación SIS experimenta una mayor respuesta con respecto a las estaciones de Acapulco, estimándose las mayores amplificaciones con las FT con respecto a las estaciones ACAC, ACAD y VNTA, en cambio, el movimiento asociado a la frecuencia dominante de la estación SIS es semejante al de la estación ACAZ, donde se obtienen amplificaciones que se aproximan a la unidad.

En la figura 88 se muestran las FT_{ff} de Fourier de la estación SIS con respecto a las estaciones ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA, y son calculados con la fase final de los registros sísmicos. Las FT_{ff} se muestran para los componentes NS y EO, donde con una franja de color gris tenue se destaca la banda de frecuencias dominante del sitio SIS obtenidas mediante los CN referidos en la sección 4.2.1.

En las FT_{ff} , que se ilustran en las figuras 87, se observa que el movimiento asociado a la frecuencia dominante del sitio SIS se amplifica con respecto al de las estaciones ACAZ, ACAC, ACAD, ACP2, ACAR y VNTA, en estas las amplificaciones son menores que 3, 8, 36, 30, 30 y 15 veces, respectivamente.

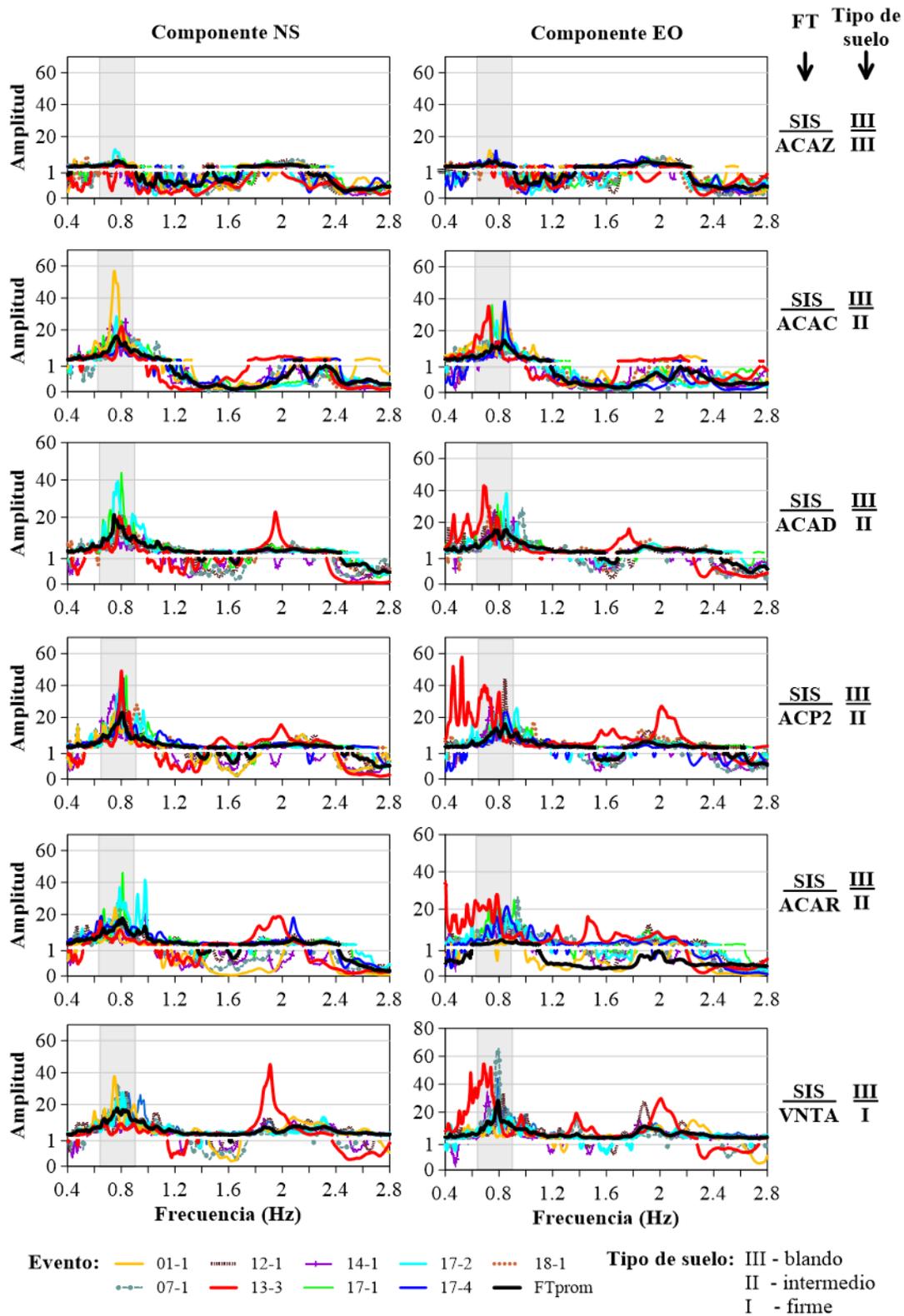


Figura 86. Comparación de las FT de Fourier de la estación SIS con respecto las estaciones de Acapulco calculados con los registros completos en los componentes NS y EO

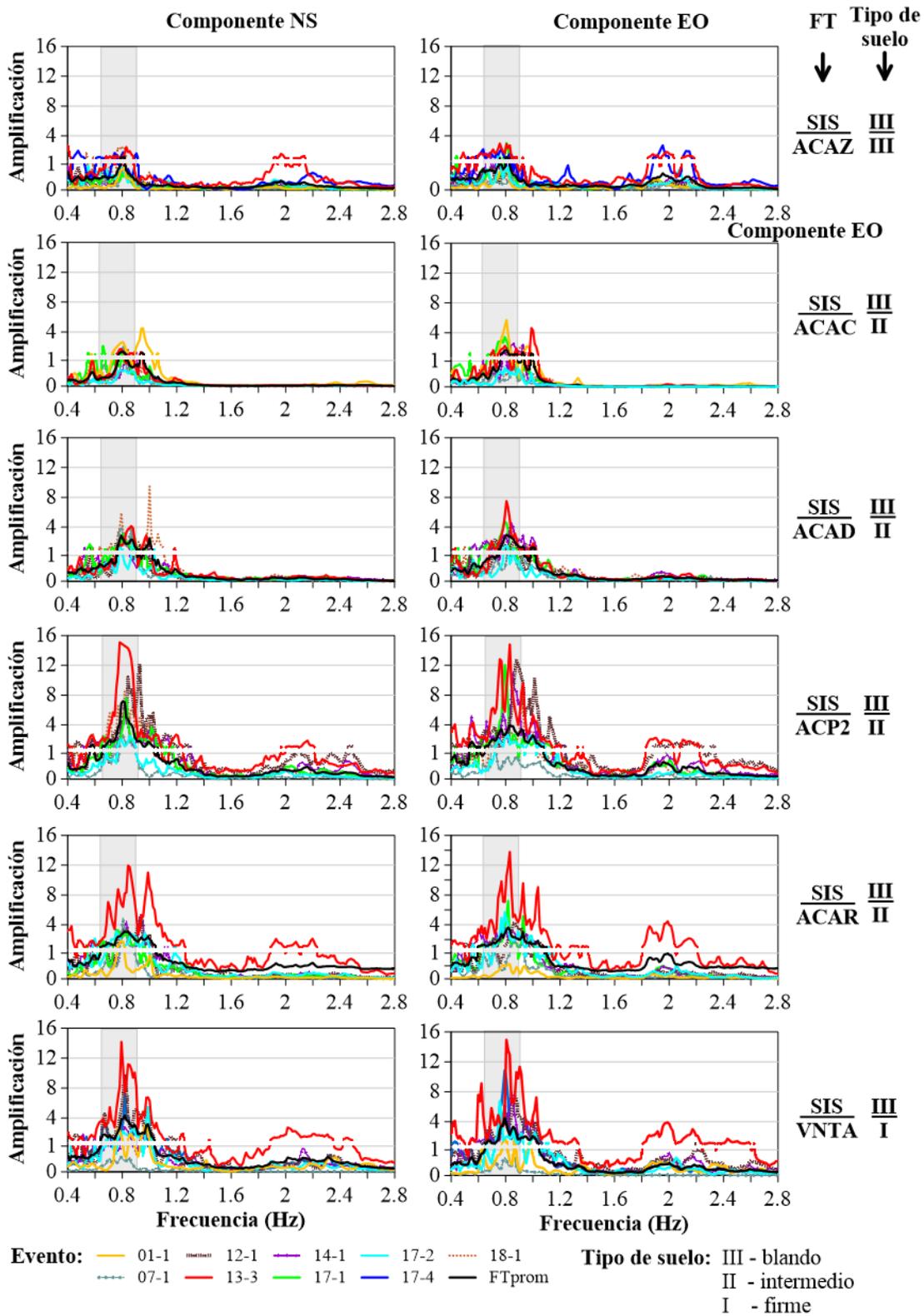


Figura 87. Comparación de las FT_{ff} de Fourier de la estación SIS con respecto las estaciones de Acapulco calculados con la fase final de los registros en los componentes NS y EO

Las amplificaciones identificadas en las FT_{ff} , asociadas a la frecuencia dominante de la estación SIS, son menores con respecto a las amplificaciones identificadas con las FT de registros completos, esto se explica en gran medida porque las amplitudes de Fourier en el primer caso son de menor magnitud.

Con los registros completos hay otras amplificaciones asociadas a frecuencias menores que 0.40 Hz, en contraste con los FT_{ff} donde se tienen atenuaciones con respecto a las estaciones ACAD, ACP2 y ACAR.

Se observa que entre 1.0 a 1.2 Hz las FT_{ff} presentan otras amplificaciones que difieren de la banda de frecuencias dominante de la estación SIS. En los eventos 12-1, 13-3 y 14-1 las amplificaciones tienen una magnitud del orden de 4, 10, 5 y 8 veces, que contrastan con las FT_{ff} calculadas con respecto a las estaciones ACAC, ACAD, ACP2, ACR y VNNTA.

Los valores de las mayores amplificaciones o atenuaciones asociados a la frecuencia dominante del sitio SIS se muestran en la tabla 29. Por lo general, en las FT calculadas con respecto a las estaciones ACAZ, ACAC, ACP2 y VNNTA se estiman atenuaciones, que son más evidentes con los eventos 01-1, 07-1, 17-2 y 18-1.

Tabla 29. Comparación de las amplificaciones y atenuación obtenidas de las FT_{ff} de Fourier de la estación SIS con respecto las estaciones del II-UNAM, calculados con la fase final de los registros en los componentes NS y EO

Evento	ACAZ		ACAC		ACAD		ACP2		ACAR		VNNTA	
	NS	EO										
01-1	0.9	0.8	2.6	5.7	32.4	23.5	n.d.	n.d.	1.9	0.6	2.7	1.7
07-1	0.7	0.5	1.9	1.0	3.8	1.2	2.6	0.9	4.7	1.7	0.6	0.7
12-1	1.5	1.1	n.d.	n.d.	2.5	1.9	10.5	28.4	3.5	4.2	9.8	7.4
13-3	2.5	3.0	1.7	2.3	4.2	7.5	30.2	14.8	11.9	13.8	14.2	15.0
14-1	0.9	1.4	1.3	2.5	2.8	4.5	6.3	10.9	4.3	3.6	2.8	7.9
17-1	0.6	3.0	1.1	3.5	3.0	4.7	7.6	12.1	3.3	7.2	7.5	10.9
17-2	0.9	1.4	0.6	0.7	1.9	1.5	2.5	2.7	3.1	5.7	2.5	6.8
17-4	1.8	2.2	8.0	7.2	15.1	36.1	13.1	24.3	19.1	30.8	n.d.	n.d.
18-1	2.6	0.7	1.6	2.0	5.9	3.9	8.5	4.2	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Promedio	1.2	1.1	1.4	1.7	7.6	6.4	6.8	4.1	5.2	5.3	4.4	4.4

n.d.-Dato no disponible porque no se tienen los registros.

Finalmente, en la figura 88 se comparan las amplificaciones y atenuaciones asociadas a la frecuencia dominante de la estación SIS con respecto a las estaciones del II-UNA indicadas en las tablas 28 y 29 para los componentes NS y EO.

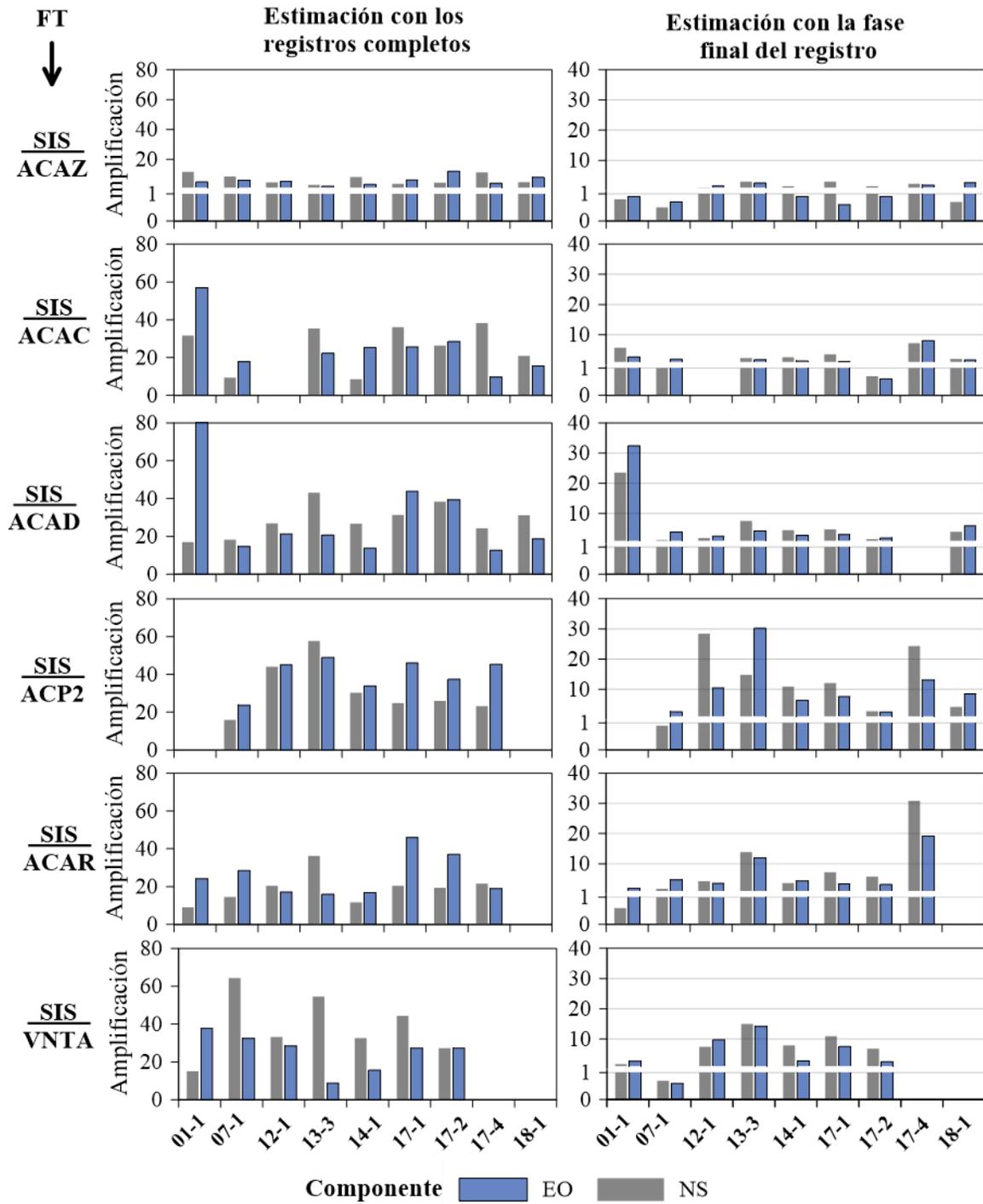


Figura 88. Comparativa las amplificaciones y atenuaciones relativas del movimiento del terreno del sitio SIS, con respecto al movimiento en las estaciones del II-UNAM, identificados de las FT de amplitudes de Fourier en los componentes NS y EO

Una observación importante es que en las FT_{ff} pueden producirse singularidades en frecuencias cercanas a la frecuencia dominante del sitio obteniéndose amplificaciones que superan a las mayores amplificaciones que se obtienen con las FT de los registros completos.

Advirtiendo que los factores de amplificación estimados con los registros completos son resultado de las amplitudes de Fourier que tienen una magnitud mayor de la unidad (figuras 13 a 15 y 67 a 72), en cambio las amplificaciones identificadas con las FT_{ff} pueden estar relacionadas a amplitudes de Fourier muy pequeñas (< 0.01 cm/s), esto se detalla en las figuras C1 a C3, del Apéndice C, donde se obtienen amplificaciones mayores de 10 veces, las cuales no están relacionadas con la frecuencia dominante del terreno.

Capítulo 5. Comentarios y conclusiones

Se estudió la evolución de los efectos de interacción suelo-estructura (ISE) del edificio instrumentado SIS ubicado en un suelo blando en la ciudad de Acapulco. La estimación de los efectos de ISE es con base en los 27 eventos sísmicos más representativos que fueron capturados desde el año 2001 hasta la actualidad. De estos eventos, 26 son categorizados de baja intensidad, mientras que uno fue de moderada intensidad (evento 13-3). Durante el análisis se abordó la variación de los valores de las frecuencias y rigideces de ISE en los componentes L, T y torsión del edificio. Este análisis se llevó a cabo utilizando el método simplificado propuesto por Luco (1980).

Es importante destacar que los últimos 3 eventos más recientes de baja intensidad reflejan el estado del edificio después del sismo de alta intensidad de 07 de septiembre de 2021 que no fue registrado por la red del edificio.

En un análisis previo, se abordaron los efectos de ISE mediante el método de Luco en términos de frecuencias. Se compararon las frecuencias de ISE de los eventos sísmicos 01-1, 02-1, 02-2 y 03-1 calculada a partir de las frecuencias del sistema obtenidos por otros autores (Taborda, 2003; García-Illescas, 2023) utilizando métodos más sofisticados, como la minimización modal (MM) y el método N4SID. Los resultados obtenidos con ambas estimaciones fueron consistentes entre sí, lo que brinda confiabilidad para emplear los valores de las frecuencias del sistema en conjunto con el análisis espectral para el cálculo de los efectos de ISE. De acuerdo con lo anterior se utilizaron los valores de las frecuencias del sistema obtenidas con el método N4SID para el cálculo de los efectos de ISE para el resto los demás eventos sísmicos de estudio.

En el análisis de las frecuencias del sistema suelo-estructura, se destacan las reducciones en los componentes L, T y torsión, las cuales son atribuidas principalmente al deterioro estructural, inherente de los materiales, al reacomodo de los elementos estructurales y no estructurales (Murià-Vila *et al.*, 2019), así mismo, a los efectos ocasionados por los sismos más intensos, siendo más notables en el evento 13-3 de moderada intensidad y el sismo de alta intensidad que no fue capturado por la red de instrumentación que tuvo lugar el 07 de septiembre de 2021 de M 7.1.

En contraste, se plantea una aparente recuperación parcial de la frecuencia del sistema en los eventos posteriores al evento 13-3, que puede ser debida a las reparaciones menores realizadas que involucran

el sellado de grietas superficiales presentes en los elementos estructurales y no estructurales (Murià-Vila *et al.*, 2001). Además, se considera que esta recuperación podría estar influenciada por los cambios climáticos a los que está expuesto el edificio, como el aumento de la temperatura (cercana a 40 °C), la saturación de suelo circundante de la cimentación, y los ciclos de humectación-secado de los elementos de concreto durante las épocas de precipitación (John F. Clinton *et al.*, 2006). Es importante destacar que, hasta la fecha no se ha implementado ningún sistema de refuerzo o de reparación mayor en los elementos estructurales.

El análisis de los efectos de ISE en los diferentes componentes del edificio se llevó a cabo considerando la variación de la frecuencia del sistema suelo-estructura en función de las amplitudes de aceleración de un evento sísmico específico (Murià-Vila *et al.*, 2001). Con el objetivo de obtener una mejor comprensión de los efectos de ISE durante las fases intensas y finales de un evento dado, se procedió a estimar estos efectos mediante el uso de ventanas temporales. En este contexto, se examinó a detalle los efectos de ISE para un conjunto de eventos seleccionados, incluyendo los siguientes: 01-1, 01-3, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4, 18-1, 20-1 y 22-2.

Los valores de la frecuencia $\bar{f}_{1,N4SID}$ reportados en el último evento 22-2 son significativamente menores en 22, 20 y 27 % en los componentes L, T y torsión, respectivamente, en comparación con el evento de referencia. Estas reducciones evidencian un daño acumulado en los elementos estructurales y no estructurales. Suponiendo que la masa de la estructura no ha cambiado de manera significativa, se puede inferir una degradación de las rigideces de la estructura (K_1). En relación con las rigideces K_1 obtenidas con el método de Luco en el evento 22-2, se observó una relación proporcional con las reducciones del 39, 36 y 47 % en los componentes L, T y torsión, respectivamente, en comparación con el evento de referencia 01-3.

En otro orden de ideas, en el lapso entre los eventos 01-1 al 20-1, se observó un ligero incremento de los valores de la frecuencia de cabeceo de la base (f_c) de los componentes L y T, siendo más perceptible en este último. Tras el sismo de alta intensidad ocurrido el 07 de septiembre de 2021, se evidencia una reducción de estos parámetros. Al término del periodo analizado, el evento 22-2, los valores de la frecuencia f_c muestran diferencias de 5 y 6 % en los componentes L y T, respectivamente, en comparación con el evento de referencia 01-3, lo que indica que no hay un cambio significativo de las frecuencias de cabeceo.

El aparente incremento de la frecuencia f_c hasta el evento 20-1 está relacionado con el incremento de la rigidez de cabeceo de la base K_c . Este parámetro es dependiente de la geometría del cajón y de los pilotes y su distribución, además de las propiedades dinámicas del suelo de desplante. Dado que es más probable que las condiciones del suelo se hayan modificado en lugar de la cimentación y su el estado de la superficie de contacto, es válido suponer que el incremento de K_c está vinculado con un posible cambio de las propiedades dinámicas del suelo debido al reacomodo de los agregados que componen el suelo de desplante.

Tomando en consideración que el efecto del cabeceo de la base se manifiesta en más de un valor para las frecuencias f_c en los componentes L y T, es ampliamente conocido que este efecto se manifiesta en múltiples intervalos de frecuencias (Arabella, 2001; Taborda, 2003). Los valores de la frecuencia f_c obtenidos con el método de Luco variaron entre 1.9 y 2.1 Hz para el componente L, y entre 2.0 y 2.3 Hz para el componente T. Debido a que se trata de la implementación de un método simplificado, estos valores están relacionados a las máximas amplitudes espectrales o bien, al primer modo de vibrar del edificio.

Es relevante destacar la adecuada consistencia en los valores de las frecuencias f_c empleando los tramos de las fases finales de los registros o bien utilizando ventanas. En cambio, en el análisis con los registros completos o con la fase intensa de los sismos, se obtienen reducciones considerables en los eventos más intensos, como es el caso del evento 13-3 de moderada intensidad. En este evento en particular, se obtuvieron las reducciones más significativas de 14.9 y 15.8 % (respecto al evento de referencia 01-3), seguidas posteriormente por una recuperación total en la fase final de este sismo de moderada intensidad.

En relación con la variación de la frecuencia de traslación de la base (f_h), los valores obtenidos exhiben un intervalo entre 3.4 y 5.7 Hz en el componente L, y entre 2.2 y 5.0 Hz en el componente T. Esta notable fluctuación entre los eventos analizados sugiere la ausencia de un valor único para esta frecuencia. En el análisis de la fase intensa y de la fase final de cada evento se establece una aparente reducción de la frecuencia f_h en ambos componentes posterior al evento 13-3. Sin embargo, este cambio no es tan evidente y claro. Para aclarar esta situación, con el análisis por ventanas temporales se logró definir de manera más precisa la reducción de la frecuencia f_h , así como de la rigidez K_h . Dichas reducciones se basaron en la distribución de los valores por ventanas y sus respectivos promedios de los eventos analizados en la sección 3.3.2.

Los cambios de los efectos de ISE en términos de frecuencias y rigideces son evidentes en la contribución del movimiento de cabeceo ($H\Phi_r/\bar{X}_{tot}^{az}$) y de traslación en la base (X_b/\bar{X}_{tot}^{az}). En el evento de referencia 01-3, la suma de las contribuciones de traslación y cabeceo de la base a la respuesta total en la azotea eran en promedio del 31 y 21 %, en los componentes L y T, respectivamente. Sin embargo, en el evento más reciente 22-2, estos porcentajes de participación son de 22 y 13 % respectivamente. Dicho estado representa las reducciones de 30 y 38 % de la contribución de los efectos de ISE, reducciones debidas en mayor proporción al cabeceo de la base. En cuanto los efectos de ISE de torsión no se distinguió un cambio significativo en la contribución del movimiento de torsión ($\Phi_{rV}/\bar{\Phi}_{tot}^{az}$) de la base a la respuesta total en la azotea.

De igual manera, es posible inferir un cambio de los efectos de ISE al analizar la relación entre frecuencia de la estructura y del sistema (f_1/\bar{f}_1) en los distintos componentes del edificio. Con base en los valores obtenidos en el análisis empleando los tramos de las fases finales referidos en la sección 3.2.2, en el evento más reciente 22-2, los valores de f_1/\bar{f}_1 son de 1.14, 1.08 y 1.01 en los componentes L, T y de torsión, respectivamente. Estos valores son menores en 6.6, 4.7 y 0.7 %, con respecto a los valores de referencia 1.22, 1.14 y 1.02.

En un caso específico, se examinó la variación de los efectos de ISE durante el evento 13-3 de moderada intensidad. Al evaluar los cocientes f_1/\bar{f}_1 obtenidos por ventanas, se identificó un incremento de los efectos de ISE durante la fase intensa de este evento. En los componentes L y T, se observaron valores promedio de hasta 1.27 y 1.19, respectivamente, lo que sugiere la posibilidad de un comportamiento no lineal debido a la interacción suelo-estructura. Este comportamiento está vinculado con las notables reducciones de las frecuencias de cabeceo y de traslación de la base durante los instantes en donde ocurren las máximas amplitudes de movimiento.

Este posible comportamiento no lineal no logró observar en el componente de torsión debido al inherente efecto del acoplamiento entre componentes implicado en el cálculo espectral. Es importante mencionar que este efecto de acoplamiento suele ser una limitante para la estimación de los efectos de ISE en casos particulares en el análisis por ventanas. Este acoplamiento entre componentes produce la fluctuación de las amplitudes espectrales asociadas a las frecuencias dominantes del sistema.

Por otro lado, al comparar los valores de las rigideces de ISE experimentales obtenidos con el método de Luco con respecto a valores analíticos, se establecen los siguientes aspectos más relevantes:

- Tanto el cajón de cimentación como el conjunto de pilotes y su efecto de grupo contribuyen a la rigidez de cabeceo de la base de los componentes L y T analizados.
- En la comparación de las rigideces de traslación de la base se obtuvieron diferencias significativas, ya sea con las rigideces analíticas obtenidas con MDOC-2017 o con el programa Dyna5, las cuales son más de doble que los valores experimentales, aun considerando el efecto de grupo de los pilotes. Si bien, existe la incertidumbre de que la rigidez de traslación de la base corresponda solo a la contribución de los pilotes o del cajón de cimentación, o bien, a la contribución parcial de este último.
- Las rigideces experimentales varían en función de los cambios que sufren las frecuencias del sistema, con una sensible fluctuación ocasionada por la magnitud de las amplitudes de movimiento. Aspectos que no son tomados en cuenta directamente en el cálculo de las rigideces analíticas mediante el MDOC-2017 o con el programa Dyna5.

Por otro lado, se abordó el análisis espectral empleando los registros capturados de los 27 eventos sísmicos en la estación SIS. Se realizó la estimación del valor de la frecuencia dominante del sitio utilizando cocientes de Nakamura, tanto con los espectros de Fourier de los registros completos como con el tramo de la fase final de estos. El análisis se abordó en los dos componentes horizontales por separado para considerar la influencia que tienen la direccionalidad de cada evento sísmico. En este estudio en particular, para este tipo de suelo blando y mediante el empleo de los cocientes de Nakamura utilizando los tramos finales de los eventos sísmicos se obtuvieron los valores promedio de la frecuencia dominante de 0.81 y 0.82 Hz (1.23 y 1.22 s) en los componentes L y T, respectivamente. Dichos valores se suponen un comportamiento lineal del suelo, ya que se obtienen con pequeñas amplitudes de movimiento. Para el estudio del posible comportamiento no lineal del sitio estos valores son tomado como referencia.

En el análisis con los registros completos se observó una moderada fluctuación de los valores de la frecuencia dominante del suelo, que principalmente es ocasionada por la diferencia de intensidades de cada evento y entre los componentes horizontales.

Para explorar el posible comportamiento no lineal del suelo del sitio SIS, se centra en el evento 13-3 de moderada intensidad. El análisis se fundamenta en la variación de la frecuencia dominante del sitio. Durante la fase intensa de este evento, se identifica en el componente T un valor de la frecuencia dominante de 0.65 Hz (1.54 s), que representa una reducción de ~20 % con respecto al valor de 0.81 Hz que describe el comportamiento lineal del suelo. Por otro lado, en el componente L el valor de la frecuencia del suelo se mantiene cercano a este último valor mencionado. Es importante señalar que la reducción de la frecuencia dominante del suelo observada en el componente T mediante el análisis con cocientes de Nakamura también se corrobora en el análisis con espectros de respuesta de desplazamiento. En este análisis, se obtuvo un periodo de 1.57 s (0.64 Hz) muy similar, además de estar asociado al incremento de la respuesta para un sistema elástico simplificado de un grado de libertad.

Finalmente, en la comparación espectral de la estación SIS con respecto a las estaciones del instituto de ingeniería (II-UNAM) ubicadas en la bahía de Acapulco, como ACAZ, ACAC, ACAD, ACAR, ACP2 y VNTA, se concluye que debido a ser un suelo tipo blando, se obtiene un periodo dominante mayor. Esto sugiere un posible riesgo y vulnerabilidad sísmica de moderada a alta. Esta característica

se refleja en las mayores amplitudes espectrales experimentadas en el sitio SIS en algunos de los eventos analizados, así como en las mayores respuestas de aceleración y desplazamientos obtenidas en el análisis del evento 13-3 de moderada intensidad con ERA y ERD. Además, esta particularidad se manifiesta en las amplificaciones relativas obtenidas en las FT empleando los registros completos. De esta última comparación se deducen amplificaciones relativas promedio de las amplitudes espectrales asociadas a la frecuencia del sitio SIS de hasta 5, 16, 23, 18 y 28 veces con respecto a las estaciones ACAZ, ACAC, ACAD, ACAR, ACP2 y VNTA, respectivamente.

Futuros trabajos

Este trabajo describe los cambios en los efectos de la interacción suelo-estructura (ISE) en relación con las amplitudes de aceleración generadas por sismos. Partiendo del supuesto de que el movimiento y la participación de las masas de la estructura corresponden al primer modo de vibración, se plantea la relevancia de abordar el análisis de los efectos de ISE considerando posibles variaciones en las formas modales. Estas variaciones podrían surgir debido a cambios evidentes en las propiedades dinámicas del edificio o incluso a las formas modales que describen el movimiento en respuesta a pequeños esfuerzos, que podrían caracterizar los efectos de ISE durante pruebas de vibración ambiental.

Se subraya la importancia de monitorear los efectos del sitio donde está ubicado el edificio SIS, especialmente porque se encuentra en una de las zonas más vulnerables de las costas de Acapulco. Explorar más a fondo las variaciones en las propiedades dinámicas de estos tipos de suelos resulta de particular interés. Este análisis busca comprender mejor cómo varía la frecuencia dominante del sitio durante los eventos sísmicos más intensos, así como cómo cambia en función de la dirección del movimiento

Para lograr esto, se sugiere implementar instrumentación complementaria e independiente en una estación de pozo. Esta instrumentación permitirá realizar mediciones de aceleración, presiones, niveles de agua, entre otros parámetros relevantes. Con esta estrategia, se podría abordar y superar los problemas que eventualmente puedan surgir en la red principal del edificio.

Apéndice A. Análisis espectral de los registros

Para realizar un análisis en el dominio de la frecuencia se estima la transformada rápida de Fourier (Bendat y Piersol, 1989) del registro de aceleración correspondiente a un punto de la estructura o el terreno. Dado un registro de aceleraciones $\ddot{x}(t)$, su transformada de Fourier está dada por la expresión:

$$\ddot{X}(f) = \int_0^T \ddot{x}(t) e^{-i2\pi f \cdot t} dt \quad \text{Ec. 1A}$$

La transformada corresponde a una función compleja, si se le aplica la identidad de Euler, la ec. 1A se reescribe de la siguiente manera

$$\ddot{X}(f) = \int_0^T \ddot{x}(t) \cos(2\pi \cdot t) dt - i \int_0^T \ddot{x}(t) \text{sen}(2\pi \cdot t) dt \quad \text{Ec. 2A}$$

En donde T es la duración total del registro de aceleraciones de un evento dado. La transformada de los registros de aceleración se compone de una parte real y la parte imaginaria y la amplitud resultante se calcula como

$$|\ddot{X}(f)| = \sqrt{(\ddot{X}_R(f))^2 + (\ddot{X}_i(f))^2} \quad \text{Ec. 3A}$$

Donde

$\ddot{X}_R(f)$ parte real de la transformada de Fourier de la aceleración absoluta

$\ddot{X}_i(f)$ parte imaginaria de la transformada de Fourier de la aceleración absoluta

La conversión del dominio antes establecida es susceptible al ruido instrumental que contienen las señales de origen, por lo cual es necesario aplicar una función de suavizado. Las ordenadas espectrales estimados con los registros completos se suavizan con promedios cuadráticos móviles, de tal forma que las amplitudes suavizadas se obtienen de:

$$[\ddot{X}_s(f)]^2 = \frac{1}{N} \sum_{f_1}^{f_2} \ddot{X}_s(f)^2 \quad \text{Ec. 4A}$$

Donde los límites de la sumatoria están determinados por

$$f_1 = f \cdot 2^{\left(-\frac{1}{NS}\right)} \quad \text{Ec. 5A}$$

$$f_2 = f \cdot 2^{\left(\frac{1}{NS}\right)} \quad \text{Ec. 6A}$$

Donde

N número de valores de amplitudes de Fourier comprendidos entre las frecuencias f_1 y f_2
 NS número o factor de suavizado

Cálculo de los espectros de Fourier por ventanas

La estimación de las propiedades de ISE empleando el método de Luco por ventanas consiste en obtener las amplitudes del movimiento en los espectros de Fourier calculados por intervalos de tiempo extraídos del registro de aceleraciones de un evento sísmico dado. El intervalo debe de tener una duración idónea el cual permita representar adecuadamente el contenido frecuencial, un caso con el que se obtienen buenos resultados (Murià-Vila *et al.*, 2001) es considerar intervalos de tiempo de 20 s, haciendo traslapos entre ventanas consecutivas de 10 s. De la ec. 2A se ajustan los límites superior e inferior que corresponden el tiempo inicial y final para el cálculo de una ventana:

$$\ddot{X}(f) = \int_{t_1}^{t_2} \ddot{x}(t) \cos(2\pi \cdot t) dt - i \int_{t_1}^{t_2} \ddot{x}(t) \sen(2\pi \cdot t) dt \quad \text{Ec. 7A}$$

Donde

t_1 y t_2 son el límite inferior y superior, respectivamente, que acotan el intervalo de tiempo de una ventana

Los espectros de Fourier calculados por ventanas consideran un suavizado de las ordenadas espectrales mediante un promedio móvil (Trifunac, 1972). El promedio está dado por la ec. 8A, donde el subíndice i indica el i -ésimo término de la amplitud de Fourier.

$$\ddot{X}_s(f) = \frac{\ddot{X}_{i-1}(f)}{4} + \frac{\ddot{X}_i(f)}{2} + \frac{\ddot{X}_{i+1}(f)}{4} \quad \text{Ec. 8A}$$

Es importante mencionar que, antes de llevar a cabo el cálculo de la transformada de Fourier, se aplica una función senoidal conocida como “*taper*”, a los valores comprendidos en los extremos del intervalo de los registros que corresponden al 5 % del número total de datos que tiene del intervalo o ventana con el fin de minimizar los efectos de borde debidos a la extracción de una ventana, así como para mejorar sus propiedades en el dominio de la frecuencia. La función que se emplea es:

$$\ddot{X}_i(t)_{tp} = \sen\left(\frac{\pi n}{2N_{tp} - 1}\right) \cdot \ddot{X}_i(t) \quad \text{Ec. 9A}$$

$$N_{tp} = 0.05 \cdot N_{tot} \quad Ec. 10A$$

Donde

$\ddot{X}_i(t)_{tp}$ i-ésima amplitud de aceleración en el dominio del tiempo

$\ddot{X}_i(t)$ i-ésima amplitud de aceleración en el dominio del tiempo

N_{tot} es el número total de datos comprendidos en el intervalo de tiempo

i representa la posición i-ésima del registro de aceleración hasta N_p

A.1 Identificación de las frecuencias del sistema con el método AE con los registros completos

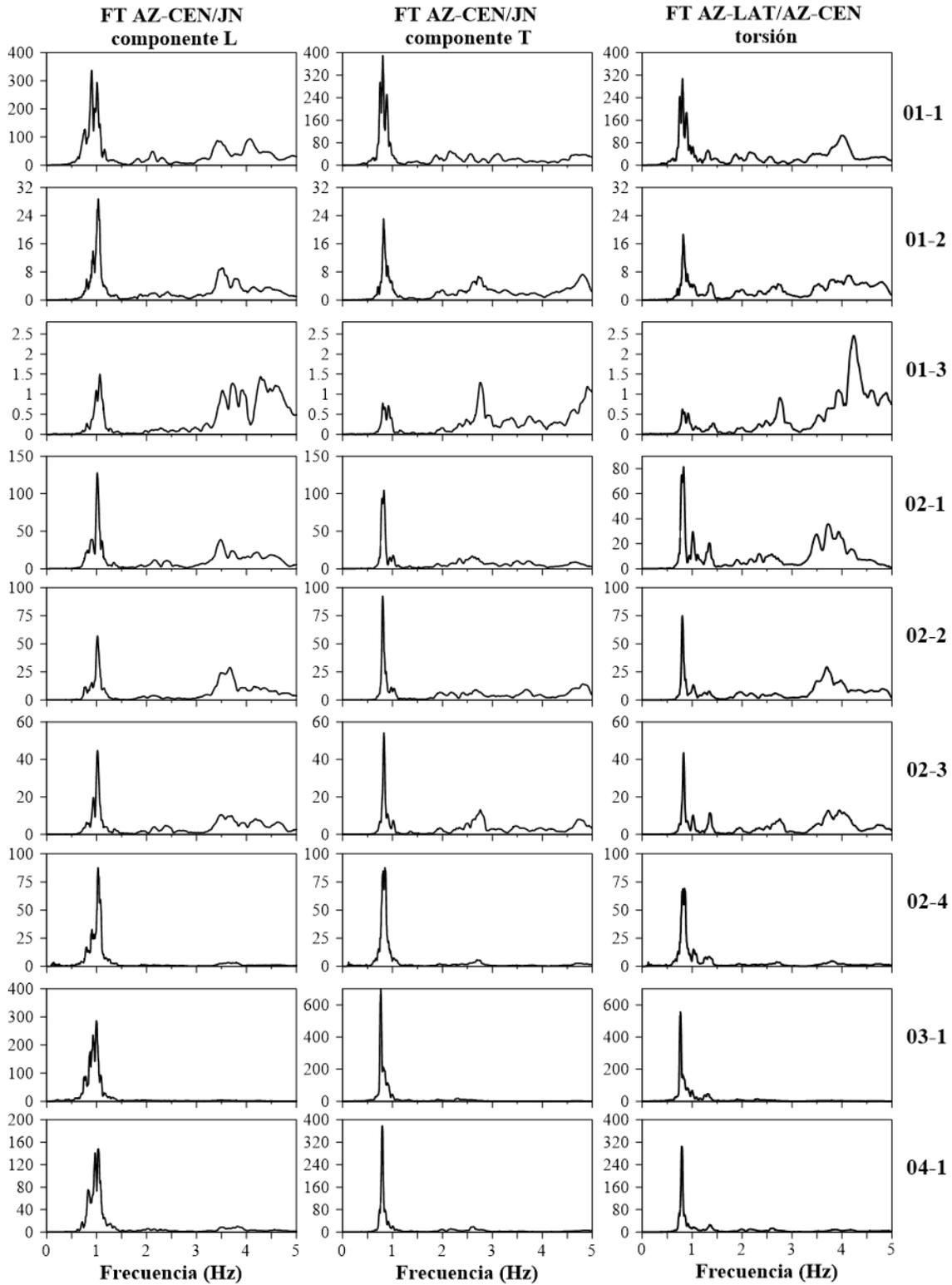


Figura A.1 Funciones de transferencia para la identificación de la frecuencia del sistema en los componentes *L*, *T* y torsión utilizando los registros completos de los eventos 01-1 a 04-1

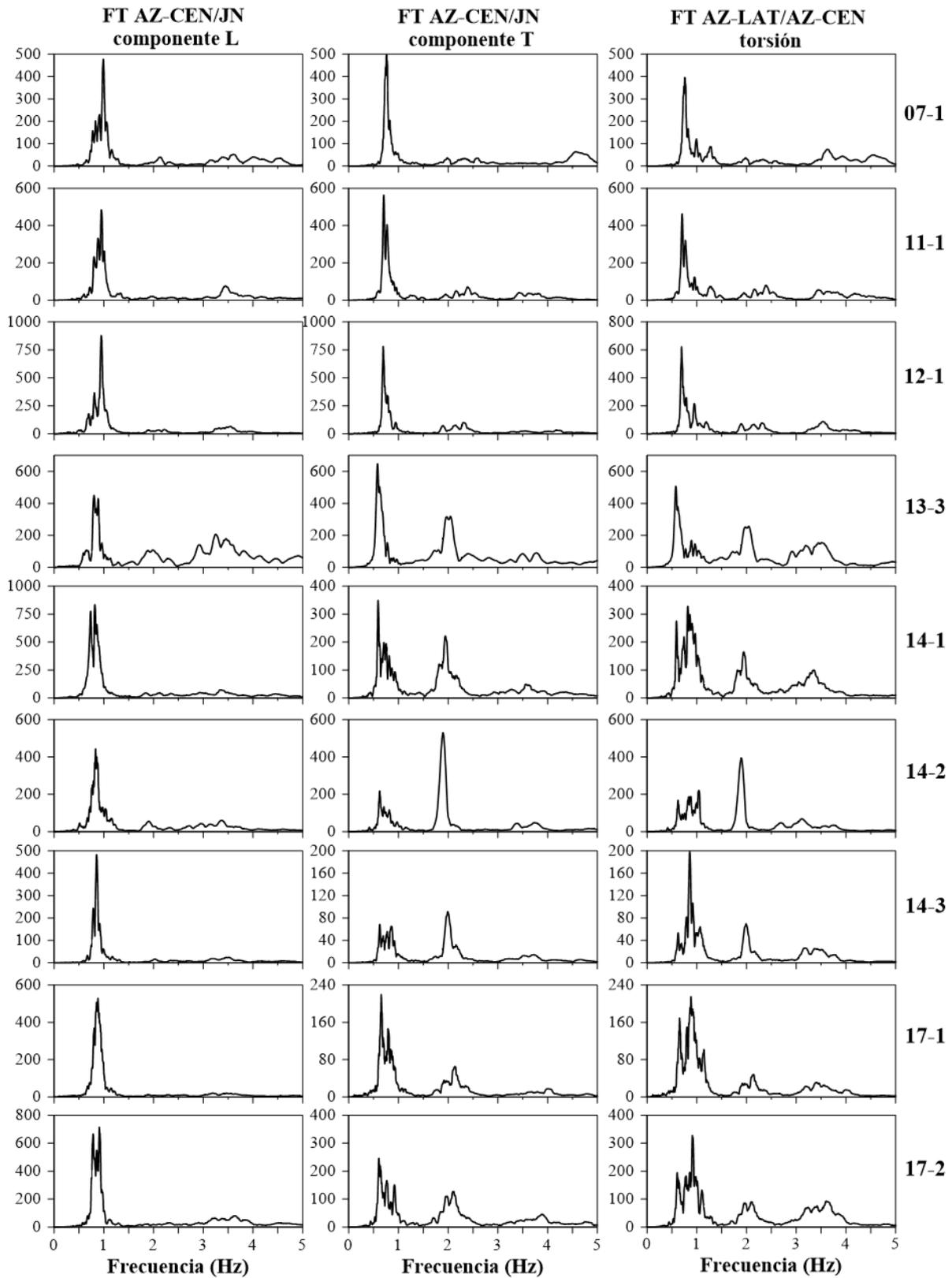


Figura A.2 Funciones de transferencia para la identificación de la frecuencia del sistema en los componentes *L*, *T* y torsión utilizando los registros completos de los eventos 07-1 a 17-2

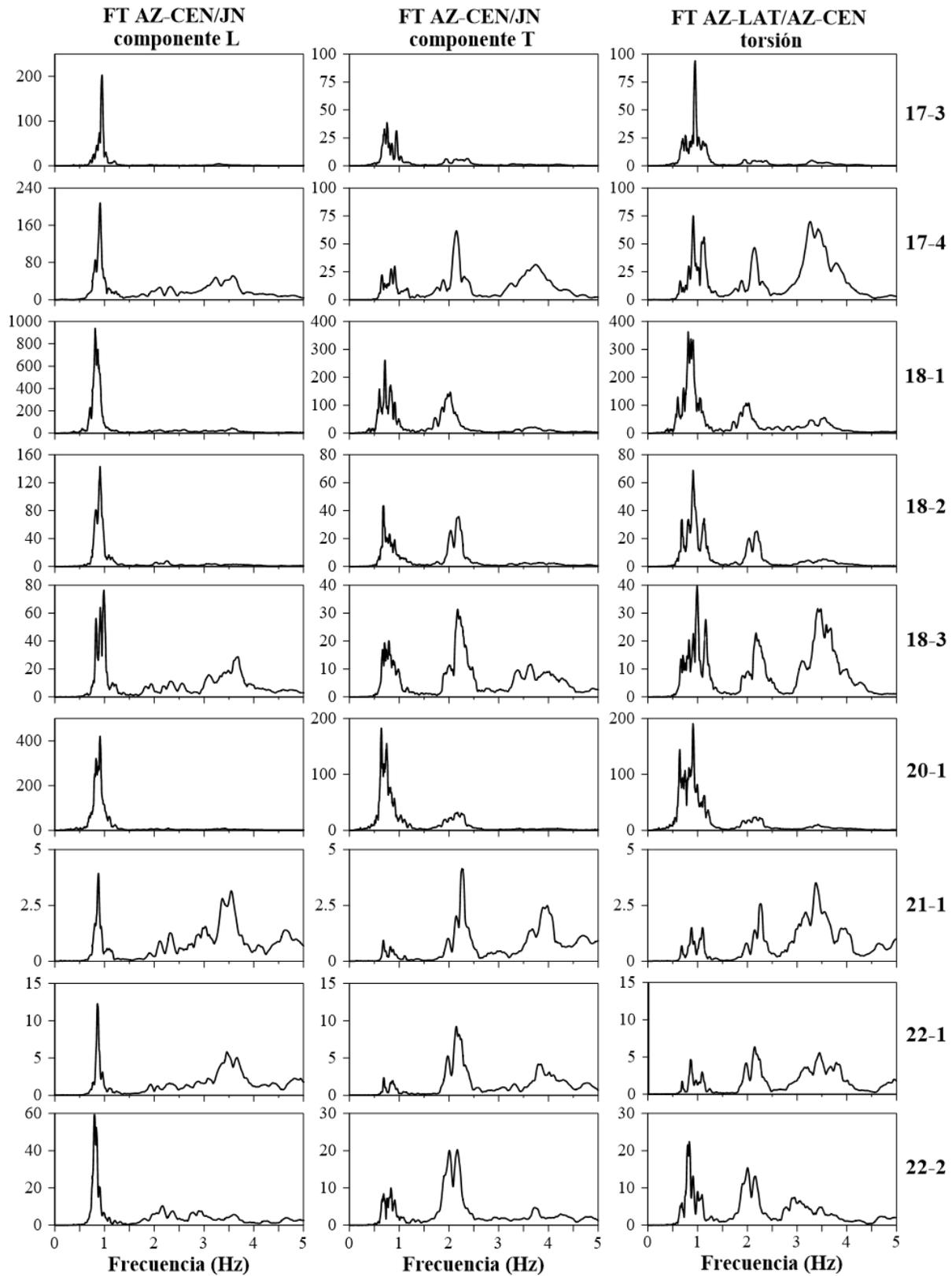


Figura A.3 Funciones de transferencia para la identificación de la frecuencia del sistema en los componentes *L*, *T* y torsión utilizando los registros completos de los eventos 07-3 a 22-2

Apéndice B. Efectos de ISE estimados con el método de Luco por ventanas

En esta sección se presentan los valores de las frecuencias y rigideces de ISE por ventanas en los componentes L, T y en torsión calculados con el método de Luco, a partir de los registros sísmicos 01-1, 01-3, 02-1, 02-2, 03-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4, 18-1, 20-1 y 22-2. En la sección B.1 se presentan los valores obtenidos a partir de las frecuencias del sistema N4SID (García-Illescas *et al.*, 2023) y en la sección B.2 se presentan los valores obtenidos a partir de las frecuencias del sistema MM (Taborda, 2003).

N.d. indica aquellos valores que se omitieron por incoherencias entre las amplitudes medidas en los espectros de amplitudes de Fourier, es un problema normal en las primeras ventanas, donde las amplitudes son muy bajas, o en aquellas ventanas particulares en donde el acoplamiento entre componentes está presente.

B.1 Estimación a partir de las frecuencias del sistema obtenidas con el método N4SID

Tabla B.1 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 01-1, en los componentes L, T y torsión

Ventana (s)	Componente L											Componente T											Torsión										
	$\bar{f}_{1,NASID}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{tot}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{r,T}}{X_{tot}^{tot}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1 -	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_1 N/m $\times 10^6$	$\bar{f}_{1,NASID}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{tot}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{r,L}}{X_{tot}^{tot}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1 -	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_1 N/m $\times 10^6$	$\bar{f}_{1,NASID}$ (Hz)	$\frac{\Phi_{r,V}}{\Phi_{r,T}^{tot}}$ (%)	f_z (Hz)	f_{1t} (Hz)	\bar{f}_{1t}/f_{1t} -	K_r Nm/rad $\times 10^{12}$	K_{1t} Nm/rad $\times 10^{10}$						
0-20	1.102	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.872	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.590	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.						
10-30	1.107	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.875	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.512	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.						
20-40	1.011	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.812	4.22	15.49	3.113	1.944	0.934	1.15	0.32	2.65	0.90	n.d.	1.305	1.24	9.981	1.316	1.009	3.82	3.50					
30-50	0.993	6.43	29.22	3.279	1.836	1.266	1.27	0.35	2.37	1.75	0.791	3.80	15.75	3.194	1.877	0.907	1.15	0.34	2.47	0.84	n.d.	1.312	1.85	8.226	1.329	1.013	2.60	3.57					
40-60	0.987	5.36	30.52	3.570	1.786	1.256	1.27	0.42	2.24	1.70	0.792	6.08	15.70	2.531	1.884	0.931	1.17	0.21	2.49	0.88	n.d.	1.304	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.					
50-70	0.989	5.20	27.49	3.639	1.885	1.226	1.24	0.43	2.24	1.70	0.787	5.49	14.47	2.647	1.949	0.910	1.16	0.23	2.67	0.86	n.d.	1.296	1.53	9.567	1.308	1.009	3.51	3.46					
60-80	0.991	4.39	27.07	3.959	1.903	1.213	1.23	0.51	2.55	1.68	0.788	6.60	14.97	2.417	1.919	0.926	1.17	0.19	2.59	0.88	n.d.	1.292	3.02	6.336	1.320	1.021	1.54	3.52					
70-90	0.993	3.47	26.72	4.462	1.919	1.201	1.21	0.65	2.59	1.67	0.788	6.15	14.50	2.501	1.948	0.917	1.16	0.21	2.67	0.87	n.d.	1.292	2.81	6.569	1.318	1.020	1.66	3.51					
80-100	0.994	5.61	27.21	3.513	1.905	1.236	1.24	0.40	2.55	1.73	0.790	4.45	13.99	2.946	1.988	0.899	1.14	0.29	2.78	0.85	n.d.	1.300	3.09	6.300	1.329	1.022	1.52	3.57					
90-110	0.996	5.03	27.53	3.718	1.896	1.233	1.24	0.45	2.53	1.72	0.792	2.93	13.85	3.640	2.004	0.887	1.12	0.44	2.82	0.83	n.d.	1.311	2.78	6.701	1.337	1.020	1.72	3.61					
100-120	1.000	6.63	27.56	3.249	1.903	1.260	1.26	0.34	2.55	1.77	0.794	4.25	14.18	3.034	1.986	0.904	1.14	0.30	2.77	0.86	n.d.	1.323	1.09	10.767	1.333	1.008	4.45	3.59					
110-130	1.005	5.86	26.31	3.476	1.958	1.243	1.24	0.39	2.70	1.77	0.796	2.34	14.72	4.094	1.954	0.892	1.12	0.55	2.68	0.83	n.d.	1.324	2.87	6.658	1.351	1.020	1.70	3.69					
120-140	1.012	6.05	26.94	3.446	1.949	1.262	1.25	0.39	2.67	1.80	0.797	3.39	14.30	3.410	1.986	0.901	1.13	0.38	2.77	0.85	n.d.	1.328	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.					
130-150	1.017	6.46	27.17	3.348	1.949	1.276	1.25	0.37	2.67	1.83	0.801	4.26	14.43	4.167	1.986	0.895	1.12	0.57	2.77	0.84	n.d.	1.332	2.30	7.484	1.354	1.016	2.15	3.70					
140-170	1.019	2.60	27.29	5.285	1.949	1.227	1.20	0.91	2.67	1.73	0.804	4.26	14.49	3.068	1.990	0.918	1.14	0.31	2.78	0.88	n.d.	1.333	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.					
150-180	1.020	2.31	27.46	5.621	1.946	1.227	1.20	1.03	2.66	1.73	0.804	2.38	14.17	4.106	2.011	0.898	1.12	0.55	2.84	0.85	n.d.	1.338	2.40	7.296	1.351	1.017	2.04	3.69					
160-180	1.020	7.01	27.40	3.925	1.947	1.290	1.26	0.34	2.67	1.86	0.804	2.58	14.32	3.944	2.002	0.901	1.12	0.51	2.82	0.85	n.d.	1.338	2.15	7.779	1.359	1.015	2.32	3.73					
170-190	1.023	4.82	28.02	3.901	1.931	1.268	1.24	0.50	2.62	1.81	0.808	2.28	14.21	4.212	2.019	0.902	1.12	0.58	2.86	0.86	n.d.	1.344	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.					
180-200	1.026	3.84	28.11	4.385	1.935	1.260	1.23	0.63	2.63	1.79	0.809	6.81	14.05	2.442	2.052	0.946	1.17	0.20	2.90	0.93	n.d.	1.355	2.84	6.847	1.382	1.020	1.80	3.86					
190-210	1.028	4.94	27.57	3.869	1.956	1.271	1.24	0.49	2.69	1.83	0.810	5.07	13.93	2.835	2.045	0.929	1.15	0.26	2.94	0.90	n.d.	1.368	0.96	11.918	1.377	1.007	5.45	3.83					
200-220	1.031	4.18	27.78	4.219	1.954	1.267	1.23	0.58	2.69	1.82	0.812	3.81	14.33	3.278	2.020	0.921	1.13	0.35	2.87	0.89	n.d.	1.366	2.95	6.782	1.395	1.021	1.77	3.93					

Tabla B.2 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 01-3, en los componentes L, T y torsión

Componente	Ventana	\bar{f}_{1_N4SID}	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
L	0 - 20	1.092	2.74	26.07	5.516	2.136	1.305	1.20	0.99	3.21	1.99
	10 - 30	1.084	5.42	26.64	3.898	2.099	1.338	1.23	0.50	0.31	2.05
	20 - 40	1.085	3.37	28.07	4.947	2.047	1.325	1.22	0.80	0.29	1.99
	30 - 50	1.068	2.79	28.61	5.349	1.995	1.301	1.22	0.93	0.28	1.91
	40 - 60	1.069	2.75	29.02	5.397	1.983	1.306	1.22	0.95	0.28	1.91
T	Ventana	\bar{f}_{1_N4SID}	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rL}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
	0 - 20	0.859	2.60	15.08	4.193	2.084	0.968	1.13	0.58	3.05	0.98
	10 - 30	0.846	6.14	14.14	2.690	2.120	0.983	1.16	0.24	3.16	1.01
	20 - 40	0.856	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	30 - 50	0.859	5.18	15.88	2.974	2.031	1.001	1.16	0.29	2.90	1.02
40 - 60	0.858	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
Torsión	Ventana	\bar{f}_{1t_N4SID}	$\frac{\Phi_{rV}}{\Phi_{rV}^{az}}$	f_r	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	K_r	K_{1t}			
	(s)	(Hz)	(%)	(Hz)	(Hz)	-	Nm/rad $\times 10^{12}$	Nm/rad $\times 10^{10}$			
	0 - 20	1.465	1.94	8.969	1.485	1.014	3.09	4.46			
	10 - 30	1.489	2.68	7.746	1.518	1.019	2.30	4.65			
	20 - 40	1.440	1.98	8.727	1.460	1.014	2.92	4.31			
	30 - 50	1.489	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
40 - 60	1.416	1.83	8.926	1.434	1.013	3.06	4.16				

Tabla B.3 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 02-1, en los componentes L, T y torsión

Componente	Ventana	$\bar{f}_{1,N4SID}$	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
L	0 - 20	1.077	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	10 - 30	1.071	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	20 - 40	1.017	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	30 - 50	1.017	3.33	27.71	4.665	1.931	1.238	1.22	0.71	2.62	1.75
	40 - 60	1.016	1.92	27.43	6.132	1.938	1.216	1.20	1.23	2.64	1.71
	50 - 70	1.019	1.74	26.94	6.471	1.962	1.213	1.19	1.37	2.71	1.71
	60 - 80	1.021	2.40	28.28	5.521	1.919	1.236	1.21	1.00	2.59	1.74
	70 - 90	1.023	3.77	28.98	4.410	1.899	1.263	1.23	0.63	2.54	1.78
	80 - 100	1.024	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
T	Ventana	$\bar{f}_{1,N4SID}$	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rL}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
	0 - 15	0.821	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	5 - 25	0.863	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	15 - 35	0.806	4.35	15.25	3.042	1.944	0.926	1.15	0.30	2.65	0.88
	25 - 45	0.809	6.85	16.05	2.434	1.902	0.961	1.19	0.19	2.54	0.93
	35 - 55	0.809	4.98	14.07	2.854	2.031	0.927	1.15	0.27	2.90	0.90
	45 - 65	0.807	1.84	14.11	4.682	2.024	0.896	1.11	0.72	2.88	0.85
	55 - 75	0.808	2.61	14.52	3.934	1.996	0.906	1.12	0.51	2.80	0.86
	65 - 85	0.809	2.36	14.54	4.141	1.997	0.905	1.12	0.56	2.80	0.86
75 - 95	0.809	3.22	14.68	3.551	1.989	0.915	1.13	0.41	2.78	0.87	
85 - 105	0.810	3.45	14.75	3.431	1.985	0.918	1.13	0.39	2.77	0.88	
Torsión	Ventana	$\bar{f}_{1t,N4SID}$	$\frac{\Phi_{rV}}{\Phi_{rV}^{az}}$	f_r	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	K_r	K_{1t}			
	(s)	(Hz)	(%)	(Hz)	(Hz)	-	Nm/rad $\times 10^{12}$	Nm/rad $\times 10^{10}$			
	0 - 15	1.887	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	5 - 25	1.714	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	15 - 35	1.277	1.17	10.060	1.287	1.008	3.88	3.35			
	25 - 45	1.339	1.57	9.108	1.354	1.011	3.18	3.70			
	35 - 55	1.324	1.06	10.968	1.334	1.007	4.62	3.60			
	45 - 65	1.325	1.02	11.197	1.335	1.007	4.81	3.60			
	55 - 75	1.330	1.23	10.193	1.341	1.009	3.99	3.63			
	65 - 85	1.331	2.97	6.574	1.359	1.021	1.66	3.73			
75 - 95	1.331	2.20	7.649	1.352	1.016	2.25	3.69				
85 - 105	1.334	1.60	8.995	1.349	1.011	3.11	3.68				

Tabla B.4 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 02-2, en los componentes L, T y torsión

Componente	Ventana	\bar{f}_{1_NASID}	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
L	0 - 15	1.089	2.27	32.08	6.052	1.921	1.355	1.24	1.20	2.60	1.97
	5 - 25	1.070	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	15 - 35	1.083	3.79	26.19	4.657	2.114	1.309	1.21	0.71	3.14	1.99
	25 - 45	1.031	8.05	26.98	3.042	1.983	1.314	1.28	0.30	2.77	1.93
	35 - 55	1.030	4.71	27.68	3.970	1.956	1.272	1.24	0.51	2.69	1.83
	45 - 65	1.033	2.81	27.85	5.161	1.956	1.252	1.21	0.87	2.69	1.79
	55 - 75	1.036	2.10	26.82	5.990	1.999	1.237	1.19	1.17	2.81	1.78
	65 - 85	1.037	8.20	26.44	3.030	2.015	1.319	1.27	0.30	2.86	1.96
	75 - 95	1.039	3.41	27.67	4.706	1.973	1.265	1.22	0.72	2.74	1.82
	85 - 105	1.043	2.21	27.97	5.868	1.971	1.257	1.21	1.12	2.73	1.81
T	Ventana	\bar{f}_{1_NASID}	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rL}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
	0 - 15	0.872	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	5 - 25	0.860	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	15 - 35	0.844	8.64	14.17	2.261	2.112	1.008	1.19	0.17	3.13	1.05
	25 - 45	0.812	4.49	13.30	3.016	2.096	0.920	1.13	0.30	3.09	0.90
	35 - 55	0.814	3.47	13.62	3.439	2.077	0.915	1.12	0.39	3.03	0.89
	45 - 65	0.816	5.08	14.16	2.851	2.043	0.937	1.15	0.27	2.93	0.92
	55 - 75	0.818	4.59	13.60	3.006	2.088	0.930	1.14	0.30	3.06	0.91
	65 - 85	0.819	2.38	13.83	4.185	2.075	0.913	1.11	0.58	3.03	0.88
75 - 95	0.822	2.56	14.26	4.044	2.049	0.920	1.12	0.54	2.95	0.89	
85 - 105	0.823	2.55	14.93	4.053	2.005	0.925	1.12	0.54	2.82	0.89	
Torsión	Ventana	\bar{f}_{1t_NASID}	$\frac{\Phi_{rv}}{\Phi_{rv}^{az}}$	f_r	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	K_r	K_{1t}			
	(s)	(Hz)	(%)	(Hz)	(Hz)	-	Nm/rad $\times 10^{12}$	Nm/rad $\times 10^{10}$			
	0 - 15	1.666	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	5 - 25	1.454	0.94	12.810	1.464	1.007	6.30	4.33			
	15 - 35	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	25 - 45	1.330	1.58	9.014	1.345	1.011	3.12	3.66			
	35 - 55	1.319	2.21	7.553	1.340	1.016	2.19	3.63			
	45 - 65	1.314	2.61	6.932	1.339	1.018	1.84	3.62			
	55 - 75	1.330	2.71	6.877	1.355	1.019	1.82	3.71			
	65 - 85	1.336	0.77	12.968	1.343	1.005	6.45	3.65			
75 - 95	1.339	1.38	9.706	1.352	1.010	3.62	3.69				
85 - 105	1.341	2.48	7.251	1.364	1.018	2.02	3.76				

Tabla B.5 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 03-1, en los componentes L, T y torsión

Ventana (s)	Componente L											Componente T											Torsión				
	$\bar{f}_{L,M45/D}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{L}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{PT}}{X_{tot}^{L}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_l (Hz)	\bar{f}_l/f_l	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_l N/m $\times 10^8$	$\bar{f}_{L,M45/D}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{T}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{PT}}{X_{tot}^{T}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_l (Hz)	\bar{f}_l/f_l	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_l N/m $\times 10^8$	$\bar{f}_{L,M45/D}$ (Hz)	$\frac{\Phi_{TV}}{\Phi_{TV}^0}$ (%)	f_r (Hz)	f_{tl} (Hz)	\bar{f}_{tl}/f_{tl}	K_r Nm/rad $\times 10^{12}$	K_{tl} Nm/rad $\times 10^{10}$
0 - 15	1.098	3.10	29.55	5.218	2.018	1.352	1.23	0.89	2.87	2.03	0.841	6.75	13.13	2.550	2.187	0.976	1.16	0.21	0.34	1.01	1.484	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
5 - 25	1.075	8.86	28.62	3.022	2.007	1.403	1.31	0.30	2.83	2.13	0.829	4.32	13.67	3.138	2.110	0.941	1.14	0.32	0.31	0.93	1.336	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
15 - 35	1.051	3.70	27.74	4.572	1.994	1.285	1.22	0.68	2.80	1.87	0.830	7.95	13.80	2.317	2.103	0.981	1.18	0.18	0.31	1.00	1.396	1.07	11.504	1.407	1.007	5.08	4.0
25 - 45	1.054	4.14	27.32	4.335	2.014	1.290	1.22	0.61	2.85	1.90	0.825	3.25	13.76	3.602	2.094	0.926	1.12	0.43	0.31	0.91	1.383	1.35	10.155	1.396	1.009	3.96	3.9
35 - 55	1.051	2.40	27.16	5.680	2.015	1.261	1.20	1.05	2.86	1.84	0.818	3.18	13.65	3.615	2.085	0.918	1.12	0.43	0.31	0.89	1.374	1.15	10.935	1.385	1.008	4.59	3.9
45 - 65	1.045	2.58	27.97	5.449	1.975	1.265	1.21	0.97	2.74	1.82	0.818	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.372	1.43	9.766	1.386	1.010	3.66	3.9
55 - 75	1.018	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.807	5.14	13.69	2.801	2.054	0.924	1.15	0.26	0.30	0.90	1.318	1.40	9.488	1.331	1.010	3.46	3.6
65 - 85	1.002	7.92	27.63	2.981	1.905	1.283	1.28	0.29	2.55	1.82	0.789	5.50	12.24	2.648	2.124	0.897	1.14	0.23	0.32	0.86	1.328	1.08	10.865	1.338	1.008	4.53	3.6
85 - 105	0.999	7.76	28.26	3.002	1.877	1.283	1.28	0.29	2.48	1.80	0.782	5.03	13.11	2.746	2.034	0.890	1.14	0.25	0.29	0.84	1.309	1.54	8.972	1.323	1.011	3.09	3.5
95 - 115	0.996	2.49	27.18	5.289	1.909	1.197	1.20	0.91	2.57	1.65	0.774	4.74	13.26	2.797	2.001	0.879	1.14	0.26	0.28	0.82	1.289	1.28	9.701	1.300	1.009	3.61	3.4
105 - 125	0.993	5.43	26.53	3.566	1.926	1.225	1.23	0.42	2.61	1.72	0.773	3.49	13.38	3.262	1.991	0.869	1.12	0.35	0.28	0.80	1.296	1.81	8.214	1.313	1.013	2.59	3.5
115 - 135	0.994	5.35	26.41	3.599	1.933	1.224	1.23	0.42	2.63	1.72	0.774	5.76	12.67	2.540	2.047	0.885	1.14	0.21	0.29	0.83	1.293	1.30	9.642	1.305	1.009	3.57	3.4
125 - 145	0.995	9.24	26.42	2.741	1.935	1.281	1.29	0.25	2.63	1.83	0.774	7.21	11.89	2.271	2.115	0.894	1.15	0.17	0.31	0.86	1.290	0.60	14.244	1.296	1.004	7.79	3.4
135 - 155	0.994	3.56	26.93	4.406	1.914	1.206	1.21	0.63	2.58	1.67	0.777	3.42	13.08	3.310	2.023	0.870	1.12	0.36	0.29	0.81	1.331	0.72	13.339	1.337	1.005	6.83	3.6
145 - 165	1.000	2.56	27.41	5.235	1.908	1.205	1.20	0.89	2.56	1.67	0.777	3.76	14.39	3.158	1.930	0.882	1.13	0.33	0.26	0.81	1.334	0.63	14.353	1.340	1.004	7.91	3.6
155 - 175	1.011	2.76	27.10	5.093	1.940	1.217	1.20	0.85	2.65	1.71	0.779	4.57	14.87	2.870	1.902	0.894	1.15	0.27	0.25	0.83	1.333	0.70	13.598	1.340	1.005	7.10	3.6
165 - 185	1.017	7.01	26.93	3.218	1.959	1.281	1.26	0.34	2.70	1.85	0.782	2.03	14.72	4.319	1.918	0.873	1.12	0.61	0.26	0.80	1.328	1.09	10.821	1.339	1.008	4.49	3.6
175 - 195	1.019	6.86	26.93	3.256	1.961	1.281	1.26	0.35	2.71	1.85	0.784	2.03	14.79	4.337	1.921	0.877	1.12	0.62	0.26	0.80	1.328	1.10	10.810	1.338	1.008	4.49	3.6

Tabla B.6 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 07-1, en los componentes L, T y torsión

Ventana (s)	Componente L											Componente T											Torsión					
	f_{L_MSID} (Hz)	$\frac{X_b}{X_{0.05}^{0.05}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{L-T}}{X_{0.05}^{0.05}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_1 N/m $\times 10^8$	f_{L_MSID} (Hz)	$\frac{X_b}{X_{0.05}^{0.05}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{L-T}}{X_{0.05}^{0.05}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_1 N/m $\times 10^8$	f_{L_MSID} (Hz)	$\frac{\Phi_{TV}}{\Phi_{0.05}^{0.05}}$ (%)	f_f (Hz)	\bar{f}_f/f_f	K_f Nm/rad $\times 10^{12}$	K_{Tt} Nm/rad $\times 10^{10}$		
0 - 20	1.100	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.842	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.456	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
10 - 30	0.879	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.842	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.330	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
20 - 40	1.034	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.815	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.323	1.12	10.644	1.333	1.008	2.30	3.29	
30 - 50	0.978	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.749	4.23	2.868	1.949	0.846	1.13	0.27	2.67	2.67	0.76	1.268	1.39	9.148	1.281	1.010	7.10	3.20	
40 - 60	0.981	3.56	24.78	4.352	1.969	1.171	1.19	0.62	2.73	1.63	0.757	6.40	13.50	2.355	1.939	0.877	1.16	0.18	2.64	0.81	1.259	1.92	7.745	1.275	1.013	3.93	3.23	
50 - 70	0.982	2.03	25.04	5.768	1.960	1.157	1.18	1.09	2.70	1.60	0.755	3.69	13.31	3.096	1.983	0.850	1.12	0.31	2.67	0.77	1.254	0.62	13.598	1.259	1.004	2.08	3.30	
60 - 80	0.984	3.74	25.63	4.261	1.942	1.184	1.20	0.59	2.65	1.64	0.757	4.96	12.92	2.676	1.983	0.860	1.14	0.24	2.76	0.79	1.255	1.12	10.112	1.265	1.008	2.18	3.30	
70 - 90	0.985	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.758	5.06	11.24	2.654	1.929	0.852	1.12	0.23	3.18	0.79	1.258	2.12	7.361	1.277	1.015	4.30	3.27	
80 - 100	0.986	5.79	26.38	3.431	1.919	1.220	1.24	0.38	2.59	1.70	0.760	3.90	11.49	3.031	2.111	0.845	1.11	0.30	3.13	0.78	1.260	2.03	7.539	1.278	1.014	5.84	3.27	
90 - 110	0.993	3.75	25.10	4.294	1.981	1.192	1.20	0.60	2.76	1.68	0.761	2.36	11.67	3.902	2.097	0.835	1.10	0.50	3.09	0.76	1.262	1.03	10.582	1.271	1.007	7.16	3.52	
100 - 120	1.001	2.31	24.70	5.510	2.013	1.180	1.18	0.99	2.85	1.67	0.762	2.39	11.14	3.885	2.151	0.834	1.09	0.50	3.25	0.76	1.266	0.76	12.334	1.273	1.005	5.45	3.34	
110 - 130	1.006	4.99	24.79	3.770	2.019	1.220	1.21	0.46	2.87	1.75	0.765	4.55	11.54	2.818	2.116	0.855	1.12	0.26	3.14	0.80	1.275	0.63	13.662	1.281	1.004	2.39	3.45	
120 - 140	1.010	5.89	26.64	3.481	1.955	1.253	1.24	0.40	2.69	1.79	0.766	3.92	11.38	3.046	2.138	0.852	1.11	0.30	3.21	0.79	1.279	0.84	11.913	1.286	1.006	2.79	3.42	
130 - 150	1.015	7.76	26.11	3.049	1.984	1.281	1.26	0.30	2.77	1.86	0.770	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.289	1.94	7.883	1.307	1.014	2.09	3.46	
140 - 160	1.019	3.47	25.22	4.577	2.027	1.220	1.20	0.68	2.89	1.76	0.771	4.75	11.62	2.787	2.130	0.866	1.12	0.26	3.19	0.81	1.285	1.65	8.532	1.300	1.012	3.73	3.35	
150 - 170	1.018	3.93	24.86	4.299	2.040	1.221	1.20	0.60	2.93	1.76	0.768	2.25	11.45	4.032	2.138	0.841	1.09	0.53	3.21	0.77	1.289	2.22	7.372	1.309	1.016	6.69	3.38	
160 - 180	1.023	6.79	25.38	3.285	2.028	1.269	1.24	0.35	2.89	1.86	0.771	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.276	1.22	9.862	1.287	1.008	8.87	3.46	
170 - 190	1.027	7.73	26.85	3.093	1.981	1.304	1.27	0.31	2.76	1.91	0.773	5.75	12.14	2.538	2.089	0.880	1.14	0.21	3.07	0.83	1.287	0.69	13.201	1.293	1.005	4.52	3.51	
180 - 200	1.030	3.55	26.42	4.573	2.002	1.245	1.21	0.68	2.82	1.80	0.775	4.24	11.55	2.962	2.147	0.865	1.12	0.29	3.24	0.81	1.304	0.53	15.204	1.309	1.004	6.45	3.69	
190 - 210	1.032	2.76	27.31	5.202	1.974	1.246	1.21	0.88	2.74	1.78	0.778	8.73	10.97	2.072	2.211	0.907	1.17	0.14	3.43	0.89	1.308	1.05	10.856	1.317	1.007	4.33	3.69	
200 - 220	1.029	7.86	23.54	3.074	2.120	1.275	1.24	0.31	3.16	1.92	0.782	2.45	12.09	3.932	2.118	0.861	1.10	0.51	3.15	0.81	1.344	0.78	12.961	1.351	1.005	10.91	3.64	
210 - 230	1.033	3.80	25.88	4.443	2.033	1.249	1.21	0.64	2.91	1.82	0.784	3.51	12.23	3.296	2.111	0.873	1.11	0.36	3.13	0.82	1.340	1.16	10.620	1.351	1.008	5.55	3.67	
220 - 240	1.035	3.80	25.88	4.443	2.033	1.249	1.21	0.64	2.91	1.82	0.790	1.42	12.30	5.212	2.121	0.863	1.09	0.89	3.16	0.81	1.338	0.46	16.861	1.342	1.003	4.35	3.59	
230 - 250	1.042	1.98	25.54	6.191	2.060	1.231	1.18	1.25	2.99	1.80	0.791	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.338	0.90	12.021	1.347	1.006	3.21	3.51	

Tabla B.7 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 12-1, en los componentes L, T y torsión

Ventana	Componente L												Componente T												Torsión					
	$\bar{f}_{1,MS1D}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{ISE}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{T-T}}{X_{tot}^{ISE}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_l (Hz)	\bar{f}_l/f_l	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_l N/m $\times 10^6$	$\bar{f}_{1,MS1D}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{ISE}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{T-L}}{X_{tot}^{ISE}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_l (Hz)	\bar{f}_l/f_l	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_l N/m $\times 10^6$	$\bar{f}_{1,MS1D}$ (Hz)	$\frac{\Phi_{T-V}}{\Phi_{T-Z}^{ISE}}$ (%)	f_f (Hz)	f_{lt} (Hz)	\bar{f}_{lt}/f_{lt}	K_r Nm/rad $\times 10^{12}$	K_{lt} Nm/rad $\times 10^{10}$			
0-20	1.093	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.804	6.31	15.72	2.321	1.910	0.947	1.18	0.21	2.56	0.91	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
10-30	1.086	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.810	4.42	11.15	3.034	2.284	0.904	1.12	0.30	3.67	0.89	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
20-40	1.073	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.809	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
30-50	1.064	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.797	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
40-60	1.042	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.762	7.21	10.20	2.236	2.248	0.870	1.14	0.16	3.55	0.83	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
50-70	1.017	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.755	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		
60-80	0.959	5.47	25.48	3.431	1.898	1.174	1.22	0.38	2.54	1.60	0.723	4.50	12.28	2.683	1.942	0.813	1.13	0.24	2.65	0.71	1.232	1.54	8.446	1.245	1.011	2.74	3.13			
70-90	0.952	4.58	24.89	3.724	1.907	1.150	1.21	0.45	2.56	1.56	0.710	3.72	11.24	2.899	1.995	0.787	1.11	0.28	2.79	0.68	1.222	2.58	6.478	1.244	1.018	1.61	3.13			
80-100	0.949	3.82	23.47	4.066	1.958	1.126	1.19	0.54	2.70	1.53	0.704	4.49	10.40	2.614	2.055	0.782	1.11	0.22	2.97	0.67	1.207	2.84	6.096	1.231	1.020	1.43	3.06			
90-110	0.946	4.08	22.57	3.917	1.989	1.118	1.18	0.50	2.78	1.53	0.702	3.99	10.09	2.768	2.083	0.775	1.10	0.25	3.05	0.67	1.212	2.45	6.596	1.233	1.017	1.67	3.07			
100-120	0.946	2.34	22.53	5.178	1.991	1.099	1.16	0.88	2.79	1.49	0.701	1.72	9.53	4.208	2.138	0.774	1.08	0.58	3.21	0.64	1.200	2.45	6.533	1.221	1.017	1.64	3.01			
110-130	0.950	4.89	21.58	3.593	2.042	1.124	1.18	0.42	2.93	1.56	0.702	4.29	9.62	2.669	2.133	0.774	1.10	0.23	3.20	0.67	1.213	1.96	7.380	1.229	1.014	2.09	3.05			
120-140	0.954	5.36	22.35	3.447	2.015	1.140	1.20	0.39	2.86	1.58	0.704	5.63	9.61	2.337	2.141	0.778	1.12	0.18	3.22	0.69	1.223	1.28	9.189	1.234	1.009	3.24	3.08			
130-150	0.967	5.91	22.59	3.331	2.034	1.165	1.20	0.36	2.91	1.64	0.706	3.68	10.28	2.899	2.074	0.778	1.10	0.28	3.02	0.67	1.227	1.99	7.411	1.244	1.014	2.11	3.13			
140-160	0.969	3.73	22.55	4.197	2.038	1.141	1.18	0.58	2.92	1.59	0.707	3.17	9.91	3.129	2.115	0.773	1.09	0.32	3.14	0.67	1.213	1.56	8.281	1.227	1.011	2.63	3.04			
150-170	0.972	2.32	21.02	5.344	2.119	1.117	1.15	0.93	3.16	1.57	0.709	6.94	9.55	2.121	2.162	0.803	1.13	0.15	3.28	0.72	1.219	1.23	9.361	1.229	1.009	3.36	3.05			
160-180	0.969	8.23	23.60	2.827	1.993	1.205	1.24	0.26	2.80	1.71	0.714	5.17	9.58	2.474	2.174	0.794	1.11	0.20	3.32	0.70	1.227	0.95	10.733	1.235	1.007	4.42	3.08			
170-190	0.977	3.67	22.40	4.267	2.062	1.148	1.18	0.59	2.99	1.62	0.715	6.10	9.95	2.282	2.137	0.805	1.13	0.17	3.21	0.72	1.231	1.19	9.607	1.241	1.008	3.54	3.11			
180-200	0.978	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.717	2.55	9.66	3.535	2.171	0.777	1.08	0.41	3.31	0.68	1.244	2.59	6.580	1.267	1.018	1.66	3.24			
190-210	0.979	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.718	7.22	9.67	2.105	2.176	0.816	1.14	0.15	3.33	0.74	1.253	2.49	6.756	1.275	1.018	1.75	3.28			
200-220	0.979	6.03	22.57	3.340	2.060	1.181	1.21	0.36	2.99	1.69	0.718	4.16	9.46	2.774	2.199	0.790	1.10	0.25	3.40	0.70	1.256	1.78	8.015	1.271	1.013	2.47	3.27			
210-230	0.987	6.72	22.50	3.186	2.079	1.198	1.21	0.33	3.04	1.73	0.718	1.12	9.32	5.341	2.215	0.767	1.07	0.94	3.45	0.66	1.247	0.72	12.506	1.253	1.005	6.00	3.17			
220-240	0.991	4.54	22.42	3.893	2.092	1.176	1.19	0.49	3.08	1.69	0.719	5.83	10.37	2.347	2.104	0.810	1.13	0.18	3.11	0.72	1.257	1.74	8.106	1.272	1.012	2.52	3.27			
230-250	0.984	3.06	22.18	4.721	2.093	1.152	1.17	0.73	3.08	1.64	0.719	4.05	9.73	2.812	2.171	0.791	1.10	0.26	3.31	0.70	1.233	0.95	10.758	1.241	1.007	4.44	3.11			
240-260	0.984	4.72	23.05	3.788	2.047	1.174	1.19	0.47	2.95	1.67	0.719	2.81	9.51	3.379	2.196	0.781	1.09	0.38	3.39	0.68	1.242	0.40	16.702	1.246	1.003	10.71	3.14			
250-270	0.985	5.28	22.38	3.590	2.081	1.177	1.19	0.42	3.05	1.67	0.719	2.38	9.42	3.672	2.205	0.777	1.08	0.44	3.42	0.68	1.245	1.10	10.094	1.254	1.008	3.91	3.18			
260-280	0.988	4.03	21.48	4.120	2.131	1.159	1.17	0.55	3.19	1.67	0.722	2.66	9.99	3.489	2.152	0.786	1.09	0.40	3.25	0.69	1.252	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
270-290	1.005	3.00	23.19	4.857	2.085	1.180	1.17	0.77	3.06	1.70	0.724	5.08	10.40	2.532	2.116	0.809	1.12	0.21	3.14	0.72	1.258	2.79	6.418	1.283	1.020	1.58	3.32			
280-300	1.006	2.48	22.94	5.344	2.099	1.174	1.17	0.93	3.10	1.69	0.726	5.58	9.98	2.421	2.165	0.813	1.12	0.19	3.29	0.73	1.272	1.24	9.740	1.283	1.009	3.64	3.32			
290-310	1.006	4.16	23.47	4.130	2.075	1.198	1.19	0.56	3.03	1.73	0.731	6.59	10.14	2.594	2.164	0.828	1.13	0.17	3.29	0.72	1.271	3.12	6.135	1.299	1.022	1.44	3.41			
300-320	1.006	5.95	23.55	3.455	2.072	1.221	1.21	0.39	3.02	1.78	0.741	2.64	10.08	3.591	2.197	0.806	1.09	0.42	3.39	0.72	1.283	0.99	11.066	1.292	1.007	4.65	3.37			
310-330	1.003	4.03	23.95	4.181	2.048	1.197	1.19	0.57	2.95	1.72	0.740	1.77	9.67	4.375	2.241	0.797	1.08	0.63	3.53	0.71	1.285	0.59	14.250	1.290	1.004	7.79	3.36			
320-340	1.016	2.55	25.13	5.326	2.026	1.204	1.19	0.93	2.89	1.72	0.743	2.53	11.13	3.678	2.098	0.814	1.10	0.44	3.09	0.73	1.297	0.62	14.034	1.302	1.004	7.56	3.43			

Tabla B.8 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 13-3, en los componentes L, T y torsión

Ventana (s)	Componente L											Componente T											Torsión					
	$\bar{f}_{L,MASID}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{ave}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{T-T}}{X_{tot}^{ave}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1 -	K_h $N/m \times 10^{10}$	K_c $Nm/rad \times 10^{12}$	K_1 $N/m \times 10^8$	$\bar{f}_{L,MASID}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{ave}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{T-L}}{X_{tot}^{ave}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1 -	K_h $N/m \times 10^{10}$	K_c $Nm/rad \times 10^{12}$	K_1 $N/m \times 10^8$	$\bar{f}_{L,MASID}$ (Hz)	$\frac{\Phi_{T-V}}{\Phi_{T-T}^{ave}}$ (%)	f_f (Hz)	f_{It} (Hz)	\bar{f}_{It}/f_{It} -	K_T $Nm/rad \times 10^{12}$	K_{It} $Nm/rad \times 10^{10}$	
0-20	1.071	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.813	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
10-30	1.066	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.814	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
20-40	1.070	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.817	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.366	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
30-50	1.067	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.809	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.354	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
40-60	0.959	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.657	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.158	3.21	5.503	1.184	1.023	1.16	2.83
50-70	0.850	8.20	25.31	2.486	1.689	1.072	1.26	0.20	2.01	1.32	0.579	7.21	9.52	1.697	1.767	0.657	1.13	0.05	2.12	0.76	1.089	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
60-80	0.859	9.78	21.53	2.299	1.850	1.070	1.25	0.17	2.41	1.38	0.584	3.51	7.43	2.452	2.017	0.630	1.08	0.09	2.19	0.48	1.023	5.94	3.577	1.068	1.044	0.49	2.30	
70-90	0.865	8.14	20.03	2.537	1.930	1.046	1.21	0.21	2.62	1.36	0.585	3.86	7.87	2.347	1.964	0.635	1.09	0.20	2.86	0.46	1.030	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
80-100	0.870	6.95	18.72	2.762	2.010	1.030	1.18	0.25	2.84	1.35	0.587	5.06	8.37	2.055	1.911	0.647	1.10	0.18	2.71	0.46	1.043	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
90-110	0.873	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.590	9.44	7.15	1.513	2.079	0.674	1.14	0.14	2.57	0.47	1.051	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
100-120	0.879	6.49	17.83	2.890	2.080	1.030	1.17	0.27	3.04	1.37	0.596	5.45	6.90	2.010	2.137	0.653	1.09	0.08	3.04	0.52	1.056	2.71	5.464	1.076	1.019	1.15	2.34	
110-130	0.886	8.23	19.60	2.887	2.001	1.070	1.21	0.22	2.82	1.43	0.598	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.064	0.97	9.217	1.071	1.007	3.26	2.32	
120-140	0.898	7.09	19.45	2.824	2.035	1.070	1.19	0.26	2.91	1.44	0.601	5.57	8.45	2.005	1.948	0.666	1.11	0.03	2.68	0.76	1.077	1.64	7.171	1.089	1.011	1.97	2.40	
130-150	0.906	5.64	19.13	3.196	2.071	1.062	1.17	0.33	3.02	1.44	0.604	9.16	7.21	1.571	2.118	0.688	1.14	0.13	2.67	0.50	1.081	2.01	6.500	1.097	1.014	1.62	2.43	
140-160	0.906	9.15	18.66	2.508	2.095	1.096	1.21	0.21	3.09	1.52	0.612	8.04	6.25	1.700	2.305	0.684	1.12	0.08	3.15	0.54	1.088	1.61	7.301	1.101	1.011	2.05	2.45	
150-170	0.906	7.64	20.14	2.745	2.018	1.091	1.20	0.25	2.86	1.48	0.630	5.22	8.32	2.171	2.056	0.695	1.10	0.09	3.73	0.54	1.100	1.57	7.489	1.113	1.011	2.15	2.50	
160-180	0.917	5.35	20.16	3.319	2.041	1.079	1.18	0.36	2.93	1.46	0.638	4.74	8.90	2.306	2.013	0.703	1.10	0.15	2.97	0.55	1.106	2.50	5.957	1.126	1.018	1.36	2.56	
170-190	0.921	3.27	20.11	4.263	2.053	1.062	1.15	0.39	2.96	1.43	0.649	9.12	8.51	1.694	2.097	0.746	1.13	0.17	2.85	0.56	1.121	1.30	8.376	1.131	1.009	2.69	2.58	
180-200	0.925	4.25	20.08	3.755	2.063	1.077	1.16	0.46	3.00	1.46	0.653	7.40	8.42	1.889	2.118	0.736	1.13	0.09	3.09	0.63	1.118	0.87	10.209	1.125	1.006	4.00	2.56	
190-210	0.930	5.52	18.25	3.314	2.176	1.082	1.16	0.36	3.33	1.51	0.658	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.124	1.67	7.402	1.137	1.012	2.10	2.61	
200-220	0.940	6.83	19.27	3.009	2.139	1.115	1.19	0.30	3.22	1.57	0.665	4.90	8.50	2.366	2.149	0.732	1.10	0.09	2.36	0.65	1.142	1.39	8.239	1.153	1.010	2.61	2.69	
210-230	0.943	4.57	19.96	3.692	2.110	1.100	1.17	0.45	3.13	1.53	0.669	3.61	8.78	2.770	2.126	0.728	1.09	0.18	3.24	0.61	1.146	0.97	9.895	1.154	1.007	3.76	2.69	
220-240	0.946	4.44	20.46	3.760	2.091	1.106	1.17	0.46	3.08	1.54	0.670	8.12	8.31	1.852	2.190	0.761	1.14	0.25	3.18	0.60	1.145	0.88	10.397	1.152	1.006	4.15	2.68	
230-250	0.947	5.04	21.15	3.530	2.058	1.119	1.18	0.41	2.98	1.55	0.677	3.49	8.99	2.853	2.127	0.738	1.09	0.11	3.37	0.65	1.150	1.78	7.344	1.164	1.012	2.07	2.74	

Tabla B.9 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 14-1, en los componentes L, T y torsión

Ventana (s)	Componente L										Componente T										Torsión									
	$\bar{f}_{L,MSTD}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{gr}^{L,T}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{L,T}}{X_{gr}^{L,T}}$ (%)	f_h (Hz)	f_e (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_i	K_b N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_1 N/m $\times 10^8$	$\bar{f}_{L,MSTD}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{gr}^{L,T}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{L,T}}{X_{gr}^{L,T}}$ (%)	f_h (Hz)	f_e (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_i	K_b N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_1 N/m $\times 10^8$	$\bar{f}_{T,MSTD}$ (Hz)	$\frac{\Phi_{L,T}^V}{\Phi_{gr}^V}$ (%)	f_r (Hz)	f_{Tr} (Hz)	\bar{f}_{Tr}/f_{Tr}	K_r Nm/rad $\times 10^{12}$	K_{Tr} Nm/rad $\times 10^{10}$			
0-20	1.045	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.769	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.210	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
10-30	1.040	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.768	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.293	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
20-40	1.047	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.780	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.320	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
30-50	1.050	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.775	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.343	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
40-60	1.010	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.692	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.266	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
50-70	0.974	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.666	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.179	1.35	8.653	1.190	1.009	2.87	2.86			
60-80	0.912	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.647	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.111	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
70-90	0.842	8.11	18.03	2.475	1.982	1.004	1.19	0.20	2.76	1.29	0.602	6.01	8.38	1.935	1.960	0.670	1.12	0.10	0.31	0.51	1.072	1.22	8.252	1.081	1.009	2.61	2.26			
80-100	0.846	7.91	19.22	2.519	1.929	1.015	1.20	0.21	2.62	1.30	0.601	7.25	7.26	1.758	2.100	0.672	1.12	0.10	0.31	0.52	1.055	0.30	16.273	1.057	1.002	10.16	2.26			
90-110	0.842	4.08	19.48	3.491	1.906	0.974	1.16	0.40	2.56	1.21	0.599	5.80	7.55	1.959	2.053	0.661	1.10	0.13	0.30	0.50	1.059	0.58	11.811	1.063	1.004	5.35	2.28			
100-120	0.841	7.40	19.04	2.587	1.926	1.002	1.19	0.22	2.61	1.27	0.600	2.94	7.72	2.756	2.032	0.645	1.07	0.25	0.29	0.48	1.059	0.34	15.407	1.062	1.002	9.11	2.28			
110-130	0.841	5.63	18.12	2.967	1.975	0.979	1.16	0.29	2.74	1.24	0.601	9.20	7.46	1.560	2.071	0.686	1.14	0.08	0.30	0.54	1.052	0.61	11.487	1.056	1.004	5.06	2.25			
120-140	0.843	4.46	18.14	3.342	1.978	0.971	1.15	0.36	2.75	1.22	0.602	11.67	6.66	1.388	2.197	0.701	1.17	0.06	0.34	0.56	1.048	0.38	14.470	1.051	1.003	8.04	2.23			
130-150	0.845	6.93	18.25	2.689	1.978	0.997	1.18	0.24	2.75	1.27	0.612	6.53	6.98	1.885	2.181	0.677	1.11	0.12	0.33	0.53	1.053	1.22	8.136	1.062	1.008	2.54	2.28			
140-160	0.849	5.22	17.98	3.110	2.000	0.983	1.16	0.32	2.82	1.25	0.616	2.47	6.81	3.086	2.221	0.655	1.06	0.31	0.35	0.50	1.064	1.17	8.392	1.073	1.008	2.70	2.33			
150-170	0.860	6.99	18.30	2.723	2.009	1.016	1.18	0.24	2.84	1.32	0.617	7.71	6.47	1.749	2.284	0.689	1.12	0.10	0.37	0.55	1.063	2.10	6.257	1.079	1.015	1.50	2.35			
160-180	0.870	7.19	18.49	2.716	2.022	1.031	1.18	0.24	2.88	1.36	0.621	5.96	8.69	2.003	1.984	0.692	1.11	0.13	0.28	0.54	1.070	0.34	15.574	1.073	1.002	9.31	2.32			
170-190	0.874	6.83	18.86	2.800	2.012	1.035	1.18	0.26	2.85	1.36	0.625	5.85	7.66	2.035	2.127	0.690	1.10	0.14	0.32	0.55	1.072	0.83	10.010	1.078	1.006	3.85	2.35			
180-200	0.881	6.15	20.07	2.973	1.964	1.044	1.19	0.29	2.71	1.37	0.633	4.38	7.47	2.382	2.181	0.689	1.09	0.19	0.33	0.55	1.085	1.29	8.146	1.095	1.009	2.55	2.42			
190-210	0.891	10.33	18.59	2.321	2.065	1.092	1.22	0.18	3.00	1.50	0.635	3.79	7.95	3.840	2.123	0.676	1.06	0.48	0.32	0.52	1.099	1.60	7.403	1.112	1.011	2.10	2.50			
200-220	0.889	7.79	19.09	2.668	2.034	1.065	1.20	0.23	2.91	1.43	0.636	3.79	7.02	2.572	2.260	0.686	1.08	0.22	0.36	0.54	1.093	2.04	6.518	1.109	1.014	1.63	2.49			
210-230	0.892	8.51	20.16	2.560	1.985	1.085	1.22	0.21	2.77	1.46	0.642	5.46	9.02	2.163	2.014	0.713	1.11	0.15	0.28	0.57	1.120	1.20	8.706	1.129	1.008	2.91	2.58			
220-240	0.895	8.23	19.84	2.612	2.007	1.082	1.21	0.22	2.84	1.46	0.648	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.115	2.44	6.082	1.134	1.017	1.42	2.60				
230-250	0.901	5.39	19.68	3.250	2.030	1.058	1.17	0.34	2.90	1.41	0.651	8.75	7.61	1.733	2.222	0.740	1.14	0.10	0.35	0.62	1.122	1.12	9.046	1.131	1.008	3.14	2.58			
240-260	0.909	6.90	19.56	2.897	2.054	1.082	1.19	0.27	2.97	1.47	0.656	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.135	0.65	12.005	1.140	1.004	5.53	2.63				
250-270	0.914	7.65	19.14	2.767	2.088	1.093	1.20	0.25	3.07	1.51	0.657	3.00	8.59	2.986	2.111	0.711	1.08	0.29	0.31	0.57	1.126	1.70	7.346	1.139	1.012	2.07	2.62			
260-280	0.926	6.37	19.30	3.071	2.105	1.094	1.18	0.31	3.12	1.51	0.657	5.77	7.75	2.155	2.224	0.726	1.10	0.15	0.35	0.60	1.125	2.25	6.387	1.143	1.016	1.57	2.64			
270-290	0.928	5.58	21.38	3.290	2.005	1.104	1.19	0.35	2.83	1.50	0.657	4.01	7.84	2.584	2.211	0.714	1.09	0.22	0.34	0.58	1.133	1.42	8.110	1.144	1.010	2.52	2.65			
280-300	0.932	6.82	21.08	2.988	2.029	1.121	1.20	0.29	2.90	1.55	0.660	3.47	7.55	2.786	2.260	0.712	1.08	0.26	0.36	0.58	1.126	2.30	6.322	1.144	1.016	1.53	2.64			
290-310	0.927	3.18	19.50	4.354	2.099	1.064	1.15	0.62	3.10	1.45	0.661	3.27	7.16	2.878	2.327	0.710	1.07	0.27	0.38	0.58	1.127	1.91	6.939	1.142	1.013	1.85	2.64			
300-320	0.936	3.11	19.89	4.438	2.096	1.076	1.15	0.64	3.09	1.47	0.663	10.96	8.21	1.576	2.178	0.775	1.17	0.08	0.33	0.67	1.135	0.89	10.260	1.142	1.006	4.04	2.64			
310-330	0.943	3.33	19.87	4.325	2.113	1.086	1.15	0.61	3.14	1.50	0.665	4.30	8.81	2.526	2.110	0.729	1.10	0.21	0.31	0.60	1.142	1.07	9.409	1.151	1.007	3.40	2.68			
320-340	0.940	2.97	20.42	4.562	2.079	1.083	1.15	0.68	3.04	1.48	0.669	3.92	7.90	2.659	2.241	0.726	1.09	0.23	0.35	0.60	1.149	1.37	8.378	1.160	1.010	2.69	2.72			

Tabla B.10 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 17-1, en los componentes L, T y torsión

Ventana (s)	Componente L											Componente T											Torsión						
	\bar{f}_{L_MASID} (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{ave}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{T-T}}{X_{tot}^{ave}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1 -	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_1 N/m $\times 10^8$	\bar{f}_{L_MASID} (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{ave}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{T-L}}{X_{tot}^{ave}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1 -	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_1 N/m $\times 10^8$	\bar{f}_{L_MASID} (Hz)	$\frac{\Phi_{T-V}}{\Phi_{V-V}^{ave}}$ (%)	f_r (Hz)	f_{it} (Hz)	\bar{f}_{it}/f_{it} -	K_r Nm/rad $\times 10^{12}$	K_{it} Nm/rad		
0 - 20	1.036	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.751	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.213	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
10 - 30	1.025	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.748	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.264	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
20 - 40	1.040	5.47	22.51	3.721	2.189	1.246	1.20	0.45	3.37	1.88	0.755	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.302	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
30 - 50	0.996	8.63	19.33	2.839	2.264	1.205	1.21	0.26	3.61	1.82	0.716	4.76	8.68	2.583	2.288	0.788	1.10	0.22	3.68	0.70	n.d.	1.260	0.71	12.693	1.266	1.005	6.18	3.24	
40 - 60	0.973	5.58	19.70	3.447	2.191	1.144	1.18	0.39	3.38	1.65	0.711	5.86	8.85	2.312	2.250	0.792	1.11	0.18	3.56	0.71	n.d.	1.241	1.40	8.948	1.254	1.010	3.07	3.18	
50 - 70	0.972	5.22	19.85	3.564	2.181	1.141	1.17	0.41	3.35	1.64	0.705	8.25	8.84	1.934	2.234	0.805	1.14	0.12	3.51	0.73	n.d.	1.248	1.70	8.147	1.263	1.012	2.55	3.23	
60 - 80	0.976	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.707	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.240	1.30	9.251	1.251	1.009	3.28	3.16	
70 - 90	0.974	4.23	19.67	3.970	2.198	1.132	1.16	0.51	3.40	1.63	0.706	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.243	2.03	7.421	1.260	1.014	2.11	3.21	
80 - 100	0.974	7.08	21.03	3.063	2.122	1.174	1.21	0.31	3.17	1.69	0.706	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.222	1.63	8.148	1.236	1.011	2.55	3.09	
90 - 110	0.955	6.69	19.48	3.091	2.163	1.134	1.19	0.31	3.29	1.62	0.675	6.81	9.52	2.038	2.061	0.763	1.13	0.14	2.98	0.65	n.d.	1.201	1.54	8.256	1.214	1.011	2.62	2.98	
100 - 120	0.902	9.89	18.50	2.400	2.095	1.099	1.22	0.19	3.09	1.52	0.658	5.63	8.44	2.186	2.135	0.730	1.11	0.16	3.20	0.60	n.d.	1.136	2.42	6.224	1.155	1.017	1.49	2.70	
110 - 130	0.904	10.45	18.67	2.332	2.083	1.105	1.23	0.18	3.05	1.43	0.653	6.60	8.97	2.002	2.055	0.734	1.12	0.13	2.97	0.60	n.d.	1.127	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
120 - 140	0.904	5.84	18.84	3.131	2.081	1.059	1.17	0.22	3.08	1.47	0.648	7.28	9.14	1.892	2.020	0.734	1.13	0.12	2.87	0.60	n.d.	1.107	1.99	6.691	1.122	1.014	1.72	2.55	
130 - 150	0.897	8.52	18.34	2.571	2.092	1.076	1.20	0.47	2.97	1.32	0.646	6.09	8.97	1.960	2.031	0.722	1.12	0.14	2.90	0.58	n.d.	1.109	0.49	13.564	1.113	1.004	7.06	2.50	
140 - 160	0.886	3.53	17.82	3.945	2.097	1.009	1.14	0.51	3.09	1.33	0.650	9.58	7.72	1.653	2.202	0.746	1.15	0.09	3.41	0.63	n.d.	1.124	0.61	12.225	1.129	1.004	5.74	2.58	
150 - 170	0.888	7.74	17.51	2.673	2.121	1.051	1.18	0.23	3.17	1.42	0.652	6.53	7.52	2.008	2.238	0.724	1.11	0.13	3.52	0.60	n.d.	1.139	0.59	12.631	1.144	1.004	6.12	2.65	
170 - 190	0.892	5.98	18.81	3.054	2.056	1.047	1.17	0.30	2.97	1.40	0.650	5.11	8.38	2.066	2.116	0.717	1.10	0.17	3.15	0.58	n.d.	1.139	1.46	8.029	1.151	1.010	2.47	2.68	
180 - 200	0.899	5.20	18.70	3.300	2.077	1.046	1.16	0.36	3.04	1.40	0.651	7.07	8.10	1.927	2.152	0.730	1.12	0.12	3.25	0.60	n.d.	1.136	2.48	6.143	1.155	1.018	1.45	2.70	
190 - 210	0.908	9.31	19.02	2.491	2.080	1.103	1.22	0.20	3.04	1.53	0.651	4.53	8.28	2.411	2.132	0.714	1.10	0.19	3.19	0.58	n.d.	1.133	1.93	6.939	1.148	1.014	1.85	2.66	
200 - 220	0.910	4.60	18.72	3.552	2.101	1.053	1.16	0.41	3.11	1.42	0.654	4.50	9.57	2.427	1.989	0.722	1.10	0.19	2.78	0.58	n.d.	1.131	1.19	8.820	1.140	1.008	2.99	2.63	
210 - 230	0.910	4.93	18.32	3.432	2.125	1.054	1.16	0.38	3.18	1.43	0.656	4.56	8.63	2.421	2.104	0.721	1.10	0.19	3.11	0.59	n.d.	1.133	0.44	14.510	1.136	1.003	8.08	2.61	
230 - 240	0.915	5.83	19.15	3.172	2.090	1.075	1.17	0.23	3.07	1.47	0.660	4.98	7.71	2.327	2.237	0.723	1.10	0.18	3.52	0.60	n.d.	1.140	1.23	8.764	1.150	1.009	2.25	2.67	
240 - 250	0.919	8.56	19.27	2.631	2.093	1.111	1.21	0.23	3.08	1.55	0.663	6.36	9.58	1.935	2.029	0.758	1.14	0.12	2.89	0.60	n.d.	1.151	1.67	7.582	1.164	1.012	2.21	2.74	
250 - 260	0.924	5.80	18.65	2.788	2.070	1.090	1.18	0.34	3.01	1.49	0.666	7.36	8.54	2.332	2.148	0.735	1.10	0.18	3.24	0.61	n.d.	1.150	1.84	7.224	1.164	1.013	2.00	2.74	
260 - 270	0.923	7.68	18.65	2.788	2.135	1.100	1.19	0.25	3.21	1.54	0.666	5.06	8.54	2.332	2.148	0.735	1.10	0.18	3.24	0.61	n.d.	1.157	2.86	5.829	1.181	1.020	1.30	2.82	
260 - 280	0.925	4.52	18.88	3.641	2.127	1.071	1.16	0.43	3.18	1.47	0.665	4.19	8.11	2.557	1.999	0.725	1.09	0.21	3.40	0.60	n.d.	1.166	1.62	7.806	1.179	1.011	2.34	2.81	
270 - 290	0.936	5.36	19.64	3.385	2.111	1.098	1.17	0.52	3.14	1.53	0.668	2.53	9.13	3.311	2.083	0.722	1.08	0.36	3.05	0.59	n.d.	1.181	0.76	11.570	1.188	1.005	5.14	2.85	
280 - 300	0.940	3.87	19.61	3.998	2.121	1.087	1.16	0.52	3.17	1.50	0.671	8.61	9.04	1.801	2.103	0.770	1.15	0.11	3.11	0.66	n.d.	1.180	1.79	7.503	1.194	1.013	2.16	2.88	
290 - 310	0.941	3.70	20.46	4.097	2.079	1.093	1.16	0.55	3.04	1.50	0.678	4.85	9.13	2.625	2.114	0.750	1.11	0.19	3.14	0.63	n.d.	1.182	2.47	6.401	1.202	1.017	1.57	2.92	
300 - 320	0.944	2.86	20.38	4.670	2.089	1.086	1.15	0.71	3.07	1.49	0.682	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.189	1.64	7.912	1.203	1.011	2.40	2.92	
310 - 330	0.954	3.68	20.72	4.162	2.095	1.109	1.16	0.57	3.09	1.54	0.686	7.24	7.27	2.007	2.396	0.767	1.12	0.13	4.03	0.67	n.d.	1.208	0.55	13.863	1.213	1.004	7.38	2.97	
320 - 340	0.957	2.79	20.39	4.796	2.117	1.100	1.15	0.75	3.15	1.53	0.691	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.205	0.67	12.494	1.210	1.005	5.99	2.96	

Tabla B.11 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 17-2, en los componentes L, T y torsión

Ventana (s)	Componente L										Componente T										Torsión							
	$\bar{f}_{L,NASID}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{-L}}{X_{tot}^2}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1	K_h $\times 10^{10}$	K_c $\times 10^{12}$	K_1 $\times 10^8$	$\bar{f}_{L,NASID}$ (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{-L}}{X_{tot}^2}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1	K_h $\times 10^{10}$	K_c $\times 10^{12}$	K_1 $\times 10^8$	$\bar{f}_{T,NASID}$ (Hz)	$\frac{\Phi_{TV}}{\Phi_{TV}^0}$ (%)	f (Hz)	\bar{f}_T/f_T	K_c $\times 10^{12}$	K_{Tt} $\times 10^{10}$		
0 - 20	1.060	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.767	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.402	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
10 - 30	1.040	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.762	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.300	2.85	6.554	1.326	1.020	1.65	3.55
20 - 40	1.041	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.742	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.257	1.95	7.678	1.275	1.014	2.26	3.28
30 - 50	1.036	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.728	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.237	1.47	8.698	1.250	1.010	2.90	3.16
40 - 60	0.975	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.709	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.237	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
50 - 70	0.945	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.694	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.237	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
60 - 80	0.941	7.83	21.98	2.814	2.005	1.151	1.22	0.26	2.83	1.60	0.692	8.38	9.00	1.883	2.172	0.792	1.14	0.12	3.31	0.70	n.d.	1.142	2.27	6.458	1.160	1.016	1.60	2.72
70 - 90	0.896	8.29	21.99	2.605	1.909	1.102	1.23	0.22	2.56	1.46	0.640	5.45	8.36	2.159	2.084	0.707	1.11	0.15	3.05	0.57	n.d.	1.111	1.50	7.720	1.123	1.011	2.29	2.55
80 - 100	0.867	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.624	4.05	8.51	2.442	2.014	0.681	1.09	0.20	2.85	0.53	n.d.	1.095	1.12	8.811	1.104	1.008	2.98	2.46
90 - 110	0.865	9.14	19.08	2.394	1.978	1.050	1.21	0.19	2.75	1.38	0.624	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.081	1.42	7.734	1.092	1.010	2.30	2.41	
100 - 120	0.864	3.69	18.34	3.763	2.015	0.989	1.14	0.46	2.86	1.27	0.622	7.33	7.24	1.807	2.176	0.695	1.12	0.11	3.33	0.55	1.088	1.40	7.823	1.099	1.010	2.35	2.44	
110 - 130	0.862	5.78	18.43	3.003	2.007	1.007	1.17	0.29	2.84	1.30	0.622	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.088	1.40	7.823	1.099	1.010	2.35	2.44	
120 - 140	0.868	7.35	18.00	2.680	2.043	1.026	1.18	0.23	2.94	1.35	0.626	7.07	8.36	1.853	2.038	0.703	1.12	0.11	2.92	0.56	1.089	1.81	6.887	1.102	1.013	1.82	2.46	
130 - 150	0.873	3.32	18.18	4.009	2.046	0.995	1.14	0.52	2.95	1.29	0.636	9.43	8.69	1.632	2.033	0.735	1.15	0.09	2.90	0.60	1.091	2.36	6.052	1.109	1.017	1.41	2.49	
140 - 160	0.879	10.90	17.94	2.228	2.073	1.078	1.23	0.16	3.02	1.47	0.637	3.60	7.88	2.644	2.139	0.690	1.08	0.23	3.21	0.55	1.088	2.86	5.486	1.110	1.020	1.16	2.49	
150 - 170	0.888	6.59	18.25	2.894	2.076	1.044	1.18	0.27	3.03	1.40	0.640	3.41	7.05	2.729	2.269	0.688	1.07	0.24	3.62	0.55	1.111	1.26	8.420	1.121	1.009	2.72	2.54	
160 - 180	0.888	4.83	18.83	3.381	2.044	1.030	1.16	0.37	2.94	1.36	0.641	6.31	9.98	2.011	1.913	0.724	1.13	0.13	2.57	0.58	1.107	0.90	9.955	1.114	1.006	3.80	2.51	
170 - 190	0.898	5.89	18.97	3.096	2.059	1.054	1.17	0.31	2.98	1.41	0.649	8.80	8.91	1.723	2.048	0.746	1.15	0.10	2.95	0.62	1.127	0.48	13.888	1.131	1.003	7.40	2.59	
180 - 200	0.908	6.81	19.82	2.911	2.037	1.081	1.19	0.28	2.92	1.47	0.655	4.06	8.21	2.559	2.153	0.714	1.09	0.22	3.26	0.58	1.158	0.43	15.109	1.161	1.003	8.76	2.72	
190 - 210	0.906	4.98	19.64	3.398	2.042	1.058	1.17	0.38	2.93	1.42	0.658	2.26	7.81	3.443	2.216	0.703	0.39	3.45	0.57	n.d.	1.163	1.36	8.494	1.174	1.010	2.77	2.79	
200 - 220	0.926	4.23	19.58	3.770	2.091	1.074	1.16	0.46	3.08	1.47	0.659	4.19	8.58	2.534	2.119	0.721	1.09	0.21	3.15	0.59	1.187	0.95	10.355	1.195	1.007	4.12	2.88	
210 - 230	0.923	4.66	19.41	3.581	2.095	1.074	1.16	0.42	3.09	1.47	0.663	5.51	8.62	2.224	2.129	0.735	1.11	0.16	3.18	0.61	1.179	1.37	8.592	1.190	1.010	2.83	2.86	
220 - 240	0.927	4.01	20.10	3.875	2.065	1.076	1.16	0.49	3.00	1.46	0.666	5.89	8.07	2.161	2.208	0.738	1.11	0.15	3.43	0.62	1.180	1.10	9.594	1.189	1.008	3.53	2.86	
230 - 250	0.938	2.84	20.26	4.657	2.082	1.078	1.15	0.71	3.05	1.47	0.671	3.31	8.19	2.904	2.207	0.726	1.08	0.28	3.42	0.60	1.178	1.95	7.193	1.194	1.014	1.99	2.88	
240 - 260	0.938	3.98	20.15	3.936	2.088	1.089	1.16	0.51	3.07	1.50	0.675	6.11	8.83	2.150	2.138	0.753	1.12	0.15	3.21	0.64	1.179	1.06	9.755	1.188	1.007	3.65	2.85	
250 - 270	0.942	4.25	20.33	3.824	2.087	1.098	1.17	0.48	3.06	1.52	0.677	3.59	8.42	2.814	2.198	0.736	1.09	0.26	3.39	0.62	1.175	2.25	6.676	1.194	1.016	1.71	2.88	
260 - 280	0.940	4.99	20.49	3.523	2.075	1.105	1.18	0.41	3.03	1.53	0.677	3.88	8.61	2.706	2.172	0.738	1.09	0.24	3.31	0.62	1.198	1.27	9.059	1.209	1.009	3.15	2.95	
270 - 290	0.943	4.04	20.19	3.926	2.097	1.096	1.16	0.50	3.09	1.52	0.679	8.11	7.91	1.876	2.273	0.768	1.13	0.12	3.63	0.67	1.198	1.67	7.884	1.212	1.012	2.39	2.97	
280 - 300	0.947	5.08	19.43	3.517	2.147	1.106	1.17	0.40	3.24	1.55	0.684	4.35	8.40	2.583	2.224	0.749	1.09	0.22	3.47	0.64	1.217	0.40	16.400	1.220	1.003	10.32	3.01	
290 - 310	0.952	6.37	21.00	3.159	2.077	1.139	1.20	0.33	3.03	1.60	0.687	2.96	9.32	3.147	2.120	0.747	1.09	0.33	3.16	0.63	1.228	0.73	12.271	1.234	1.005	5.78	3.08	
300 - 320	0.963	2.73	21.83	4.874	2.059	1.117	1.16	0.78	2.98	1.55	0.692	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.231	0.49	14.995	1.235	1.003	8.63	3.08	
310 - 330	0.967	4.33	22.67	3.889	2.029	1.146	1.19	0.49	2.90	1.60	0.684	6.38	8.53	2.133	2.207	0.765	1.12	0.15	3.42	0.66	1.233	0.61	13.408	1.238	1.004	6.90	3.10	

Tabla B.12 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 17-4, en los componentes L, T y torsión

Componente	Ventana	$\bar{f}_{1,NASID}$	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
L	0 - 20	1.008	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	10 - 30	1.039	2.26	34.16	5.785	1.776	1.313	1.26	1.09	2.22	1.79
	20 - 40	1.033	3.32	29.66	4.748	1.896	1.276	1.24	0.74	2.53	1.80
	30 - 50	1.026	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	40 - 60	0.877	8.78	20.43	2.477	1.938	1.071	1.22	0.20	2.64	1.41
	50 - 70	0.898	6.66	19.75	2.915	2.020	1.068	1.19	0.28	2.87	1.43
	60 - 80	0.907	4.15	19.32	3.730	2.063	1.050	1.16	0.45	2.99	1.41
	70 - 90	0.913	3.73	19.23	3.960	2.081	1.052	1.15	0.51	3.05	1.42
	80 - 100	0.916	12.66	20.92	2.157	2.002	1.174	1.28	0.15	2.82	1.65
	90 - 110	0.919	8.31	19.51	2.667	2.078	1.109	1.21	0.23	3.04	1.54
	100 - 120	0.921	7.73	19.40	2.774	2.090	1.105	1.20	0.25	3.07	1.53
	110 - 130	0.924	8.46	19.65	2.659	2.083	1.119	1.21	0.23	3.05	1.56
120 - 140	0.933	9.07	21.98	2.594	1.989	1.157	1.24	0.22	2.78	1.61	
T	Ventana	$\bar{f}_{1,NASID}$	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rL}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
	0 - 20	0.742	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	10 - 30	0.745	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	20 - 40	0.762	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	30 - 50	0.752	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	40 - 60	0.662	6.91	8.72	1.983	2.112	0.745	1.12	0.13	3.13	0.62
	50 - 70	0.650	3.72	9.44	2.655	1.993	0.712	1.10	0.23	2.79	0.57
	60 - 80	0.664	3.95	8.82	2.631	2.106	0.726	1.09	0.23	3.12	0.60
	70 - 90	0.672	5.50	10.45	2.258	1.959	0.755	1.12	0.17	2.69	0.63
	80 - 100	0.679	3.40	8.68	2.899	2.170	0.737	1.09	0.28	3.31	0.62
	90 - 110	0.684	3.98	8.15	2.703	2.257	0.745	1.09	0.24	3.58	0.63
100 - 120	0.697	6.04	8.94	2.234	2.197	0.779	1.12	0.16	3.39	0.68	
110 - 130	0.704	5.24	8.89	2.420	2.223	0.779	1.11	0.19	3.47	0.68	
120 - 140	0.710	2.85	8.78	3.314	2.257	0.768	1.08	0.36	3.58	0.67	
Torsión	Ventana	$\bar{f}_{1t,NASID}$	$\frac{\Phi_{rV}}{\Phi_{rZ}^{az}}$	f_r	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	K_r	K_{1t}			
	(s)	(Hz)	(%)	(Hz)	(Hz)	-	Nm/rad $\times 10^{12}$	Nm/rad $\times 10^{10}$			
	0 - 20	1.338	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	10 - 30	1.306	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	20 - 40	1.223	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	30 - 50	1.317	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	40 - 60	1.217	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	50 - 70	1.131	1.71	7.368	1.145	1.012	2.08	2.65			
	60 - 80	1.143	1.06	9.475	1.152	1.007	3.45	2.68			
	70 - 90	1.150	2.07	6.809	1.167	1.015	1.78	2.75			
	80 - 100	1.150	2.72	5.944	1.172	1.019	1.36	2.78			
	90 - 110	1.153	2.77	5.904	1.176	1.020	1.34	2.79			
100 - 120	1.156	2.52	6.205	1.176	1.018	1.48	2.80				
110 - 130	1.160	2.30	6.517	1.178	1.016	1.63	2.81				
120 - 140	1.162	2.51	6.248	1.183	1.018	1.50	2.83				

Tabla B.13 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 18-1, en los componentes L, T y torsión

Ventana (s)	Componente L										Componente T										Torsión									
	$\bar{f}_{L,NASID}$ (Hz)	$\frac{\bar{X}_b}{X_{tot}^{(a)}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{L,T}}{X_{tot}^{(a)}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	\bar{f}_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1 -	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_1 N/m $\times 10^8$	$\bar{f}_{L,NASID}$ (Hz)	$\frac{\bar{X}_b}{X_{tot}^{(a)}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{L,T}}{X_{tot}^{(a)}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	\bar{f}_1 (Hz)	\bar{f}_1/f_1 -	K_h N/m $\times 10^{10}$	K_c Nm/rad $\times 10^{12}$	K_1 N/m $\times 10^8$	$\bar{f}_{L,NASID}$ (Hz)	$\frac{\Phi_{L,T}}{\Phi_{L,T}^{(a)}}$ (%)	f (Hz)	$f_{L,T}$ (Hz)	$\bar{f}_{L,T}/f_{L,T}$ -	K_r Nm/rad $\times 10^{12}$	$K_{L,T}$ Nm/rad $\times 10^{10}$			
0-20	1.008	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.758	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.241	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
10-30	1.008	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.747	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.271	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
20-40	1.010	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.709	8.98	2.364	0.811	1.14	0.11	3.93	0.74	n.d.	n.d.	n.d.	1.272	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
30-50	1.020	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.684	6.43	8.48	2.125	2.213	0.765	1.12	0.15	3.44	0.66	n.d.	1.220	1.26	9.255	1.231	1.009	3.29	3.06		
40-60	0.954	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.665	7.79	9.24	1.876	2.061	0.758	1.14	0.12	2.98	0.64	n.d.	1.182	0.75	11.589	1.188	1.005	5.16	2.85		
50-70	0.938	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.651	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.149	1.48	8.041	1.161	1.010	2.48	2.72		
60-80	0.891	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.630	6.47	8.76	1.950	2.003	0.705	1.12	0.12	2.82	0.56	n.d.	1.090	1.01	9.241	1.098	1.007	3.28	2.43		
80-100	0.840	4.67	19.01	3.256	1.926	0.975	1.16	0.35	2.61	1.22	0.618	7.59	9.18	1.767	1.921	0.702	1.14	0.10	2.59	0.55	n.d.	1.053	0.83	9.827	1.059	1.006	3.71	2.27		
90-110	0.837	8.47	17.22	2.408	2.015	0.996	1.19	0.19	2.86	1.28	0.617	8.44	7.74	1.673	2.090	0.700	1.13	0.09	3.07	0.56	n.d.	1.044	1.28	7.877	1.054	1.009	3.38	2.24		
100-120	0.836	4.06	17.46	3.476	2.000	0.955	1.14	0.39	2.81	1.19	0.621	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.070	0.84	9.957	1.077	1.006	3.81	2.34		
110-130	0.838	9.23	17.77	2.310	1.988	1.009	1.20	0.17	2.78	1.30	0.622	8.13	8.79	1.717	1.975	0.709	1.14	0.10	2.74	0.56	n.d.	1.067	1.91	6.587	1.082	1.013	1.67	2.37		
120-140	0.840	8.23	17.82	2.452	1.989	1.001	1.19	0.20	2.78	1.28	0.625	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.091	1.35	7.994	1.101	1.009	2.45	2.45		
130-150	0.846	5.14	17.87	3.125	2.000	0.979	1.16	0.32	2.81	1.24	0.625	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.090	1.29	8.174	1.100	1.009	2.56	2.44		
140-160	0.849	8.29	19.16	2.469	1.939	1.023	1.20	0.20	2.64	1.31	0.638	7.83	7.50	1.797	2.195	0.719	1.13	0.11	3.39	0.59	n.d.	1.103	0.83	10.328	1.110	1.006	4.09	2.49		
150-170	0.858	9.74	17.86	2.302	2.028	1.039	1.21	0.17	2.89	1.37	0.647	7.33	9.21	1.881	2.007	0.733	1.13	0.12	2.83	0.60	n.d.	1.110	1.65	7.362	1.122	1.012	2.08	2.55		
160-180	0.867	8.78	18.60	2.450	2.008	1.045	1.21	0.20	2.84	1.38	0.647	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.114	1.25	8.495	1.123	1.009	2.77	2.55		
170-190	0.879	3.90	18.79	3.729	2.028	1.011	1.15	0.45	2.89	1.32	0.650	6.69	8.95	1.980	2.047	0.731	1.12	0.13	2.94	0.60	n.d.	1.126	0.81	10.662	1.132	1.006	4.36	2.59		
180-200	0.886	4.56	18.70	3.471	2.046	1.024	1.16	0.39	2.95	1.35	0.650	5.81	8.35	2.125	2.119	0.722	1.11	0.15	3.16	0.59	n.d.	1.129	0.58	12.572	1.133	1.004	6.07	2.59		
190-210	0.894	4.91	17.65	3.380	2.128	1.031	1.15	0.37	3.18	1.38	0.651	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.129	1.09	9.230	1.138	1.008	3.27	2.62		
200-220	0.897	4.70	18.80	3.463	2.067	1.039	1.16	0.39	3.01	1.39	0.656	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.130	1.64	7.516	1.143	1.011	2.17	2.64		
210-230	0.897	3.95	18.87	3.779	2.064	1.033	1.15	0.47	3.00	1.37	0.660	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.136	0.74	11.250	1.142	1.005	4.86	2.64		
220-240	0.896	3.52	18.69	3.999	2.071	1.026	1.15	0.52	3.02	1.36	0.661	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.139	1.65	7.551	1.152	1.012	2.19	2.68		
230-250	0.900	4.34	19.68	3.620	2.028	1.046	1.16	0.43	2.89	1.39	0.661	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.153	1.89	7.153	1.168	1.013	1.96	2.76		
240-260	0.903	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.664	5.28	8.25	2.274	2.176	0.732	1.10	0.17	3.33	0.61	n.d.	1.146	2.37	6.344	1.165	1.017	1.54	2.74		
250-270	0.907	4.69	20.12	3.507	2.022	1.061	1.17	0.40	2.88	1.42	0.670	3.63	8.33	2.770	2.188	0.728	1.09	0.25	3.36	0.60	n.d.	1.167	2.11	6.848	1.184	1.015	1.80	2.83		
260-280	0.927	3.67	20.58	4.049	2.041	1.076	1.16	0.54	2.93	1.46	0.671	2.81	8.40	3.152	2.182	0.724	1.08	0.33	3.34	0.60	n.d.	1.146	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
270-290	0.920	6.66	20.06	2.986	2.054	1.097	1.19	0.29	2.97	1.50	0.674	7.25	9.53	1.971	2.057	0.765	1.14	0.13	2.97	0.65	n.d.	1.142	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
280-300	0.926	5.90	20.01	3.191	2.068	1.094	1.18	0.33	3.01	1.50	0.676	3.16	9.39	2.998	2.079	0.737	1.09	0.30	3.04	0.61	n.d.	1.168	1.61	7.844	1.182	1.011	2.36	2.82		
290-310	0.924	5.67	20.09	3.249	2.061	1.091	1.18	0.34	2.99	1.49	0.676	6.36	9.56	2.111	2.060	0.761	1.13	0.15	2.98	0.64	n.d.	1.170	0.91	10.437	1.178	1.006	4.18	2.80		

Tabla B.14 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 20-1, en los componentes L, T y torsión

Ventana (s)	Componente L											Componente T											Torsión						
	\bar{f}_{L_MASID} (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{-T}}{X_{tot}^{az}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	$\frac{\bar{f}_1}{f_1}$	K_h $\times 10^{10}$ N/m	K_c $\times 10^{12}$ Nm/rad	K_1 $\times 10^8$ N/m	\bar{f}_{L_MASID} (Hz)	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{-L}}{X_{tot}^{az}}$ (%)	f_h (Hz)	f_c (Hz)	f_1 (Hz)	$\frac{\bar{f}_1}{f_1}$	K_h $\times 10^{10}$ N/m	K_c $\times 10^{12}$ Nm/rad	K_1 $\times 10^8$ N/m	\bar{f}_{T_MASID} (Hz)	Φ_{TV}^{az} Φ_{TV}^{az} (%)	F (Hz)	f_{Te} (Hz)	$\frac{\bar{f}_{Te}}{f_{Te}}$	K_T $\times 10^{12}$ Nm/rad	K_{Tt} $\times 10^{16}$ Nm/rad		
0-20	1.038	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.759	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
10-30	0.999	3.24	21.88	4.647	2.134	1.165	1.17	0.70	3.20	1.68	0.733	5.39	8.81	2.487	2.327	0.813	1.11	0.20	3.81	0.74	1.282	1.44	9.117	1.295	1.010	3.19	3.39	n.d.	
20-40	0.997	4.35	19.94	4.003	2.232	1.161	1.16	0.52	3.50	1.70	0.723	4.32	8.82	2.737	2.292	0.793	1.10	0.25	3.69	0.71	1.272	1.06	10.515	1.282	1.007	4.24	3.32	n.d.	
30-50	0.993	3.71	20.27	4.314	2.203	1.151	1.16	0.61	3.41	1.67	0.723	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.260	2.81	6.403	1.285	1.020	1.57	3.34	n.d.	
40-60	0.979	3.13	20.67	4.634	2.151	1.131	1.16	0.70	3.25	1.61	0.702	7.99	9.18	1.956	2.182	0.801	1.14	0.13	3.34	0.72	1.255	2.73	6.473	1.279	1.019	1.61	3.31	n.d.	
50-70	0.903	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.688	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.198	2.87	6.023	1.222	1.020	1.39	3.02	n.d.
60-80	0.952	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.675	7.42	10.57	1.951	1.956	0.774	1.15	0.13	2.69	0.65	1.173	1.16	9.277	1.183	1.008	3.30	2.83	n.d.	
70-90	0.904	7.75	17.92	2.718	2.133	1.073	1.19	0.24	3.20	1.48	0.660	8.20	7.75	1.815	2.234	0.748	1.13	0.11	3.51	0.64	1.139	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
80-100	0.903	6.48	18.49	2.970	2.099	1.062	1.18	0.29	3.10	1.44	0.643	5.37	7.32	2.186	2.239	0.706	1.10	0.16	3.52	0.57	1.141	2.88	5.722	1.164	1.020	1.26	2.74	n.d.	
90-110	0.896	3.77	18.07	3.864	2.107	1.024	1.14	0.49	3.12	1.36	0.642	5.47	7.83	2.159	2.159	0.707	1.10	0.15	3.27	0.57	1.120	1.53	7.708	1.132	1.011	2.28	2.59	n.d.	
100-120	0.893	7.13	17.71	2.801	2.121	1.052	1.18	0.26	3.17	1.43	0.640	6.60	7.95	1.962	2.138	0.714	1.12	0.13	3.21	0.58	1.123	2.01	6.753	1.139	1.014	1.75	2.62	n.d.	
110-130	0.901	4.36	18.04	3.614	2.120	1.036	1.15	0.43	3.16	1.39	0.642	10.91	7.17	1.532	2.260	0.745	1.16	0.08	3.59	0.63	1.123	0.89	10.126	1.130	1.006	3.94	2.58	n.d.	
120-140	0.903	7.67	17.86	2.729	2.135	1.070	1.19	0.24	3.21	1.47	0.649	6.65	7.17	1.980	2.280	0.720	1.11	0.13	3.65	0.60	1.127	0.64	11.994	1.132	1.004	5.52	2.59	n.d.	
130-150	0.902	3.69	18.26	3.930	2.110	1.032	1.14	0.50	3.13	1.38	0.652	7.53	8.18	1.870	2.146	0.735	1.13	0.11	3.23	0.61	1.134	0.93	10.046	1.142	1.006	3.87	2.63	n.d.	
140-160	0.899	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.660	3.53	8.58	2.763	2.121	0.717	1.09	0.25	3.16	0.58	1.134	1.30	8.463	1.145	1.009	2.75	2.65	n.d.	
150-170	0.907	6.97	18.49	2.874	2.106	1.072	1.18	0.27	3.12	1.47	0.663	5.68	6.72	2.191	2.409	0.727	1.10	0.16	4.08	0.61	1.149	1.12	9.250	1.158	1.008	3.28	2.71	n.d.	
160-180	0.919	4.53	18.69	3.614	2.125	1.063	1.16	0.43	3.18	1.45	0.666	5.07	7.59	2.328	2.276	0.730	1.10	0.18	3.64	0.61	1.151	2.84	5.818	1.175	1.020	1.30	2.79	n.d.	
170-190	0.923	2.72	18.92	4.687	2.120	1.051	1.14	0.72	3.16	1.42	0.666	4.71	7.77	2.418	2.252	0.728	1.09	0.19	3.56	0.61	1.157	0.57	13.091	1.161	1.004	6.58	2.73	n.d.	
180-200	0.933	5.45	19.62	3.346	2.105	1.096	1.17	0.37	3.12	1.52	0.670	6.52	7.67	2.065	2.278	0.745	1.11	0.14	3.64	0.63	1.160	1.73	7.522	1.174	1.012	2.17	2.79	n.d.	
190-210	0.933	5.34	20.29	3.378	2.070	1.099	1.18	0.37	3.01	1.51	0.675	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.170	2.82	5.940	1.193	1.020	1.35	2.88	n.d.	
200-220	0.937	5.71	19.94	3.281	2.096	1.105	1.18	0.35	3.09	1.53	0.678	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.174	0.65	12.375	1.180	1.005	5.88	2.81	n.d.	
210-230	0.936	4.03	19.93	3.907	2.096	1.086	1.16	0.50	3.09	1.49	0.679	4.86	8.21	2.425	2.231	0.745	1.10	0.19	3.50	0.63	1.174	0.41	15.524	1.177	1.003	9.25	2.80	n.d.	
220-240	0.944	7.08	20.40	2.971	2.088	1.133	1.20	0.29	3.07	1.59	0.680	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.174	0.94	10.300	1.182	1.007	4.07	2.82	n.d.	
230-250	0.941	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.682	7.46	7.60	1.967	2.331	0.766	1.12	0.13	3.82	0.67	1.186	1.74	7.670	1.201	1.012	2.26	2.91	n.d.	
240-260	0.930	5.41	20.14	3.348	2.071	1.095	1.18	0.37	3.02	1.51	0.687	4.80	8.46	2.467	2.223	0.755	1.10	0.20	3.47	0.65	1.216	0.40	16.484	1.220	1.003	10.43	3.01	n.d.	
250-270	0.949	3.29	20.43	4.385	2.099	1.097	1.16	0.63	3.10	1.52	0.690	4.12	8.28	2.675	2.257	0.752	1.09	0.24	3.58	0.64	1.203	0.57	13.584	1.208	1.004	7.08	2.95	n.d.	
260-280	0.951	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.696	5.89	8.01	2.257	2.316	0.771	1.11	0.17	3.77	0.68	1.220	1.69	7.986	1.235	1.012	2.45	3.08	n.d.	
270-290	0.953	4.15	19.94	3.916	2.133	1.107	1.16	0.50	3.20	1.55	0.698	3.52	8.45	2.929	2.261	0.758	1.09	0.28	3.59	0.65	1.213	2.93	6.034	1.238	1.021	1.40	3.10	n.d.	

Tabla B.15 Parámetros de ISE estimados con el método de Luco del evento 22-2, en los componentes L, T y torsión

Componente	Ventana	$\bar{f}_{1,N4SID}$	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m x10 ¹⁰	Nm/rad x10 ¹²	N/m x10 ⁸
L	0 - 20	0.953	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	10 - 30	0.966	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	20 - 40	0.930	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	30 - 50	0.910	6.26	15.60	3.043	2.301	1.047	1.15	0.30	3.73	1.46
	40 - 60	0.815	6.52	16.33	2.672	2.016	0.945	1.16	0.23	2.86	1.18
	50 - 70	0.804	3.14	16.03	3.796	2.006	0.902	1.12	0.47	2.83	1.09
	60 - 80	0.812	7.05	17.04	2.559	1.966	0.951	1.17	0.21	2.72	1.18
	70 - 90	0.820	2.67	16.93	4.207	1.993	0.922	1.12	0.58	2.79	1.12
	80 - 100	0.823	6.64	17.51	2.673	1.964	0.963	1.17	0.23	2.71	1.20
	90 - 110	0.829	4.13	17.50	3.414	1.981	0.948	1.14	0.38	2.76	1.17
	100 - 120	0.834	3.72	18.21	3.620	1.953	0.954	1.14	0.43	2.68	1.18
110 - 130	0.836	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
T	Ventana	$\bar{f}_{1,N4SID}$	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rL}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m x10 ¹⁰	Nm/rad x10 ¹²	N/m x10 ⁸
	0 - 20	0.790	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	10 - 30	0.752	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	20 - 40	0.716	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	30 - 50	0.735	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	40 - 60	0.673	9.75	8.66	1.697	2.154	0.780	1.16	0.09	3.26	0.68
	50 - 70	0.657	5.73	6.86	2.161	2.363	0.721	1.10	0.15	3.92	0.60
	60 - 80	0.659	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	70 - 90	0.666	7.50	8.39	1.915	2.166	0.752	1.13	0.12	3.30	0.64
	80 - 100	0.683	5.06	8.39	2.389	2.219	0.752	1.10	0.19	3.46	0.64
90 - 110	0.681	10.49	9.17	1.657	2.119	0.799	1.17	0.09	3.15	0.71	
100 - 120	0.690	2.68	7.51	3.320	2.373	0.739	1.07	0.36	3.96	0.63	
110 - 130	0.689	2.44	7.94	3.474	2.303	0.738	1.07	0.40	3.72	0.62	
Torsión	Ventana	$\bar{f}_{1t,N4SID}$	$\frac{\Phi_{rv}}{\Phi_{rv}^{az}}$	f_r	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	K_r	K_{1t}			
	(s)	(Hz)	(%)	(Hz)	(Hz)	-	Nm/rad x10 ¹²	Nm/rad x10 ¹⁰			
	0 - 20	1.198	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	10 - 30	1.207	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	20 - 40	1.175	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	30 - 50	1.163	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	40 - 60	1.032	2.10	6.064	1.047	1.015	1.41	2.22			
	50 - 70	1.042	1.03	8.735	1.049	1.007	2.93	2.23			
	60 - 80	1.051	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	70 - 90	1.057	1.94	6.468	1.071	1.014	1.61	2.32			
	80 - 100	1.064	0.95	9.294	1.071	1.007	3.32	2.32			
90 - 110	1.067	0.85	9.875	1.073	1.006	3.74	2.33				
100 - 120	1.073	1.88	6.660	1.087	1.013	1.70	2.39				
110 - 130	1.077	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.				

B.2 Estimación a partir de las frecuencias del sistema obtenidas con el método de MM

Tabla B.16 Parámetros de ISE estimados con el método de MM y con el método de Luco del evento 01-1, en los componentes L, T y torsión

		Estimación con el método de minimización modal (MM) por Taborda et al., (2003)			Estimación con el método de Luco por el autor									
Componente L	Ventana	\bar{f}_1	f_1	\bar{f}_1/f_1	Ventana Espectral	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(Hz)	-	(s)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m x10 ¹⁰	Nm/rad x10 ¹²	N/m x10 ⁸
	5 - 15	1.117	n.d.	n.d.	0 - 20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	15 - 35	1.023	1.410	1.38	15 - 35	5.28	29.94	3.728	1.868	1.294	1.27	0.45	2.46	1.82
	30 - 40	0.988	1.343	1.36	25 - 45	7.18	28.85	3.088	1.838	1.266	1.28	0.31	2.38	1.75
	35 - 55	0.986	1.205	1.22	35 - 55	4.97	29.05	3.702	1.828	1.234	1.25	0.45	2.35	1.68
	50 - 60	0.989	1.210	1.22	45 - 65	5.60	28.39	3.498	1.855	1.240	1.25	0.40	2.42	1.71
	60 - 70	0.994	1.177	1.18	55 - 75	2.32	27.24	5.467	1.903	1.193	1.20	0.98	2.55	1.64
	70 - 80	1.009	1.179	1.17	65 - 85	6.53	27.49	3.306	1.923	1.270	1.26	0.36	2.60	1.81
	80 - 90	1.003	1.174	1.17	75 - 95	4.00	26.99	4.196	1.929	1.223	1.22	0.57	2.62	1.72
	90 - 100	1.013	1.169	1.15	85 - 105	13.71	26.75	2.291	1.957	1.383	1.37	0.17	2.69	2.05
	100 - 110	1.027	1.179	1.15	95 - 115	3.42	28.68	4.650	1.916	1.260	1.23	0.71	2.58	1.78
	110 - 120	1.012	1.178	1.16	105 - 125	5.73	26.24	3.539	1.974	1.250	1.24	0.41	2.74	1.79
	115 - 135	1.021	1.238	1.21	115 - 135	3.31	26.05	4.699	1.999	1.227	1.20	0.72	2.81	1.76
	130 - 140	1.029	1.254	1.22	125 - 145	7.96	26.77	3.054	1.987	1.309	1.27	0.30	2.78	1.92
	135 - 155	1.020	1.238	1.21										
Componente T	Ventana	\bar{f}_1	f_1	\bar{f}_1/f_1	Ventana Espectral	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rL}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(Hz)	-	(s)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m x10 ¹⁰	Nm/rad x10 ¹²	N/m x10 ⁸
	5 - 15	0.872	n.d.	n.d.	0 - 20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	15 - 35	0.819	0.98	1.20	15 - 35	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	30 - 40	0.792	0.876	1.11	25 - 45	3.84	14.95	3.182	1.929	0.903	1.14	0.33	2.61	0.85
	35 - 55	0.787	0.889	1.13	35 - 55	7.78	16.05	2.221	1.850	0.945	1.20	0.16	2.40	0.90
	50 - 60	0.785	0.881	1.12	45 - 65	2.75	15.16	3.725	1.899	0.886	1.13	0.46	2.53	0.82
	60 - 70	0.788	0.894	1.13	55 - 75	9.67	14.32	1.996	1.961	0.954	1.21	0.13	2.70	0.93
	70 - 80	0.788	0.882	1.12	65 - 85	3.20	14.86	3.467	1.925	0.892	1.13	0.39	2.60	0.83
	80 - 90	0.793	0.872	1.10	75 - 95	6.74	14.04	2.405	1.993	0.926	1.17	0.19	2.79	0.89
	90 - 100	0.797	0.884	1.11	85 - 105	2.42	14.12	4.033	1.998	0.890	1.12	0.53	2.80	0.84
	100 - 110	0.799	0.873	1.09	95 - 115	4.66	13.58	2.915	2.042	0.910	1.14	0.28	2.93	0.87
	110 - 120	0.798	0.868	1.09	105 - 125	2.71	14.54	3.817	1.971	0.897	1.12	0.48	2.73	0.84
	115 - 135	0.801	0.899	1.12	115 - 135	2.92	14.67	3.692	1.970	0.903	1.13	0.45	2.73	0.85
	130 - 140	0.806	0.903	1.12	125 - 145	3.51	14.22	3.390	2.013	0.911	1.13	0.38	2.85	0.87
	135 - 155	0.810	0.895	1.10										
Torsión	Ventana	\bar{f}_{1t}	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	Ventana Espectral	$\frac{\Phi_{rV}}{\Phi_{rV}^{az}}$	f_r	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	K_r	K_{1t}			
	(s)	(Hz)	(Hz)	-	(s)	(%)	(Hz)	(Hz)	-	Nm/rad x10 ¹²	Nm/rad x10 ¹⁰			
	5 - 15	1.537	n.d.	n.d.	0 - 20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	15 - 35	1.302	1.480	1.137	15 - 35	1.73	8.424	1.318	1.012	2.72	3.51			
	30 - 40	1.311	1.455	1.110	25 - 45	1.73	8.496	1.327	1.012	2.77	3.56			
	35 - 55	1.320	1.394	1.056	35 - 55	1.70	8.612	1.336	1.012	2.85	3.61			
	50 - 60	1.316	1.381	1.049	45 - 65	1.14	10.483	1.326	1.008	4.22	3.56			
	60 - 70	1.284	1.365	1.063	55 - 75	1.79	8.183	1.300	1.013	2.57	3.42			
	70 - 80	1.316	1.355	1.030	65 - 85	1.79	8.379	1.333	1.013	2.69	3.59			
	80 - 90	1.316	1.346	1.023	75 - 95	1.32	9.757	1.328	1.009	3.65	3.56			
	90 - 100	1.342	1.348	1.004	85 - 105	1.36	9.814	1.355	1.009	3.70	3.71			
	100 - 110	1.339	1.371	1.024	95 - 115	0.85	12.347	1.347	1.006	5.85	3.67			
	110 - 120	1.326	1.372	1.035	105 - 125	0.71	13.436	1.333	1.005	6.93	3.59			
	115 - 135	1.348	1.379	1.023	115 - 135	2.13	7.876	1.368	1.015	2.38	3.78			
	130 - 140	1.331	1.386	1.041	125 - 145	1.58	9.013	1.346	1.011	3.12	3.66			
	135 - 155	1.349	1.385	1.027										

Tabla B.17 Parámetros de ISE estimados con el método de MM y con el método de Luco del evento 02-1, en los componentes L, T y torsión

		Estimación con el método de minimización modal (MM) por Taborda <i>et al.</i> , (2003)			Estimación con el método de Luco por el autor									
Componente L	Ventana	\bar{f}_1	f_1	\bar{f}_1/f_1	Ventana Espectral	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(Hz)	-	(s)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m x10 ¹⁰	Nm/rad x10 ¹²	N/m x10 ⁸
	0 - 10	1.088	1.252	1.15	0 - 15	2.27	24.41	6.045	2.200	1.279	1.18	1.19	3.41	1.97
	10 - 20	1.08	1.199	1.11	5 - 25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	20 - 30	1.015	1.205	1.19	15 - 35	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	30 - 40	1.022	1.198	1.17	25 - 45	5.35	27.57	3.700	1.945	1.270	1.24	0.45	2.66	1.82
	40 - 50	1.019	1.13	1.11	35 - 55	3.10	27.62	4.848	1.938	1.236	1.21	0.77	2.64	1.75
	50 - 60	1.024	1.265	1.24	45 - 65	3.72	27.04	4.442	1.968	1.245	1.22	0.64	2.72	1.78
	60 - 70	1.037	1.214	1.17	55 - 75	1.52	27.48	7.051	1.977	1.237	1.19	1.62	2.75	1.77
	65 - 85	1.045	1.215	1.16	65 - 85	1.37	28.50	7.480	1.956	1.253	1.20	1.83	2.69	1.79
	80 - 90	1.045	1.256	1.20	75 - 95	2.56	29.28	5.471	1.930	1.276	1.22	0.98	2.62	1.82
80 - 100	1.049	1.232	1.17	80 - 100	3.85	27.82	4.478	1.987	1.285	1.22	0.65	2.78	1.87	
Componente T	Ventana	\bar{f}_1	f_1	\bar{f}_1/f_1	Ventana Espectral	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rL}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(Hz)	-	(s)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m x10 ¹⁰	Nm/rad x10 ¹²	N/m x10 ⁸
	0 - 10	0.835	0.91	1.09	0 - 20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	10 - 20	0.802	0.881	1.10	15 - 35	5.61	12.91	2.666	2.102	0.918	1.14	0.23	3.11	0.89
	20 - 30	0.795	0.881	1.11	25 - 45	4.41	15.34	2.981	1.912	0.914	1.15	0.29	2.57	0.86
	30 - 40	0.811	0.891	1.10	35 - 55	6.87	16.08	2.437	1.905	0.964	1.19	0.20	2.55	0.94
	40 - 50	0.804	0.901	1.12	45 - 65	5.05	13.95	2.818	2.028	0.921	1.15	0.26	2.89	0.89
	50 - 60	0.808	0.901	1.12	55 - 75	1.84	14.11	4.689	2.025	0.897	1.11	0.72	2.88	0.85
	60 - 70	0.821	0.895	1.09	65 - 85	3.65	14.42	3.385	2.036	0.930	1.13	0.38	2.91	0.91
	65 - 85	0.822	0.893	1.09	75 - 95	2.10	14.85	4.462	2.009	0.920	1.12	0.65	2.84	0.88
	80 - 90	0.839	0.909	1.08	85 - 105	5.77	13.99	2.749	2.112	0.969	1.16	0.25	3.13	0.98
80 - 100	0.825	0.898	1.09	95 - 115	4.03	14.59	3.235	2.034	0.940	1.14	0.34	2.91	0.92	
Torsión	Ventana	\bar{f}_{1t}	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	Ventana Espectral	$\frac{\Phi_{rV}}{\Phi_{rV}^{az}}$	f_r	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	K_r	K_{1t}			
	(s)	(Hz)	(Hz)	-	(s)	(%)	(Hz)	(Hz)	-	Nm/rad x10 ¹²	Nm/rad x10 ¹⁰			
	0 - 10	1.486	1.379	0.928	0 - 20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	10 - 20	1.351	1.377	1.019	15 - 35	3.48	6.166	1.385	1.025	1.46	3.87			
	20 - 30	1.313	1.362	1.037	25 - 45	1.11	10.630	1.323	1.008	4.34	3.54			
	30 - 40	1.391	1.372	0.986	35 - 55	1.15	11.043	1.402	1.008	4.68	3.97			
	40 - 50	1.34	1.361	1.016	45 - 65	1.17	10.555	1.351	1.008	4.28	3.69			
	50 - 60	1.325	1.381	1.042	55 - 75	1.02	11.186	1.334	1.007	4.80	3.60			
	60 - 70	1.368	1.389	1.015	65 - 85	0.47	17.030	1.372	1.003	11.13	3.81			
	65 - 85	1.363	1.373	1.007	75 - 95	1.86	8.516	1.381	1.013	2.78	3.85			
	80 - 90	1.395	1.410	1.011	85 - 105	2.85	7.043	1.423	1.020	1.90	4.09			
80 - 100	1.367	1.430	1.046	95 - 115	0.50	16.434	1.372	1.003	10.37	3.80				

Tabla B.18 Parámetros de ISE estimados con el método de MM y con el método de Luco del evento 02-2, en los componentes L, T y torsión

		Estimación con el método de minimización modal (MM) por Taborda, (2003)			Estimación con el método de Luco por el autor									
Componente L	Ventana	\bar{f}_1	f_1	\bar{f}_1/f_1	Ventana Espectral	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(Hz)	-	(s)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m x10 ¹⁰	Nm/rad x10 ¹²	N/m x10 ⁸
	0 - 10	1.080	1.201	1.11	0 - 15	2.33	31.36	5.918	1.927	1.337	1.24	1.14	2.61	1.94
	10 - 20	1.090	1.261	1.16	5 - 25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	20 - 30	1.010	1.170	1.16	15 - 35	4.55	25.20	3.963	2.011	1.222	1.21	0.51	2.84	1.75
	30 - 40	1.020	1.224	1.20	25 - 45	8.12	26.31	2.997	1.987	1.295	1.27	0.29	2.78	1.89
	40 - 50	1.030	1.176	1.14	35 - 55	4.71	27.69	3.975	1.956	1.272	1.24	0.52	2.69	1.83
	50 - 60	1.050	1.206	1.15	45 - 65	2.94	28.02	5.123	1.982	1.276	1.22	0.86	2.76	1.85
	60 - 70	1.040	1.182	1.14	55 - 75	1.89	26.83	6.328	2.006	1.239	1.19	1.31	2.83	1.79
	65 - 85	1.050	1.178	1.12	65 - 85	8.81	26.47	2.961	2.040	1.345	1.28	0.29	2.93	2.03
	80 - 90	1.040	1.243	1.20	75 - 95	3.42	27.69	4.708	1.975	1.267	1.22	0.72	2.74	1.83
80 - 100	1.050	1.271	1.21	85 - 105	2.11	27.95	6.054	1.985	1.264	1.20	1.20	2.77	1.83	
Componente T	Ventana	\bar{f}_1	f_1	\bar{f}_1/f_1	Ventana Espectral	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rL}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(Hz)	-	(s)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m x10 ¹⁰	Nm/rad x10 ¹²	N/m x10 ⁸
	0 - 10	0.870	0.898	1.03	0 - 20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	10 - 20	0.860	0.900	1.05	15 - 35	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	20 - 30	0.760	0.890	1.17	25 - 45	7.88	12.00	2.132	2.066	0.885	1.16	0.15	3.00	0.84
	30 - 40	0.810	0.865	1.07	35 - 55	4.55	13.26	2.989	2.095	0.919	1.13	0.29	3.08	0.90
	40 - 50	0.810	0.900	1.11	45 - 65	3.35	13.59	3.486	2.069	0.910	1.12	0.40	3.01	0.88
	50 - 60	0.870	0.933	1.07	55 - 75	5.94	15.83	2.811	2.060	1.021	1.17	0.26	2.98	1.06
	60 - 70	0.820	0.897	1.09	65 - 85	4.60	13.63	3.012	2.091	0.933	1.14	0.30	3.07	0.92
	65 - 85	0.820	0.877	1.07	75 - 95	2.37	13.83	4.190	2.077	0.913	1.11	0.58	3.03	0.88
	80 - 90	0.830	0.907	1.09	85 - 105	2.48	14.32	4.151	2.066	0.929	1.12	0.57	3.00	0.91
80 - 100	0.820	0.904	1.10	95 - 115	2.49	14.93	4.088	1.998	0.922	1.12	0.55	2.81	0.89	
Torsión	Ventana	\bar{f}_{1t}	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	Ventana Espectral	$\frac{\Phi_{rV}}{\Phi_{rV}^{az}}$	f_r	f_{1t}	\bar{f}_{1t}/f_{1t}	K_r	K_{1t}			
	(s)	(Hz)	(Hz)	-	(s)	(%)	(Hz)	(Hz)	-	Nm/rad x10 ¹²	Nm/rad x10 ¹⁰			
	0 - 10	1.460	1.420	0.973	0 - 20	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	10 - 20	1.440	1.451	1.008	15 - 35	1.70	9.406	1.457	1.012	3.40	4.29			
	20 - 30	1.340	1.446	1.079	25 - 45	0.45	17.107	1.344	1.003	11.23	3.65			
	30 - 40	1.400	1.466	1.047	35 - 55	5.49	5.088	1.456	1.040	0.99	4.29			
	40 - 50	1.420	1.438	1.013	45 - 65	2.93	7.064	1.450	1.021	1.92	4.25			
	50 - 60	1.340	1.411	1.053	55 - 75	2.37	7.417	1.362	1.017	2.11	3.75			
	60 - 70	1.370	1.408	1.028	65 - 85	0.69	14.011	1.377	1.005	7.53	3.83			
	65 - 85	1.350	1.423	1.054	75 - 95	0.69	13.813	1.356	1.005	7.32	3.72			
	80 - 90	1.370	1.425	1.040	85 - 105	1.62	9.180	1.386	1.011	3.23	3.88			
80 - 100	1.450	1.428	0.985	95 - 115	1.11	11.746	1.461	1.008	5.30	4.31				

Tabla B.19 Parámetros de ISE estimados con el método de MM y con el método de Luco del evento 03-1, en los componentes L, T y en torsión

	Estimación con el método de minimización modal (MM) por Taborda, (2003)				Estimación con el método de Luco por el autor									
	Ventana	\bar{f}_1	f_1	\bar{f}_1/f_1	Ventana Espectral	$\frac{X_b}{X_{tot}^{az}}$	$\frac{H\Phi_{rT}}{X_{tot}^{az}}$	f_h	f_c	f_1	\bar{f}_1/f_1	K_h	K_c	K_1
	(s)	(Hz)	(Hz)	-	(s)	(%)	(%)	(Hz)	(Hz)	(Hz)	-	N/m $\times 10^{10}$	Nm/rad $\times 10^{12}$	N/m $\times 10^8$
Componente L	0-10	1.076	n.d.	n.d.	0 - 15	3.32	30.05	4.944	1.961	1.333	1.24	0.80	2.71	1.95
	10-20	1.054	n.d.	n.d.	5 - 25	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	20-30	1.064	n.d.	n.d.	15 - 35	3.31	28.10	4.897	2.006	1.299	1.22	0.78	2.83	1.91
	30-40	1.052	n.d.	n.d.	25 - 45	4.10	27.30	4.349	2.012	1.287	1.22	0.62	2.85	1.89
	40-50	1.032	n.d.	n.d.	35 - 55	2.35	27.22	5.639	1.976	1.239	1.20	1.04	2.75	1.77
	50-60	1.044	n.d.	n.d.	45 - 65	2.68	27.98	5.343	1.972	1.265	1.21	0.93	2.74	1.82
	60-70	1.082	n.d.	n.d.	55 - 75	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
	70-80	1.034	n.d.	n.d.	65 - 85	17.69	28.97	2.058	1.920	1.529	1.48	0.14	2.59	2.30
	80-90	0.995	n.d.	n.d.	75 - 95	7.87	27.29	2.969	1.903	1.269	1.28	0.29	2.55	1.79
	90-100	0.991	n.d.	n.d.	85 - 105	8.71	28.12	2.810	1.868	1.286	1.30	0.26	2.45	1.80
	110-120	0.991	n.d.	n.d.	105 - 125	2.67	27.05	5.077	1.904	1.192	1.20	0.84	2.55	1.64
	115-135	0.994	n.d.	n.d.	115 - 135	5.31	26.53	3.611	1.929	1.225	1.23	0.43	2.62	1.72
	130-140	0.986	n.d.	n.d.	125 - 145	5.67	26.36	3.468	1.919	1.218	1.24	0.39	2.59	1.70
	140-150	1.010	n.d.	n.d.	135 - 155	9.96	26.27	2.680	1.969	1.310	1.30	0.23	2.73	1.91
	150-160	1.011	n.d.	n.d.	145 - 165	3.89	27.05	4.293	1.942	1.232	1.22	0.60	2.65	1.74
	160-170	1.020	n.d.	n.d.	155 - 175	2.04	27.48	5.984	1.944	1.223	1.20	1.17	2.66	1.72
	170-180	1.024	n.d.	n.d.	165 - 185	1.61	27.19	6.754	1.962	1.220	1.19	1.49	2.71	1.73
	180-190	1.015	n.d.	n.d.	175 - 195	7.26	26.93	3.152	1.954	1.282	1.26	0.32	2.69	1.85
	Componente T	0-10	0.846	n.d.	n.d.	0 - 15	7.80	15.00	2.385	2.057	1.008	1.19	0.19	2.97
10-20		0.83	n.d.	n.d.	5 - 25	7.21	13.09	2.434	2.160	0.967	1.17	0.19	3.28	0.99
20-30		0.858	n.d.	n.d.	15 - 35	5.93	14.38	2.774	2.131	0.996	1.16	0.25	3.19	1.03
30-40		0.836	n.d.	n.d.	25 - 45	6.69	13.90	2.546	2.112	0.975	1.17	0.21	3.13	0.99
40-50		0.815	n.d.	n.d.	35 - 55	3.58	13.66	3.393	2.077	0.918	1.13	0.38	3.03	0.89
50-60		0.819	n.d.	n.d.	45 - 65	3.19	13.66	3.609	2.087	0.919	1.12	0.43	3.06	0.89
60-70		0.819	n.d.	n.d.	55 - 75	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
70-80		0.796	n.d.	n.d.	65 - 85	5.49	13.07	2.676	2.074	0.911	1.14	0.24	3.02	0.88
80-90		0.783	n.d.	n.d.	75 - 95	5.63	12.19	2.599	2.112	0.891	1.14	0.22	3.13	0.85
90-100		0.775	n.d.	n.d.	85 - 105	4.94	13.06	2.745	2.020	0.881	1.14	0.25	2.87	0.83
110-120		0.767	n.d.	n.d.	105 - 125	4.38	13.18	2.885	1.990	0.868	1.13	0.27	2.78	0.80
115-135		0.771	n.d.	n.d.	115 - 135	3.69	13.39	3.159	1.985	0.868	1.13	0.33	2.77	0.80
130-140		0.778	n.d.	n.d.	125 - 145	5.65	12.72	2.578	2.054	0.889	1.14	0.22	2.96	0.84
140-150		0.791	n.d.	n.d.	135 - 155	7.90	12.10	2.216	2.142	0.922	1.17	0.16	3.22	0.91
150-160		0.788	n.d.	n.d.	145 - 165	3.14	13.30	3.505	2.035	0.881	1.12	0.40	2.91	0.83
160-170		0.783	n.d.	n.d.	155 - 175	4.40	14.49	2.940	1.937	0.895	1.14	0.28	2.64	0.83
170-180		0.787	n.d.	n.d.	165 - 185	4.30	14.99	2.988	1.914	0.902	1.15	0.29	2.57	0.84
180-190		0.791	n.d.	n.d.	175 - 195	2.02	14.92	4.379	1.928	0.885	1.12	0.63	2.61	0.82
Torsión		0-10	1.550	n.d.	n.d.	0 - 15	3.52	7.039	1.589	1.025	1.90	5.10		
	10-20	1.600	n.d.	n.d.	5 - 25	8.13	4.779	1.698	1.061	0.88	5.83			
	20-30	1.668	n.d.	n.d.	15 - 35	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.			
	30-40	1.390	n.d.	n.d.	25 - 45	1.14	11.088	1.401	1.008	4.72	3.97			
	40-50	1.392	n.d.	n.d.	35 - 55	1.23	10.698	1.404	1.009	4.39	3.98			
	50-60	1.393	n.d.	n.d.	45 - 65	1.24	10.663	1.405	1.009	4.36	3.99			
	60-70	1.452	n.d.	n.d.	55 - 75	2.44	7.926	1.477	1.017	2.41	4.41			
	70-80	1.324	n.d.	n.d.	65 - 85	1.39	9.565	1.337	1.010	3.51	3.61			
	80-90	1.328	n.d.	n.d.	75 - 95	1.08	10.881	1.338	1.008	4.54	3.62			
	90-100	1.304	n.d.	n.d.	85 - 105	1.52	9.011	1.318	1.011	3.12	3.51			
	110-120	1.329	n.d.	n.d.	105 - 125	1.20	10.341	1.340	1.008	4.10	3.63			
	115-135	1.331	n.d.	n.d.	115 - 135	1.90	8.218	1.349	1.013	2.59	3.68			
	130-140	1.324	n.d.	n.d.	125 - 145	0.87	12.091	1.332	1.006	5.61	3.59			
	140-150	1.341	n.d.	n.d.	135 - 155	0.45	16.973	1.345	1.003	11.06	3.66			
	150-160	1.346	n.d.	n.d.	145 - 165	0.73	13.409	1.353	1.005	6.90	3.70			
	160-170	1.321	n.d.	n.d.	155 - 175	0.71	13.364	1.328	1.005	6.85	3.56			
	170-180	1.314	n.d.	n.d.	165 - 185	0.71	13.330	1.320	1.005	6.82	3.52			
	180-190	1.349	n.d.	n.d.	175 - 195	1.00	11.486	1.358	1.007	5.06	3.73			

Apéndice C. Cocientes de Nakamura y espectros de respuesta las estaciones de campo

C.1 Edificio SIS

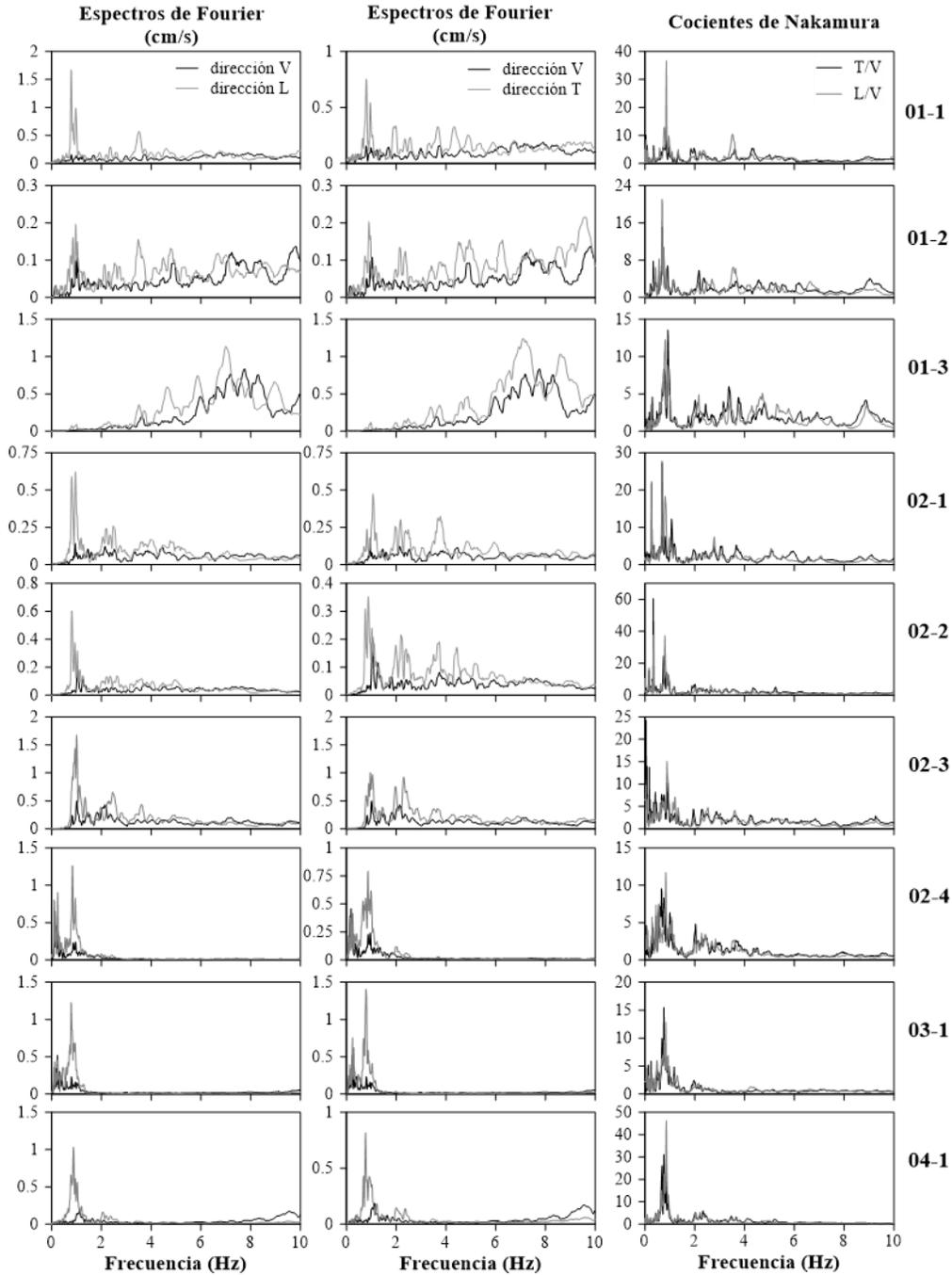


Figura C.1 Espectros de Fourier en las direcciones L, T y V, y cocientes de Nakamura calculados con la fase final de los registros de la estación SIS de los eventos 01-1 a 04-1

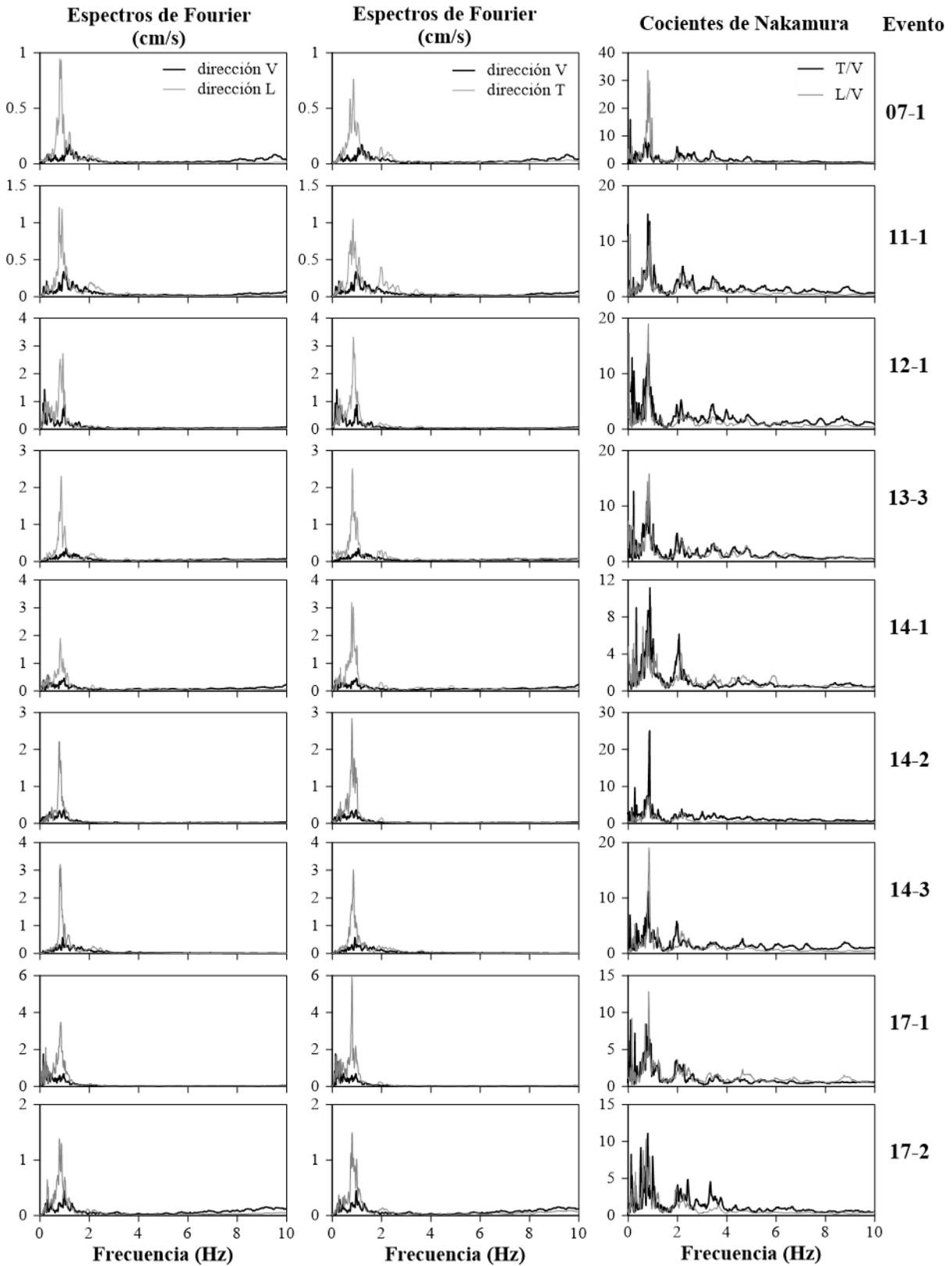


Figura C.2 Espectros de Fourier en las direcciones L, T y V, y cocientes de Nakamura calculados con la fase final de los registros de la estación SIS de los eventos 07-1 a 17-2

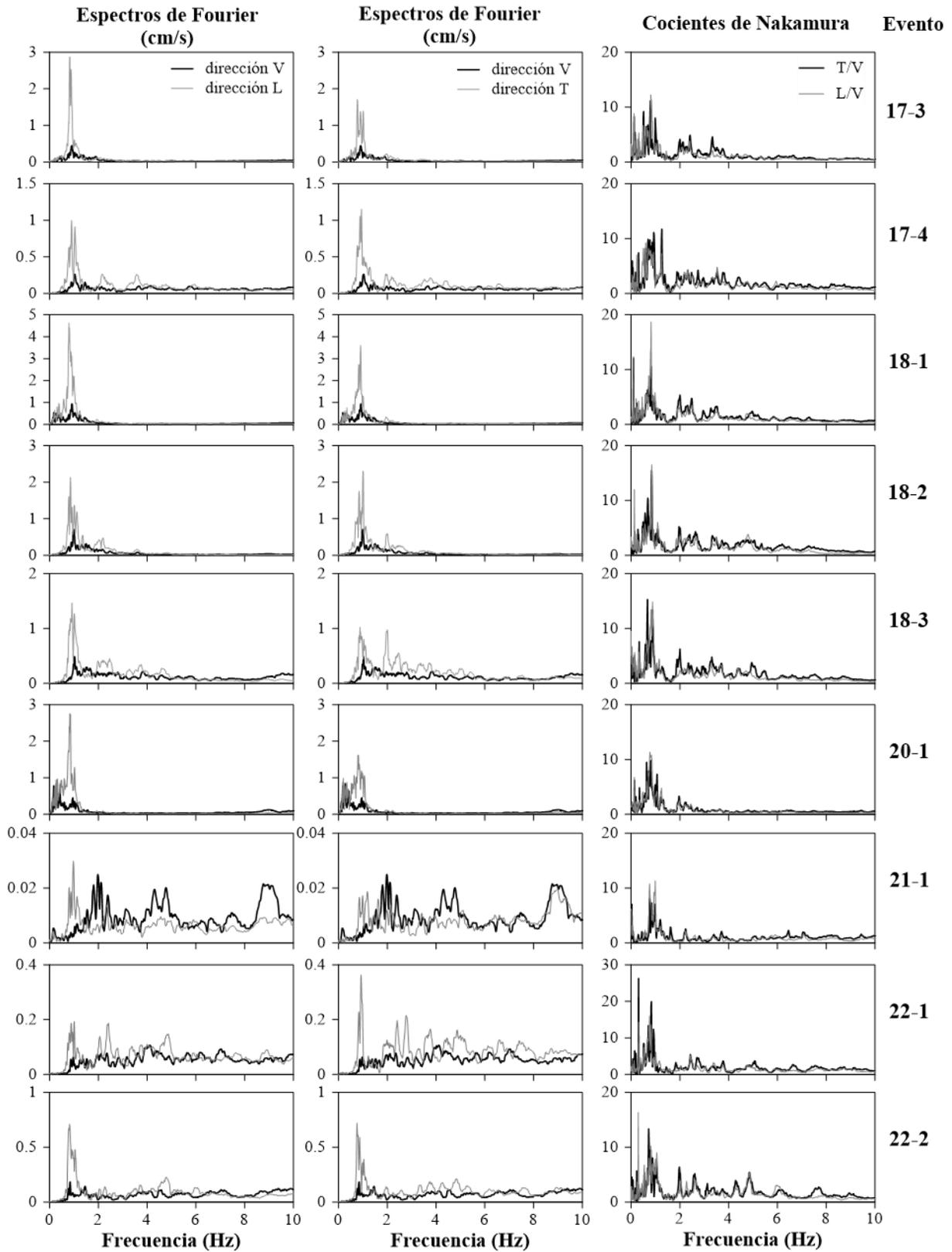


Figura C.3 Espectros de Fourier en las direcciones L, T y V, y cocientes de Nakamura calculados con la fase final de los registros de la estación SIS de los eventos 17-3 a 22-1

C.2 Estaciones del II-UNAM ubicadas en Acapulco

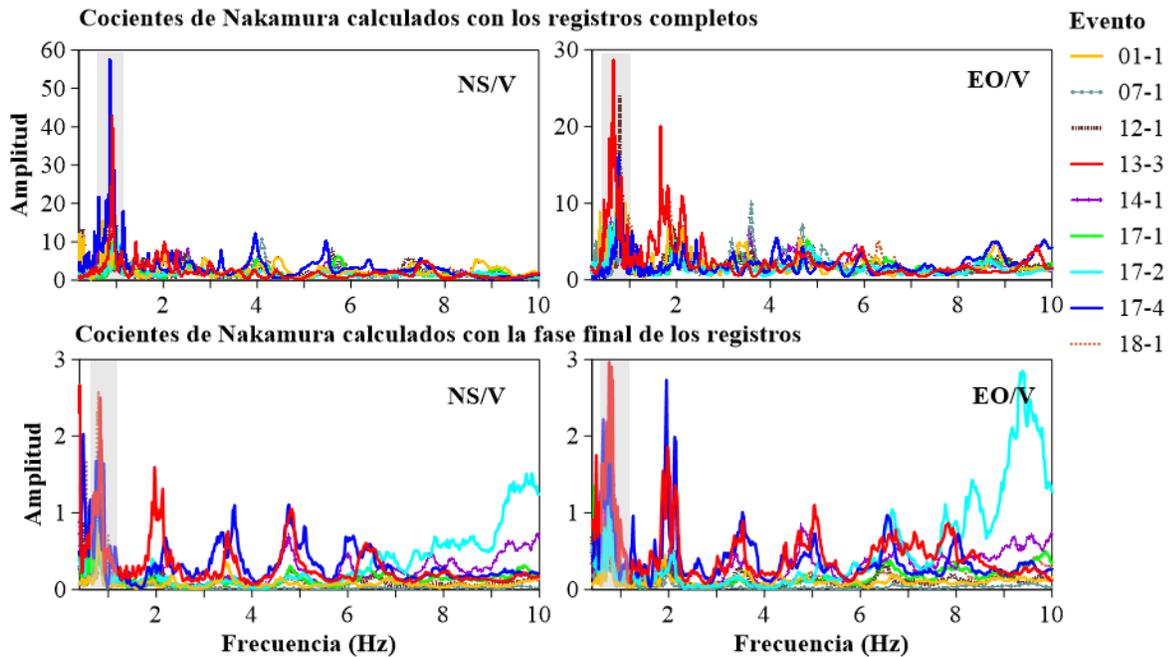


Figura C.4 Cocientes de Nakamura de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo ACAZ (suelo blando). La franja gris representa la banda de frecuencias en donde se identifican los valores de la frecuencia del sitio asociados a las $Amp_{m\acute{a}x}$

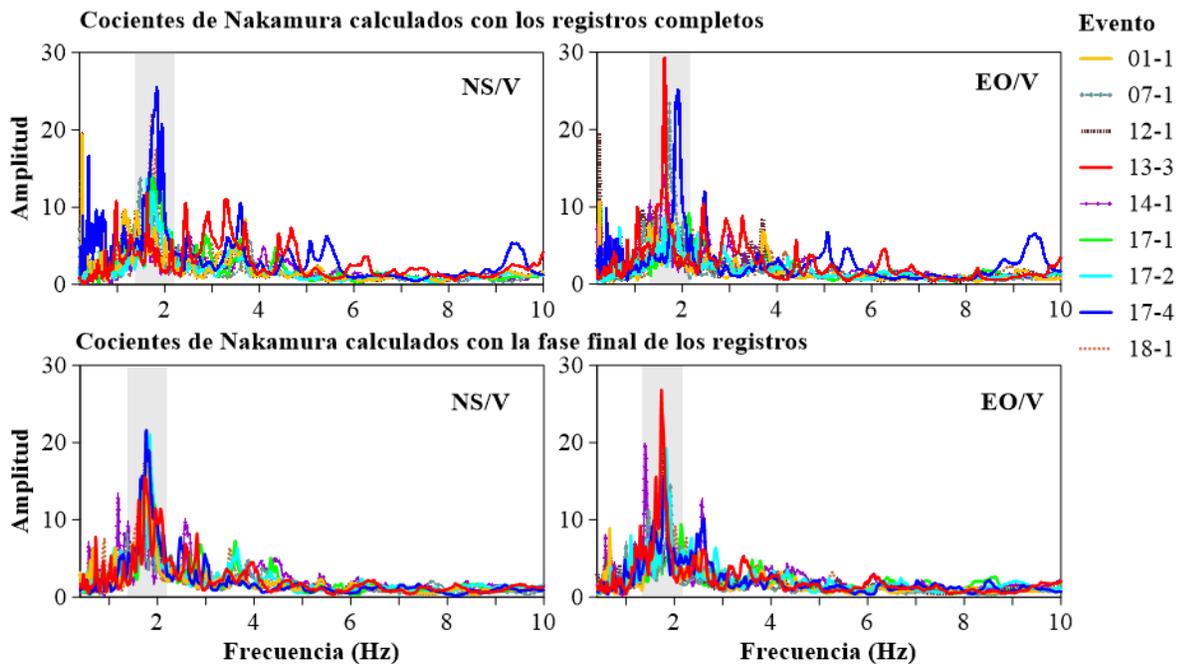


Figura C.5 Cocientes de Nakamura de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo ACAC (suelo intermedio). La franja gris representa la banda de frecuencias en donde se identifican los valores de la frecuencia del sitio asociados a las $Amp_{m\acute{a}x}$

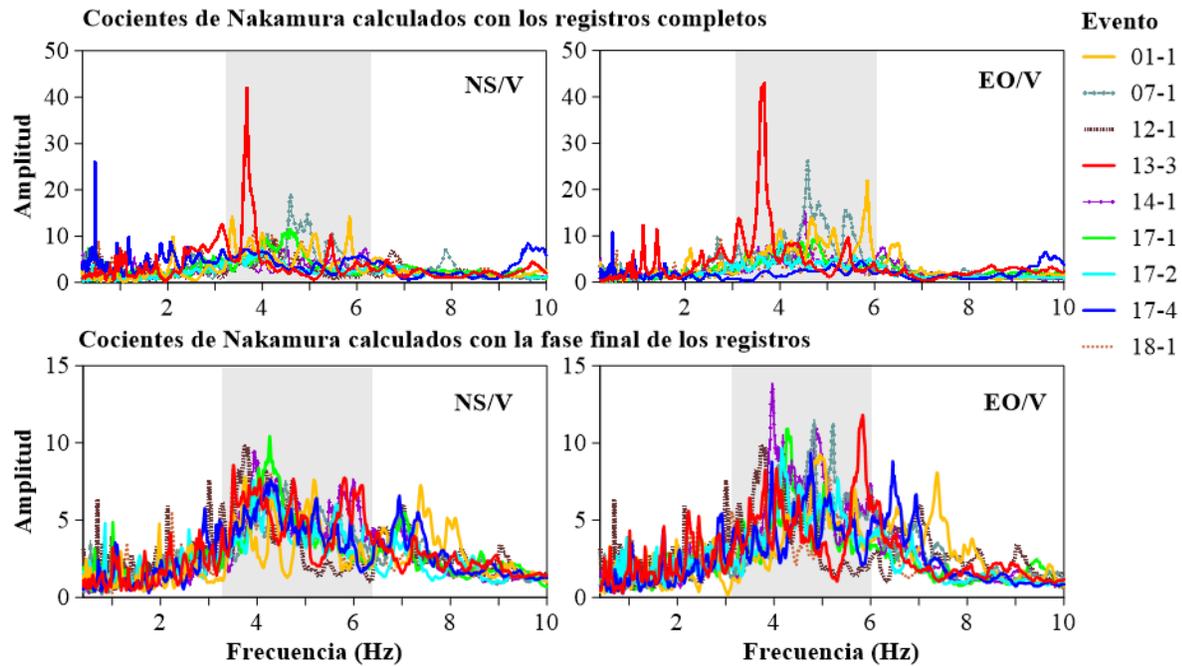
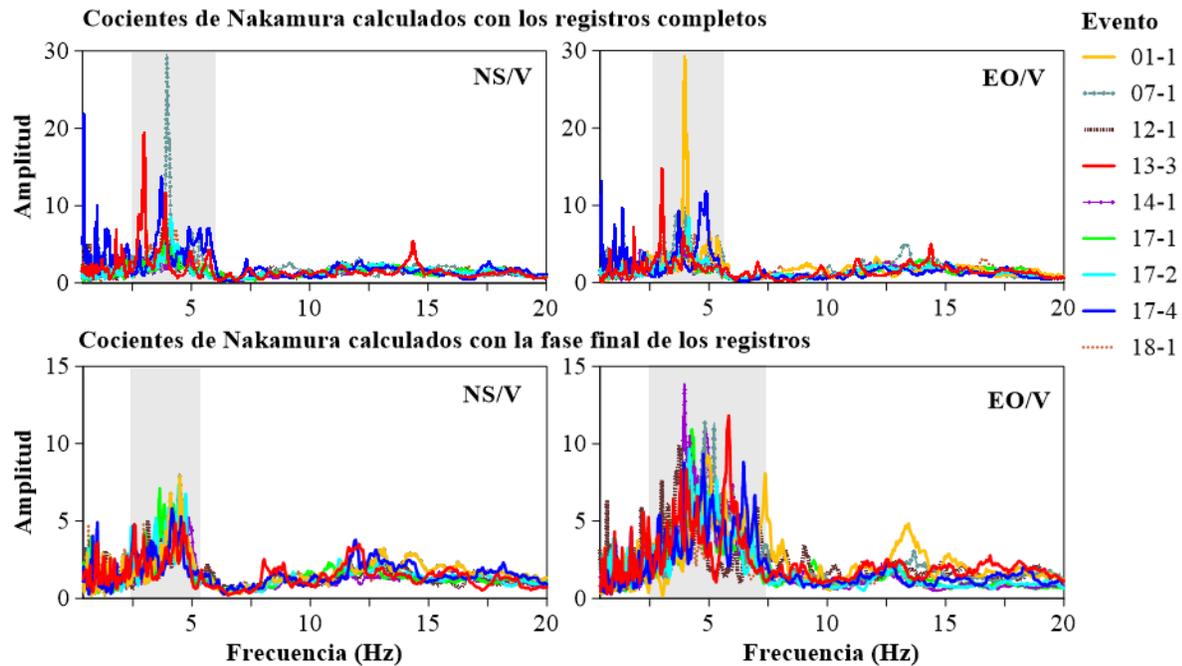


Figura C.6 Cocientes de Nakamura de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo ACAD (suelo intermedio). La franja gris representa la banda de frecuencias en donde se identifican los valores de la frecuencia del sitio asociado a la $Amp_{m\acute{a}x}$



Figuras C.7 Cocientes de Nakamura de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo ACP2 (suelo intermedio). La franja gris representa la banda de frecuencias en donde se identifican los valores de la frecuencia del sitio asociados a las $Amp_{m\acute{a}x}$

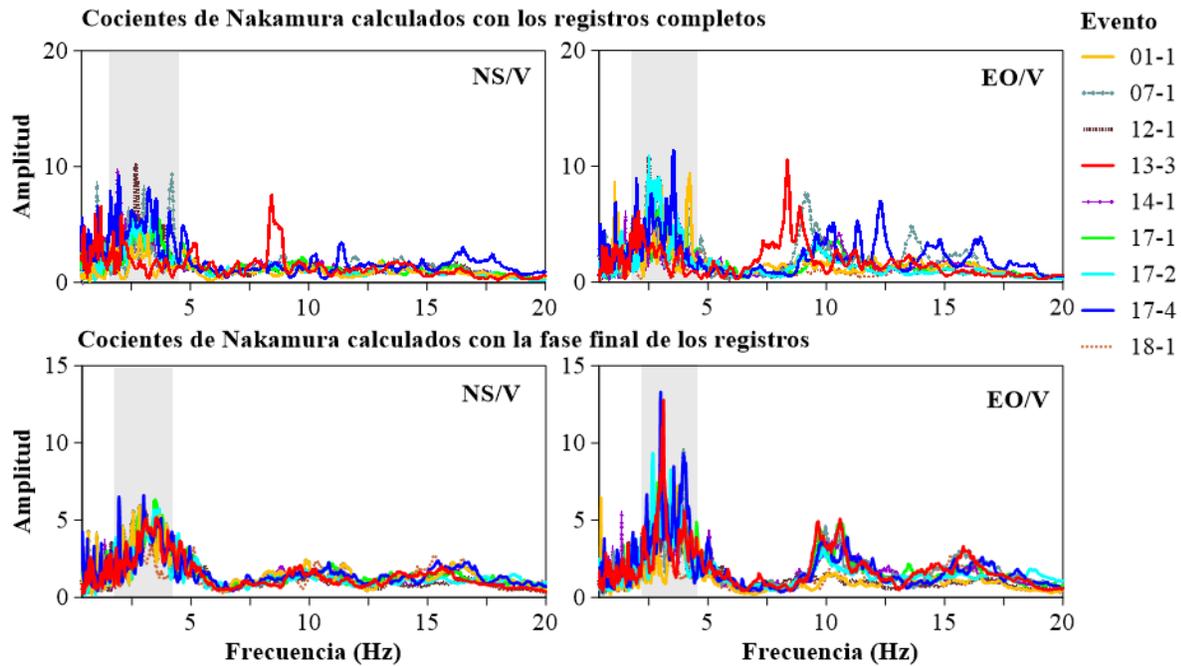


Figura C.8 Cocientes de Nakamura de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo ACAR (suelo intermedio). La franja gris representa la banda de frecuencias en donde se identifican los valores de la frecuencia del sitio asociados a las $Amp_{m\acute{a}x}$

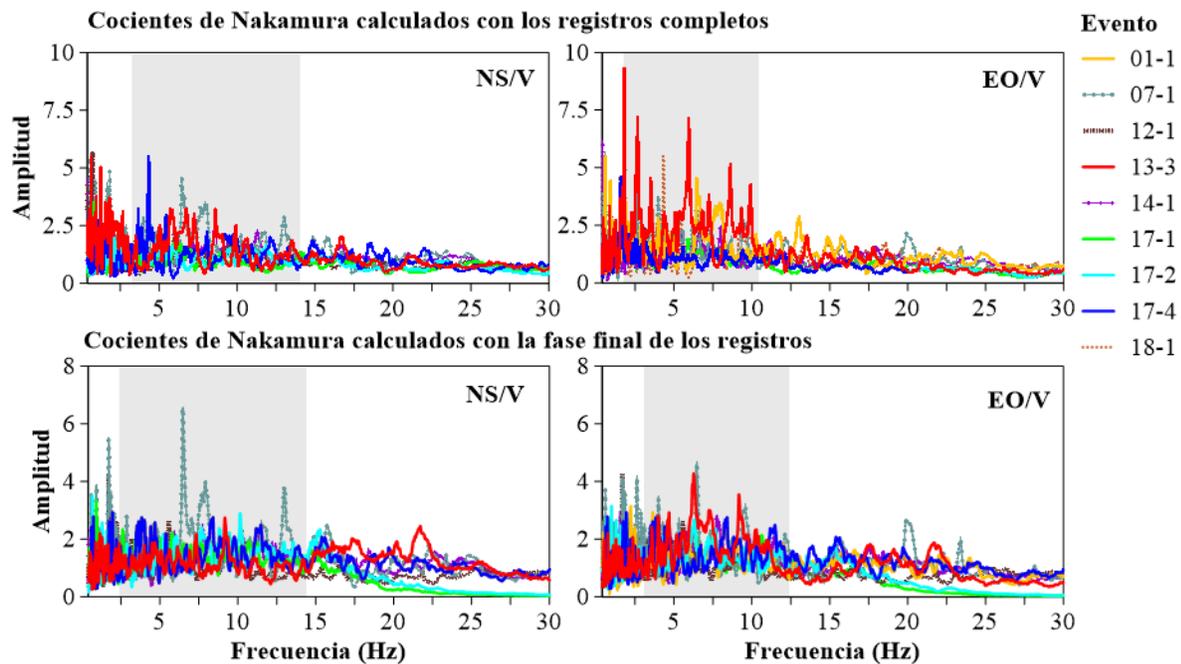


Figura C.9 Cocientes de Nakamura de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo VNTA (suelo firme). La franja gris representa la banda de frecuencias en donde se identifican los valores de la frecuencia del sitio asociados a las $Amp_{m\acute{a}x}$

Tabla C.1 Amplificaciones identificados en los CN en los componentes EO y NS de las estaciones del II-UNAM, calculados con los registros completos

Evento	ACAZ		ACAC		ACAD		ACP2		ACAR		VNTA	
	EO	NS	EO	NS	EO	NS	EO	NS	EO	NS	EO	NS
01-1	20	17	9	7	22	14	n.d.	n.d.	3	6	7	9
07-1	9	8	23	14	26	19	10	29	9	6	8	9
12-1	8	13	n.d.	n.d.	10	9	5	7	9	10	4	4
13-3	17	43	39	12	43	42	15	19	6	6	24	19
14-1	11	11	14	13	15	8	5	5	6	10	7	8
17-1	11	10	9	14	10	12	4	5	7	5	2	1
17-2	14	14	8	14	9	8	8	8	11	6	4	5
17-4	26	57	25	25	4	7	12	14	9	9	n.d.	n.d.
18-1	7	6	9	22	8	11	10	8	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

n.d.-Dato no disponible

Tabla C.2 Amplificaciones identificados en los CNff en los componentes EO y NS de las estaciones del II-UNAM, calculados con la fase final de los registros

Evento	ACAZ		ACAC		ACAD		ACP2		ACAR		VNTA	
	EO	NS	EO	NS	EO	NS	EO	NS	EO	NS	EO	NS
01-1	22	20	11	19	9	8	n.d.	n.d.	7	3	3	3
07-1	19	10	14	8	11	7	6	8	9	6	7	5
12-1	10	9	n.d.	n.d.	6	9	5	5	6	5	3	3
13-3	11	13	27	16	8	8	6	5	13	5	3	4
14-1	23	29	9	12	16	9	8	7	6	5	2	3
17-1	7	9	8	14	11	10	8	6	9	6	2	2
17-2	15	16	19	21	10	8	7	7	8	5	2	3
17-4	37	46	15	22	9	8	6	6	13	7	n.d.	n.d.
18-1	14	9	14	18	9	8	6	6	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

n.d.-Dato no disponible

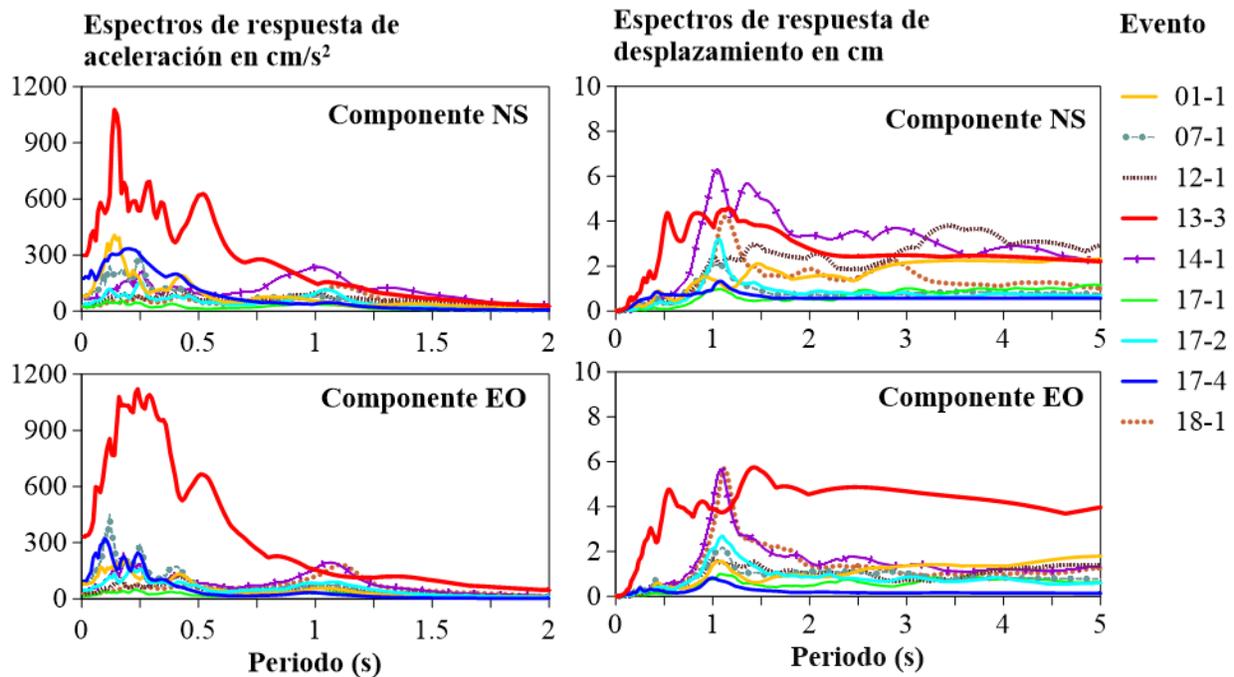


Figura C.10 Espectros de respuesta de aceleración y de desplazamiento de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo ACAZ (suelo blando)

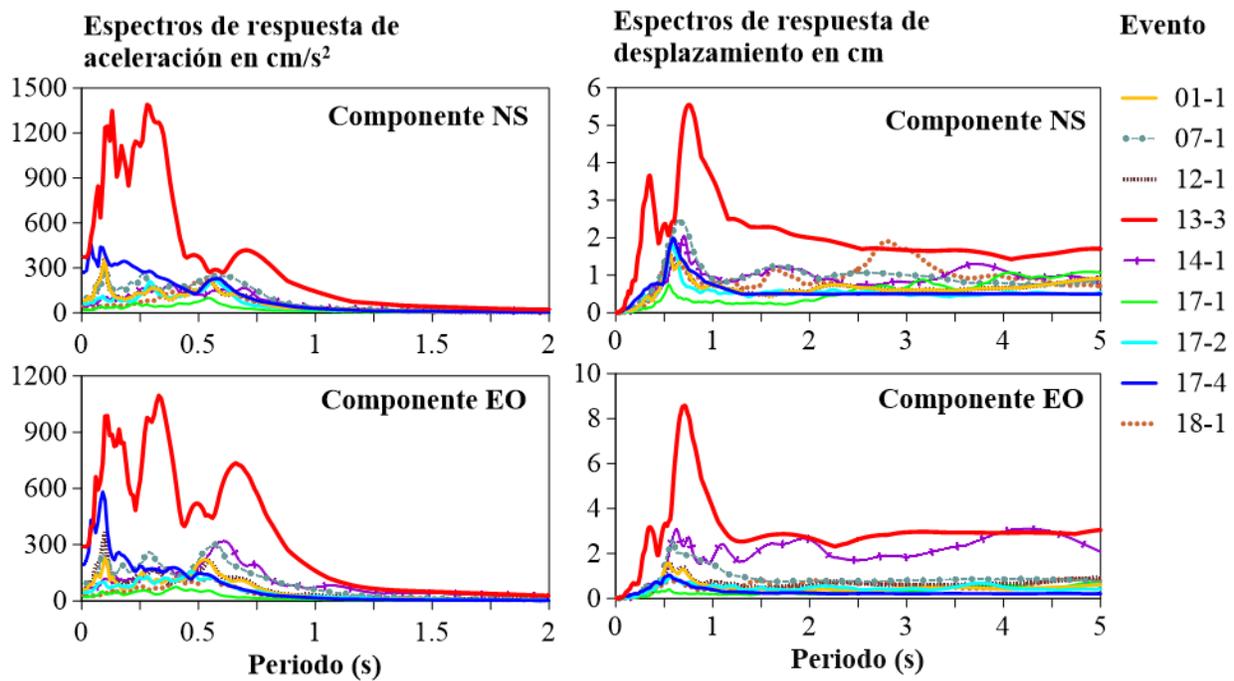


Figura C.11 Espectros de respuesta de aceleración y de desplazamiento de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo ACAC (suelo intermedio)

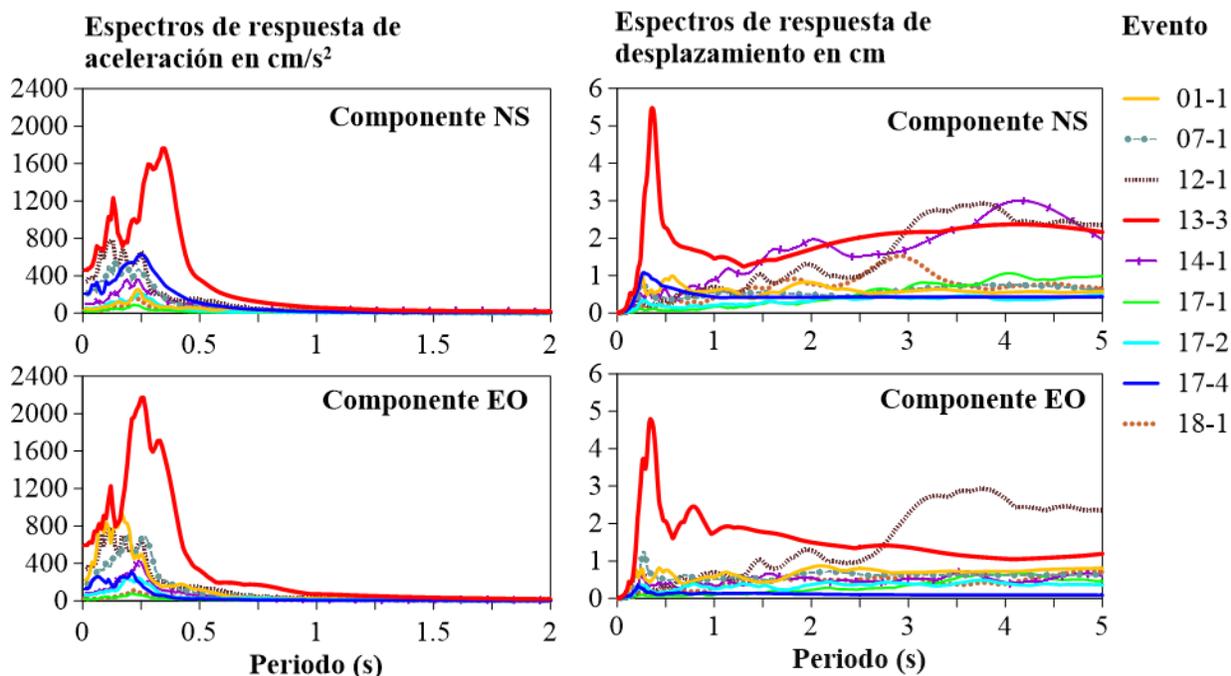


Figura C.12 Espectros de respuesta de aceleración y de desplazamiento de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo ACAD (suelo intermedio)

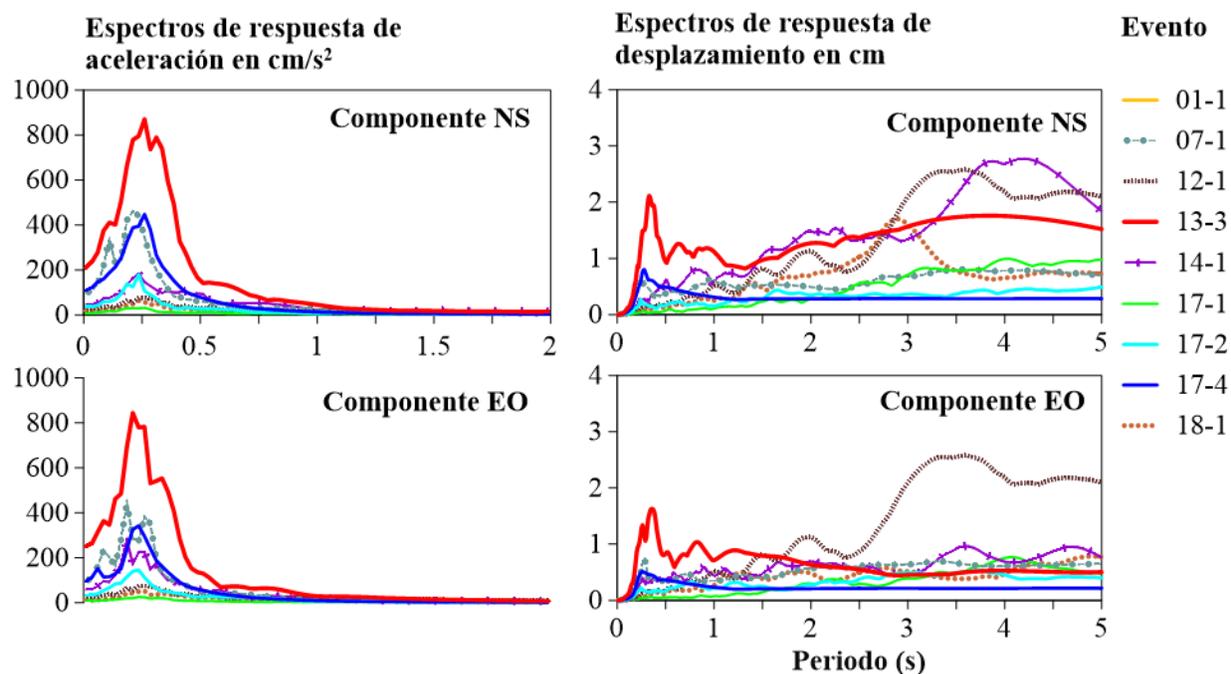


Figura C.13 Espectros de respuesta de aceleración y de desplazamiento de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo ACP2 (suelo intermedio)

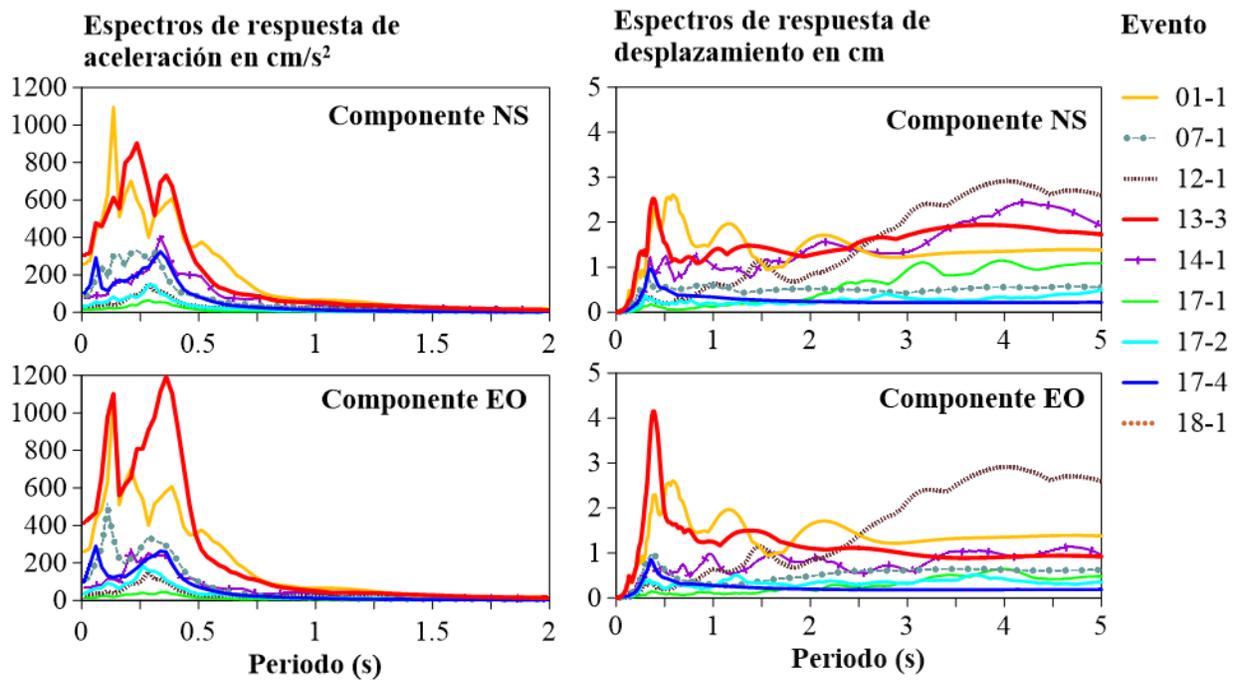


Figura C.14. Espectros de respuesta de aceleración y de desplazamiento de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo ACAR (suelo intermedio)

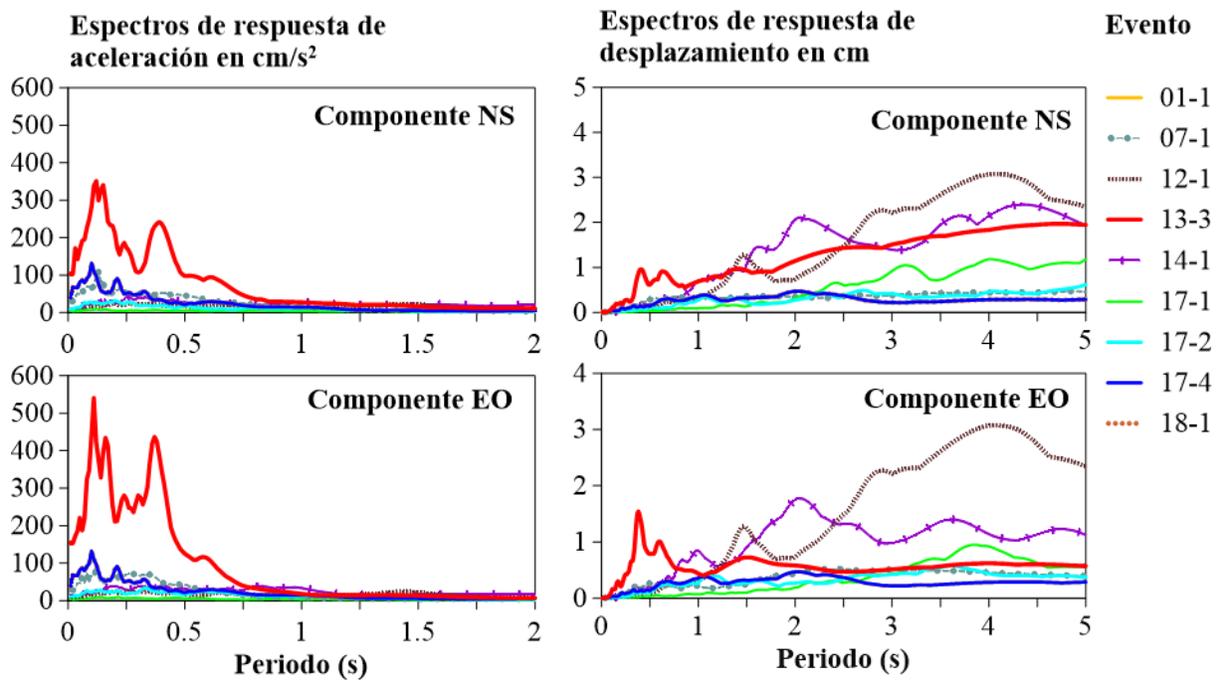


Figura C.15 Espectros de respuesta de aceleración y de desplazamiento de los eventos 01-1, 07-1, 12-1, 13-3, 14-1, 17-1, 17-2, 17-4 y 18-1 registrados en la estación de campo VNTA (suelo firme)

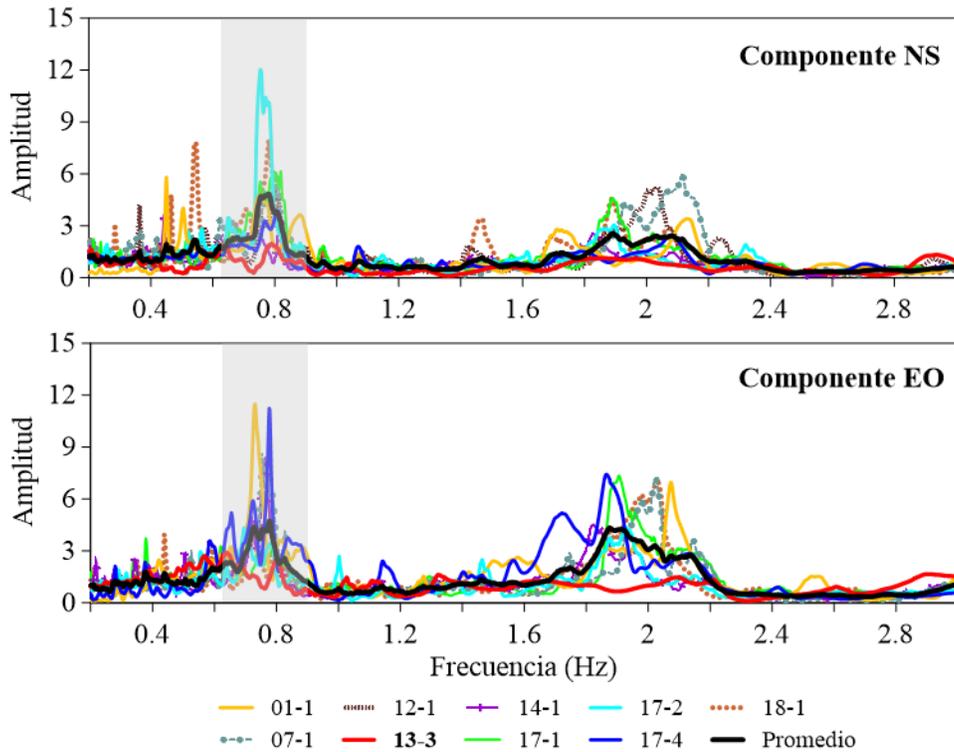


Figura C.16. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación ACAZ (suelo blando), calculados con los registros completos en los componentes NS y EO

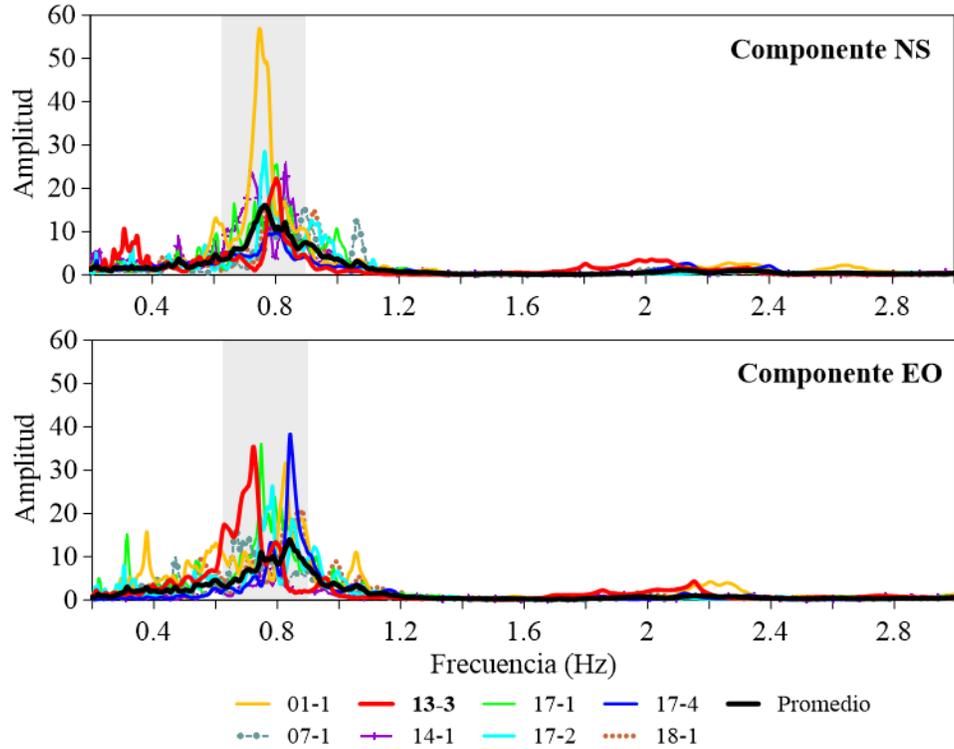


Figura C.17. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación ACAC (suelo intermedio), calculados con los registros completos en los componentes NS y EO

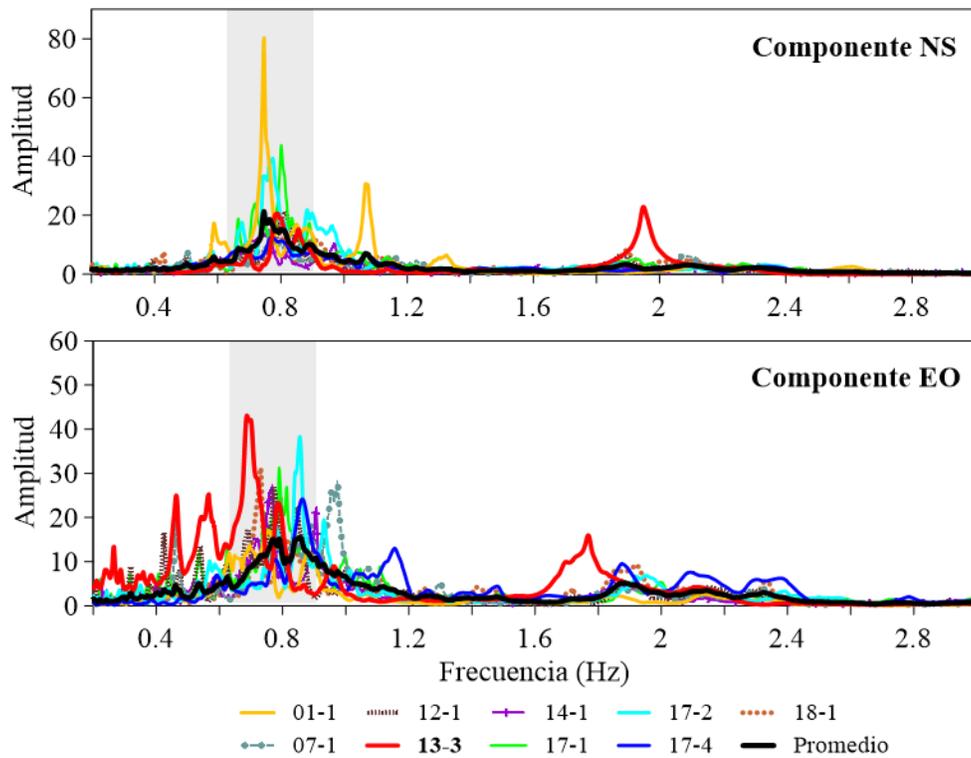


Figura C.18. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación ACAD (suelo intermedio), calculados con los registros completos en los componentes NS y EO

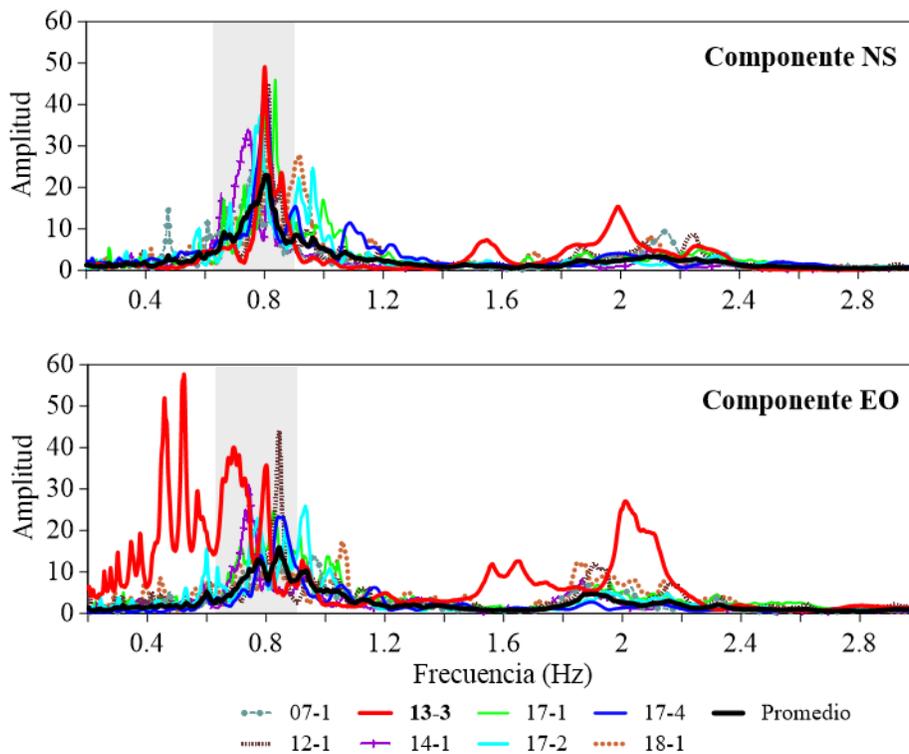


Figura C.19. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación ACP2 (suelo intermedio), calculados con los registros completos en los componentes NS y EO

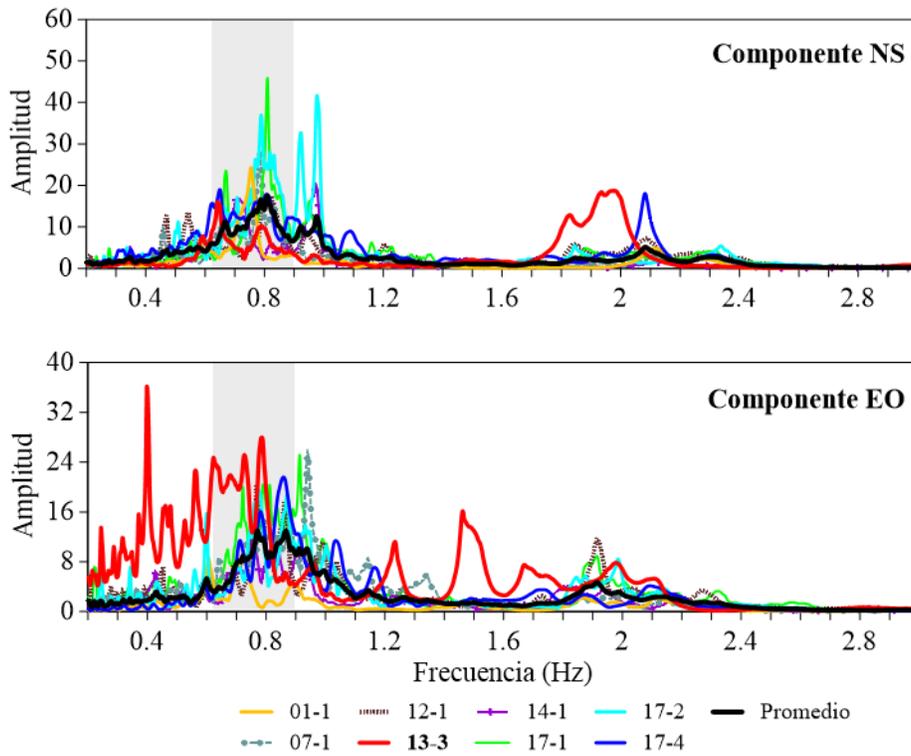


Figura C.20. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación ACAR (suelo blando), calculados con los registros completos en los componentes NS y EO

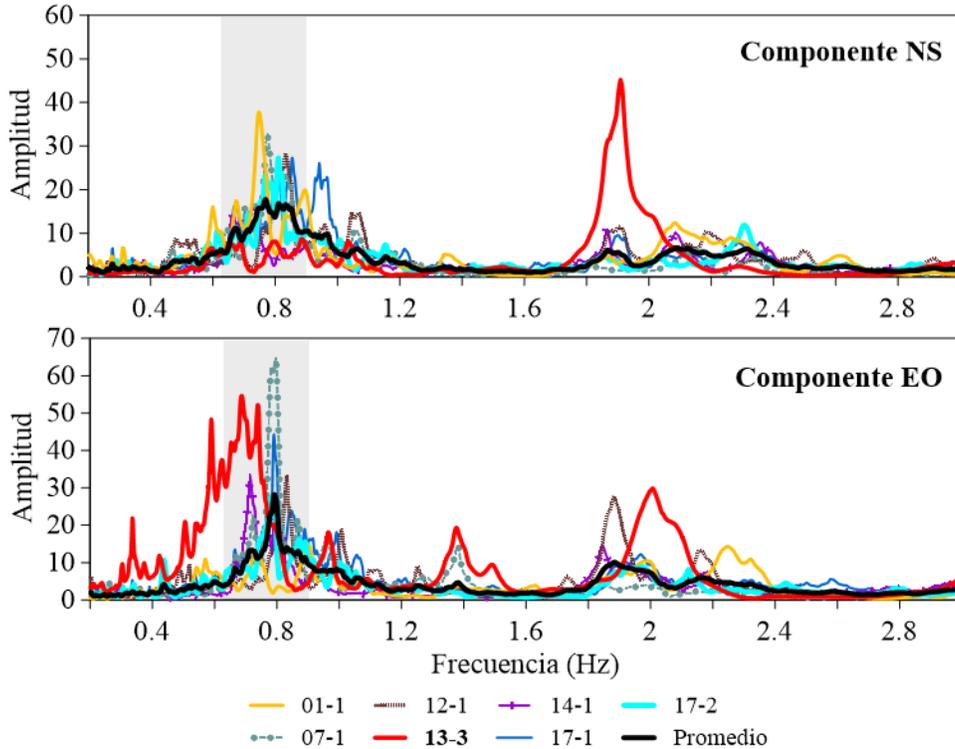


Figura C.21. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación VNTA (suelo firme), calculados con los registros completos en los componentes NS y EO

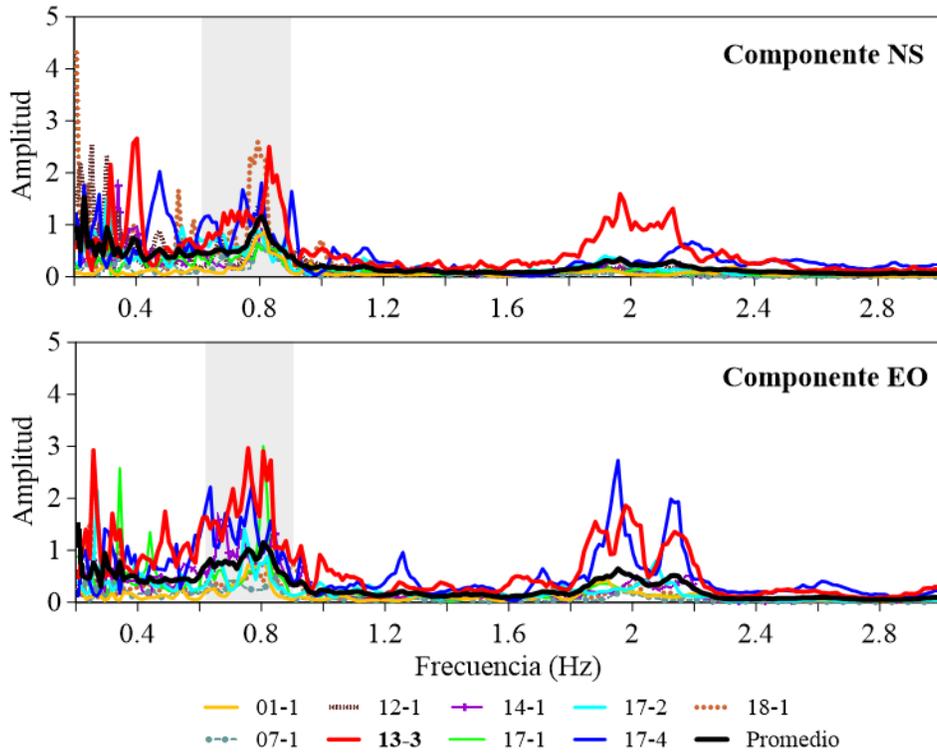


Figura C.22. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación ACAZ (suelo blando), calculados con la fase final registros en los componentes NS y EO

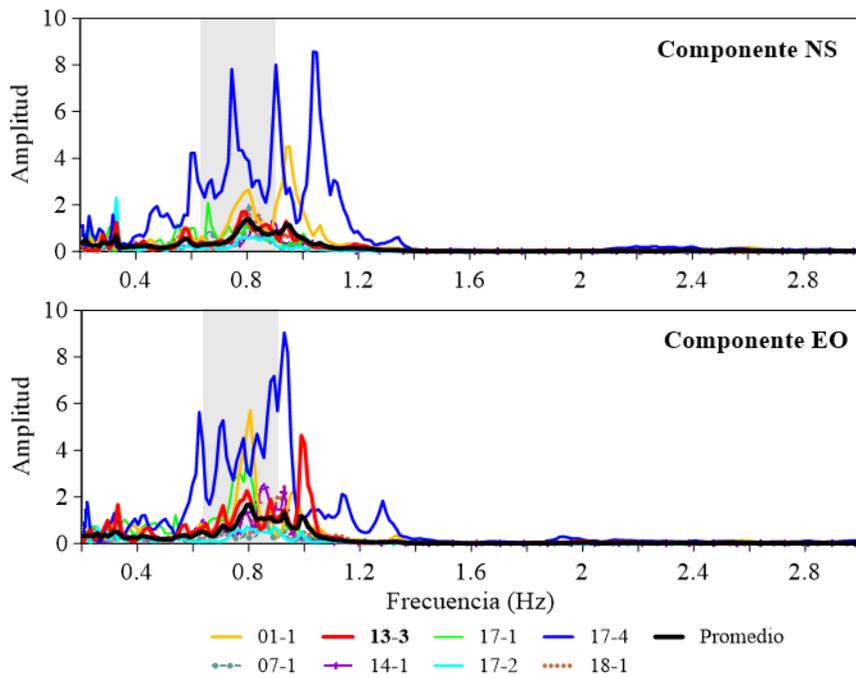


Figura C.23. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación ACAC (suelo intermedio), calculados con la fase final registros - componentes NS y EO

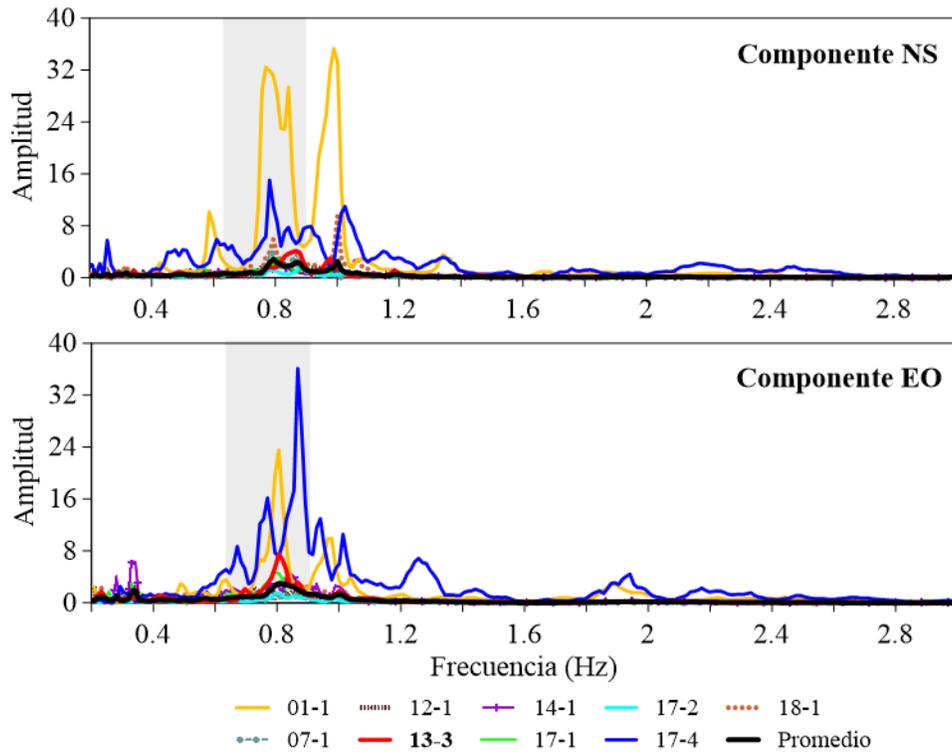


Figura C.24. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación ACAD (suelo intermedio), calculados con la fase final registros en los componentes NS y EO

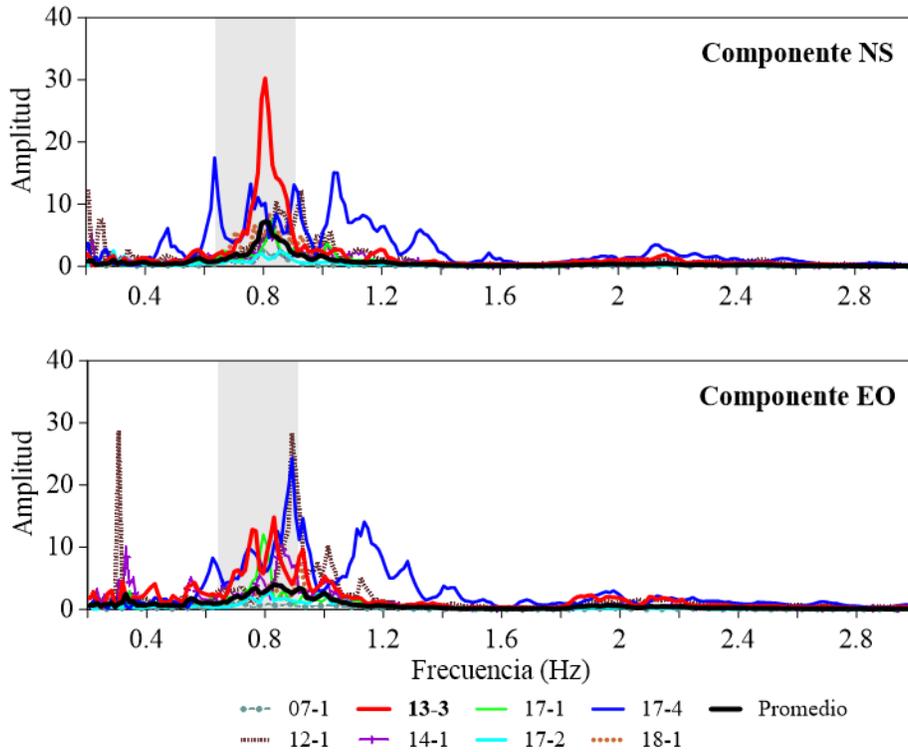


Figura C.25. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación ACP2 (suelo intermedio), calculados con la fase final registros en los componentes NS y EO

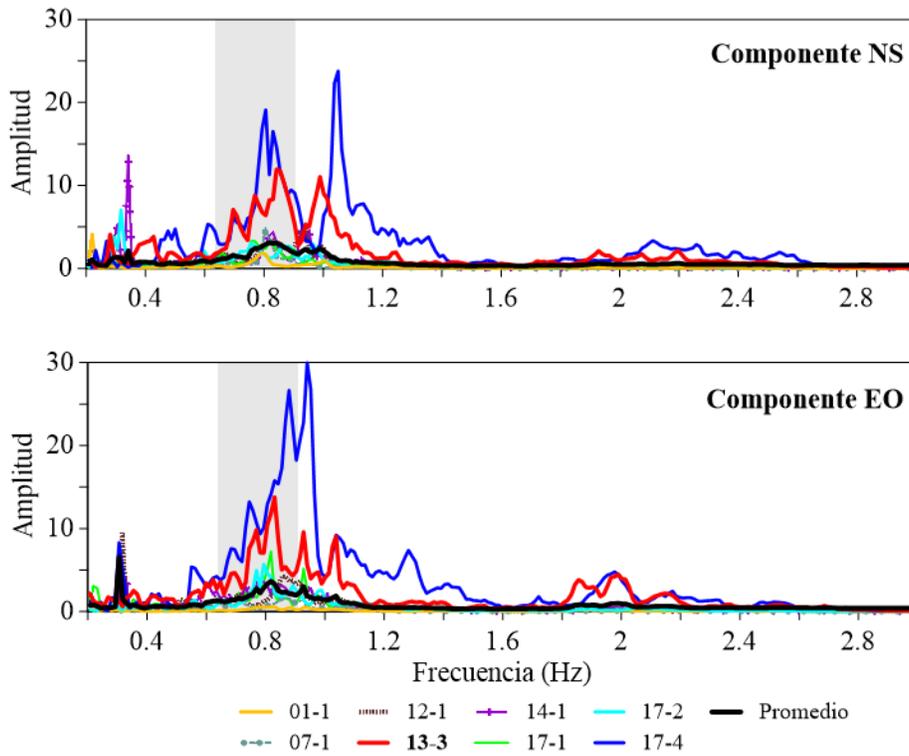


Figura C.26. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación ACAR (suelo intermedio), calculados con la fase final registros en los componentes NS y EO

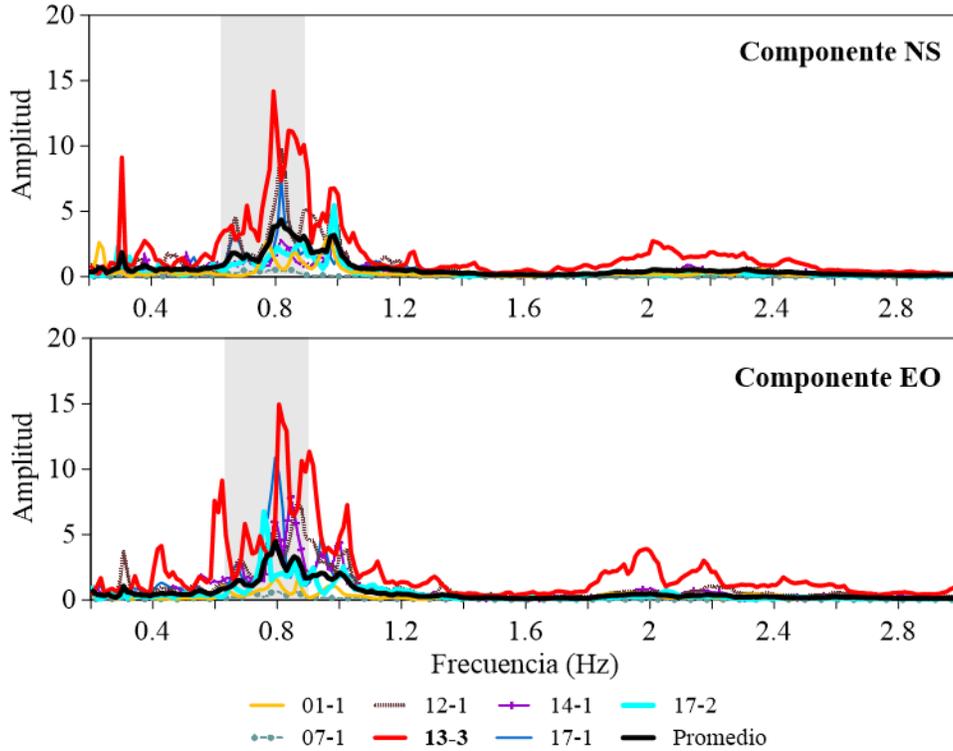


Figura C.27. FT de Fourier de la estación SIS con respecto a la estación VNTA (suelo firme), calculados con la fase final registros en los componentes NS y EO

Reconocimientos

Los registros acelerógrafos de las estaciones Acapulco Escuela Diana (ACAD), Acapulco Preparatoria No.2 (ACP2), Acapulco Renacimiento (ACAR), Acapulco Centro Cultural (ACAC), Acapulco la Zanja (ACAZ) y La venta (VNTA) que se emplearon en el presente trabajo han sido producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Al equipo de monitoreo del edificio SIS bajo la supervisión del Dr. David Murià-Vila en conjunto con el Mtro. Baruo Daniel Aldama Sánchez y el Dr. Miguel Ángel Garcia Illescas, con su experiencia y dedicación al monitoreo durante años han permitido desarrollar y enriquecer el producto de este trabajo.

Referencias

- Arias A. (1970), "A measure of earthquake intensity", Seismic Design for Nuclear Power Plants, Editor: R. J. Hansen, MIT Press.
- Aguilar, G.G. (2016), "Simulación de la respuesta inelástica del edificio CCUT calibrando un modelo elástico". Tesis de Maestría. Instituto de ingeniería. México, DF: UNAM.
- Aldama B.D. (2009), "Proceso automatizado para determinar el estado estructural en edificios instrumentados". Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, enero de 2009.
- Aldama B.D., Murià-Vila D., García-Illescas (2019), "Evolución de las propiedades dinámicas de un edificio instrumentado ante sismos de mediana y baja intensidad". XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Monterrey, Nuevo León.
- Bendat J. S. y Piersol A. G. (1989), "Random data. Analysis and measurement procedure", Wiley Interscience, New York.
- Beck J. L. y Jennings P. C. (1980), "Structural identification using lineal models and earthquake records", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 8, pp. 145-160.
- Camargo J. (2007), "Análisis de registros sísmicos en un edificio alto cercano a la estación SCT", Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, junio 2007.
- Chávez-García F. J. y Cuenca J. (1998), "Site effects and microzonation in Acapulco", Earthquake Spectra, 14, (1), 75-93.
- Chopra, Anil K. (1995), "Dynamics of Structures" University of California at Berkeley, 4ª edición, 2012.
- Correa Giraldo V. M. (2005), "Respuesta dinámica y efectos de interacción suelo-estructura en tres edificios instrumentados en México", Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, agosto 2005.
- Dobry R. (2014), "Simplified methods in soil Dynamics". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Published by Elsevier, 61-62, 246-268, April 2014.
- F.J. Harris, (1978), "On the use of windows for harmonic analysis with discrete Fourier transform", Proc of the IEEE, 66 (1978), 51-83.
- Lermo J. F. (1992), "Observaciones de microtemores en México y su aplicación en la ingeniería sísmica". Tesis de maestría, DEPFI, UNAM, enero 1992.
- Lázares F. (2003), "Respuesta sísmica y posible comportamiento no lineal del suelo en la ciudad de Acapulco", Tesis de Maestría, DEPFI, UNAM, febrero 2003.

- Li Y. y Mau S. T. (1990), “A computer program for multiple input - multiple output system identification using building seismic records”, Research Report UHCEE 90-07, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Huston.
- Luco J. E., Trifunac M. D., Wong H. L. (1987), “On the apparent change in dynamic behavior of a nine-story reinforced concrete building”, Bulletin of the seismological Society of America, Vol 77, (6), 1961-193, December 1987.
- MDOC-2017, Comisión Federal de Electricidad CFE (2019), “Sección C: Estructuras, Tema 2: Diseño de Estructuras especiales, Capítulo 1: Diseño Estructural de Cimentaciones ”.
- Mendoza L., Reyes A. M., Luco J. E. (1991), “Ambient Vibration Test of the Mexicali General Hospital”, Earthquake, Vol 7, (2), 281-300.
- Murià-Vila D., Aldama B. D., García-Illescas M. A. y Rodríguez Gutiérrez G. (2021), “Monitoring of a rehabilitated building in soft soil in Mexico and structural response to the September 2017 earthquakes: Part 1: structural health monitoring system”. Earthquake Spectra, 37, (4), 2737-2766.
- Murià-Vila D., Guillermo-Aguilar S., Damaris-Arias L. y Pérez-Liévana K. (2020a), “Monitoring of a rehabilitated building in soft soil in Mexico and structural response to the September 2017 earthquakes: Part 2: Numerical simulation”. Earthquake Spectra, 1-24.
- Murià-Vila D., Aldama B. D., García-Illescas M. Á., Sánchez-Ramírez A.R. y Loera Santiago (2020b), “Structural monitoring of a curve of an elevated railroad including the effects of the 19 September 2017 earthquake”. Earthquake Spectra, 36, (S2), 262-287.
- Murià-Vila D., Aldama B. D. y Loera Santiago (2010), “Sistema de Alerta Sísmica para edificios instrumentados”. X Congreso Chileno de sismología e ingeniería antisísmica, Valdivia – Santiago, Chile.
- Murià-Vila D. (2007), “Experiencia Mexicana sobre la respuesta sísmica de edificios instrumentados”, ResearchGate, Publicaciones de la Academia de Ingeniería de México, Vol 1.
- Murià-Vila D., Taborda, R. y Zapata A., (2004), “Soil structure interaction effects in two instrumented tall buildings”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- Murià-Vila D., Rodriguez R., Zapata A. y Toro A. M. (2001), “Seismic Response of a twice - Retrofitted Building”, ISET Journal of Earthquake Technology, India, Vol. 38, (2-4), 67-92.
- García-Illescas M. Á., Aldama B. D., Pérez M.D., Murià-Vila D. y Ramírez G.L. (2023), “Efectos de interacción suelo estructura estimados con métodos parámétricos”, XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Guadalajara, Jalisco.
- Mylonakis G. y Gazetas G. (2000). “Seismic Soil – Structure interaction: Beneficial or Detrimental” Journal of Earthquake Engineering, Vol. 4, (3), 277–301.

Nakamura Y. (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", Quarterly Report of Railway Technical Research Institute, 30(1): 25–33.

NTCDS-RCDF (2020). Normas Técnicas complementarias para diseño por sismo del reglamento de construcciones para el Distrito Federal. México DF: Gaceta Oficial del Gobierno del Distrito Federal, (361), 76-88, junio de 2020.

Ordaz M. y C. Montoya Dulché (2018). Programa DEGTRA versión 10.4.0. Instituto de ingeniería, UNAM.

Pérez-Liévana K., Arnau O. y Murià-Vila D. (2019), "Simulación de la respuesta de un edificio instrumentado en Acapulco ante eventos sísmicos". XXII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Monterrey, Nuevo León.

Pérez-Liévana K., (2019), "Simulación numérica de la respuesta no lineal de un edificio instrumentado en Acapulco". Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería. México, DF: UNAM.

Rodríguez Gastelum D., (2022), "Comparación de modelos no lineales de elementos de concreto reforzado". Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería. México, DF: UNAM.

Taborda R., (2003), "Respuesta Dinámica y Efectos de interacción Suelo-Estructura de un edificio instrumentado en Acapulco". Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería. México, DF: UNAM.

Taborda R. y Murià-Vila D. (2002), "Extrapolar. Programa para la generación de señales en edificios instrumentados suponiendo un diafragma infinitamente rígido", Instituto de Ingeniería, UNAM.

Zúñiga-Ontiveros M.D., (2021), "Comportamiento no lineal de un edificio de concreto reforzado instrumentado". Tesis de maestría. Instituto de Ingeniería. México, DF: UNAM.