

**Universidad Nacional Autónoma de México**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

---



**Respuesta Dinámica y Efectos de Interacción  
Suelo-Estructura de un Edificio Instrumentado en Acapulco**

**T E S I S  
PRESENTADA POR**

**Ricardo Taborda Ríos**

**PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
(ESTRUCTURAS)**

**DIRECTOR: DR. DAVID MURIÀ VILA**

**MÉXICO DF, SEPTIEMBRE DE 2003**



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.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue llevado a cabo en la Coordinación de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería de la UNAM bajo la supervisión del Dr. David Murià Vila. El proyecto de investigación fue patrocinado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico y por el mismo Instituto de Ingeniería.

La realización de este estudio no hubiese podido llevarse a buen término sin el apoyo y las facilidades proporcionadas por los propietarios del edificio para la instrumentación y su mantenimiento. Igualmente, desempeñó un papel indispensable la eficiente labor del personal de la Coordinación de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería encabezada por Leonardo Alcántara y en ella, de manera especial, la atención prestada por Marco A. Macías en todo lo referente a la administración y pre-procesamiento de las señales registradas en el edificio.

Al término de este estudio, no tengo más que transmitir un exclusivo mensaje de gratitud al Dr. Murià Vila por su acompañamiento y valiosos comentarios durante todo el desarrollo del mismo. Además, agradezco las pertinentes sugerencias de los jurados de tesis, los Drs. Roberto Meli, Javier Avilés, José A. Escobar y, con especial gratitud, los aportes del Dr. Mario Ordaz Schroeder, a quien además debo la iniciativa de proponer el procedimiento para la estimación de amortiguamientos.

Estos agradecimientos no estarían completos sin reconocer la presencia de aquellas personas que ayudaron a mantener el entusiasmo necesario para cumplir los objetivos trazados. En esta labor se hace explícita la compañía de José E. Blanco, Zuny Celestino, Miguel A. Jaimes, Ricardo Pérez, Eduardo Martínez, Gallegher Ramírez, Jorge Melchor, Daniel Padilla, Cesar A. Arredondo, Gerardo Rodríguez y Luis Fuentes, especialmente la amistad de Gregorio Posada y Arabella Zapata, así como la complicidad de Maria del Carmen Saldarriaga y el incondicional apoyo de mis padres y hermanos.

Deseo también manifestar mi gratitud a todos aquellos profesores que, a lo largo de mis años de formación, contribuyeron a que este trabajo alcanzara el nivel académico esperado. En esta labor, destaco especialmente las enseñanzas de Roberto Rochel, Juan Diego Jaramillo y Uriel Zapata, así como la excelente labor de los profesores de la Coordinación del Programa de Maestría en Ingeniería de la UNAM, y allí, el atento seguimiento de los Drs. Sergio Alcocer, Carlos Reyes y Jaime García.

Finalmente, agradezco a todos aquellos que inadvertidamente he omitido y que calladamente colaboraron en hacer de este trabajo una realidad.

## TABLA DE CONTENIDO

### RESUMEN

### INTRODUCCIÓN

Antecedentes  
Objetivos y Alcance

### CAPÍTULO 1 EL EDIFICIO SIS

- 1.1 Localización
- 1.2 Descripción de la estructura
- 1.3 Descripción del suelo de cimentación

### CAPÍTULO 2 INSTRUMENTACIÓN Y REGISTROS SÍSMICOS

- 2.1 Instrumentación sísmica
- 2.2 Generación de señales
- 2.3 Características de los registros sísmicos

### CAPÍTULO 3 METODOS DE ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL SISTEMA Y DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

- 3.1 Estimación no paramétrica
  - 3.1.1 Análisis en el dominio de la frecuencia
    - 3.1.1.1 Análisis espectral
    - 3.1.1.2 Procedimiento para la estimación de las propiedades del sistema
    - 3.1.1.3 Procedimiento para la estimación de los efectos de interacción suelo-estructura
  - 3.1.2 Análisis en el dominio del tiempo
    - 3.1.2.1 Método de cruces por cero
    - 3.1.2.2 Procedimiento para la estimación de las propiedades del sistema
    - 3.1.2.3 Procedimiento para la estimación de los efectos de interacción suelo-estructura
- 3.2 Estimación paramétrica
  - 3.2.1 Estimación paramétrica modal
  - 3.2.2 Modelo para la estimación de las propiedades del sistema
  - 3.2.3 Modelos para la estimación de los efectos de interacción suelo-estructura
- 3.3 Estimación analítica
  - 3.3.1 Procedimiento de la versión preliminar de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo
  - 3.3.2 Modelos analizados con el programa Dyna5

## **CAPÍTULO 4 ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL SISTEMA**

- 4.1 Análisis espectral de señales completas
- 4.2 Análisis espectral de señales por ventanas
- 4.3 Método de cruces por cero
- 4.4 Análisis paramétrico modal
- 4.5 Comparaciones y comentarios

## **CAPÍTULO 5 ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA**

- 5.1 Estimación de las frecuencias de estructura, traslación, torsión y cabeceo
  - 5.1.1 Análisis espectral de señales completas
  - 5.1.2 Análisis espectral de señales por ventanas
  - 5.1.3 Método de cruces por cero
  - 5.1.4 Análisis paramétrico modal
  - 5.1.5 Comparaciones y comentarios
- 5.2 Estimación de las rigideces de traslación, torsión y cabeceo
  - 5.2.1 Análisis espectral de señales completas
  - 5.2.2 Análisis espectral de señales por ventanas
  - 5.2.3 Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo
  - 5.2.4 Modelos analizados con el programa Dyna5
  - 5.2.5 Comparaciones y comentarios

## **COMENTARIOS Y CONCLUSIONES**

## **APÉNDICES**

- A Procedimiento para la generación de señales
  - A.1 Generación de señales verticales
  - A.2 Generación de señales de traslación
- B Tablas de estimación de parámetros
- C Comparación de señales medidas y calculadas con el método paramétrico modal
- D Procedimiento para la estimación de amortiguamientos de un sistema a partir de funciones de transferencia

## **BIBLIOGRAFÍA**

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la respuesta dinámica de una estructura recientemente instrumentada en la ciudad de Acapulco, Guerrero, con el objetivo de conocer sus propiedades dinámicas y las características de interacción suelo-estructura a las cuales está sujeta. Adicionalmente, se busca sentar una base que sea de utilidad para trabajos posteriores, tales como la elaboración de modelos analíticos lineales y no lineales del edificio, o estudios comparativos con investigaciones similares realizadas en edificios instrumentados en la ciudad de México.

Para ello se recurre al análisis de las señales registradas durante ocho eventos sísmicos ocurridos entre septiembre de 2001 y abril de 2002, además de las historias de aceleraciones capturadas en dos pruebas de vibración ambiental realizadas con la misma red acelerométrica.

El estudio de dichas señales se lleva a cabo mediante el uso de técnicas paramétricas y no paramétricas de identificación de sistemas. Entre los métodos no paramétricos se recurre a un análisis espectral convencional por medio del cual se estiman las frecuencias, fracciones de amortiguamiento crítico y formas modales características del sistema.

El análisis espectral es complementado con un método simplificado a través del cual se estiman las características de los efectos de interacción, entendiendo estas como las frecuencias y rigideces asociadas con los movimientos de la estructura y los debidos al cabeceo, traslación y torsión de la base.

Además, se aplica la técnica de cruces por cero para el análisis de las señales en el dominio del tiempo. Con esta se logra identificar la frecuencia fundamental del sistema y adicionalmente, mediante el uso de señales filtradas, se examina el potencial de la misma para la caracterización de los movimientos de torsión, cabeceo y traslación de la base.

En lo que respecta a métodos paramétricos, se aplica un procedimiento que se basa en los conceptos de superposición modal, por medio del cual se determinan las propiedades del sistema, la estructura y el componente de movimiento debido al cabeceo, a través de un ajuste por mínimos cuadrados de las señales obtenidas experimentalmente y aquellas calculadas a partir de modelos con los que se idealiza el sistema.

En adición al método simplificado y con la intención de encontrar la representación más adecuada del sistema de cimentación, las rigideces de éste son estimadas con el programa Dyna5 para una amplia variedad de modelos y con el procedimiento propuesto en la versión preliminar de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, que si bien no se aplican en la ciudad de Acapulco, constituyen una guía para los procedimientos de diseño usados en la práctica.

Los resultados obtenidos por los diferentes métodos utilizados son comparados entre sí. Su análisis permite destacar las bondades y limitaciones de cada uno de ellos, así como obtener interesantes conclusiones sobre las propiedades del edificio y los efectos de interacción identificados.

Entre los resultados más interesantes se puede destacar la posible aparición de comportamientos no lineales en el sistema, los cuales, dadas las características identificadas, parecen ser atribuibles a los movimientos de interacción suelo-estructura, en especial al componente de cabeceo, el cual alcanza una participación en la respuesta total del sistema de hasta un treinta por ciento. Este movimiento fue ampliamente estudiado en el análisis espectral y con la técnica paramétrica modal, en la cual se incurrió en el uso de señales filtradas.

Finalmente, se debe resaltar que en la estimación de las rigideces del sistema de interacción se encontró que la consideración de los efectos de grupo por la interacción entre pilas-suelo-pilas puede conducir a importantes diferencias con los resultados obtenidos experimentalmente con el método simplificado.

## INTRODUCCIÓN

La experiencia de los eventos sísmicos que han perturbado a la sociedad y a las estructuras que esta habita, hace que los ingenieros se cuestionen continuamente sobre la validez de los criterios que utilizan en el diseño y análisis de estructuras. Los daños observados en eventos como el ocurrido en México en 1985, y en muchos otros a lo largo de la historia, continuamente crean nuevos interrogantes y demandas sobre dichos criterios. Esto hace que día a día se hagan esfuerzos por ampliar el conocimiento sobre las excitaciones a las que son sometidas las estructuras, su naturaleza y propiedades, y la forma cómo las estructuras mismas responden a ellas.

Ante este panorama y la demanda permanente sobre la ingeniería para que garantice la estabilidad de las estructuras durante su vida útil, la instrumentación sísmica de edificios surge como una valiosa herramienta, que estriba su importancia en que permite hacer evaluaciones cuantitativas de las excitaciones impuestas por los sismos a las estructuras y facilita el estudio del comportamiento de las edificaciones, antes durante y después de los eventos sísmicos.

Investigaciones realizadas en otros países con edificios instrumentados son de provecho, a pesar de lo cual se hace necesario instrumentar edificios en México para poder valorar las particularidades de los suelos donde están desplantados y la respuesta misma de las estructuras diseñadas y construidas con prácticas propias del país. Esto permitirá contribuir a la comprensión de su respuesta dinámica ante sismos de gran intensidad, lo que nos conducirá a mejorar los criterios de diseño y evaluación estructural.

Para el análisis de los registros de movimientos sísmicos que se obtienen de la instrumentación, se cuenta con diversas técnicas que permiten la identificación de los parámetros estructurales, estas son llamadas: técnicas de identificación de sistemas. Haciendo uso de ellas es posible estimar diferentes propiedades dinámicas tales como las frecuencias naturales de vibrar, factores de participación, fracciones de amortiguamiento crítico y formas modales del sistema. Adicionalmente, el estudio de la variación de estas propiedades entre evento y evento, y durante los mismos, conduce a identificar la presencia de comportamientos de tipo lineal o no lineal en el sistema, y dar seguimiento al deterioro o recuperación de la estructura.

Otro aspecto valioso de la instrumentación, es que la determinación de las características del sistema sirve para la posterior calibración de modelos analíticos, a través de los cuales se pueda reproducir la respuesta de la estructura real, con lo que se logra emitir recomendaciones que orienten a los ingenieros a mejorar sus modelos analíticos en la práctica profesional.

Un importante tema que ha motivado la instrumentación de edificios, es el estudio de la relación existente entre la estructura y el suelo en el que se encuentra. Bien sea por la presencia de efectos de sitio debidos a la naturaleza misma del suelo o por los efectos de interacción suelo-estructura (ISE).

Aunque en los últimos años se ha creado mayor conciencia entre los ingenieros de la práctica acerca de los efectos ISE, sigue siendo común asumir que las estructuras se encuentran en un estado de empotramiento perfecto con respecto al suelo en el que están cimentadas. Se ha observado que ésta es una condición que no siempre se cumple, sino que por el contrario existe un trabajo conjunto entre el movimiento de la cimentación y el de la superestructura.

Este comportamiento está generalmente asociado a estructuras desplantadas en suelos blandos, pero bien puede deberse a la relación que guardan entre sí, la rigidez y masa de la estructura con respecto a las propiedades del suelo. De hecho, los efectos ISE también se deben a la simple presencia de la cimentación y la radiación de ondas de movimiento que la estructura misma transmite de vuelta al suelo como respuesta ante las excitaciones a las que el conjunto es sometido.

En la práctica, el análisis de los efectos ISE requiere la consideración de grados de libertad adicionales y, dependiendo del modelo de estudio, puede hacerse necesario la inclusión de soluciones basadas en la propagación de ondas.

De acuerdo con la descripción del problema, se han identificado dos tipos de interacción: la inercial y la cinemática. La interacción inercial es la causada en la fundación por la fuerza de inercia de la estructura durante el movimiento. Generalmente es entendida como el problema dinámico de impedancia y es el resultado de la influencia directa que tiene la relación existente entre las características dinámicas de la cimentación y la estructura. Por su parte, la interacción cinemática es la ocasionada por el movimiento inducido por el sismo y es conocida como la fuerza que es transmitida por el movimiento en sí mismo.

En términos generales, los efectos ISE se manifiestan como la aparición de movimientos relativos de traslación, cabeceo y giro en la base, ocasionando una reducción en la frecuencia del sistema suelo-estructura, un incremento de la contribución relativa de las excitaciones de cabeceo del movimiento del suelo en la respuesta total de la estructura, cambios en el amortiguamiento del sistema por la irradiación de ondas de la estructura al suelo y cambios en las formas modales y factores de participación (Trifunac y Todorovska, 1999).

Eventualmente, tales efectos pueden verse incrementados conforme la frecuencia del sistema se acerque a la frecuencia fundamental del sitio en el que se encuentra, o bien, pueden manifestarse como una reducción en la fuerza cortante máxima en la base comparada con la que se obtendría si la estructura estuviese realmente empotrada.

Para la determinación de las propiedades del sistema y el estudio de los efectos ISE se han desarrollado diferentes procedimientos que permiten comprender la importancia de los aspectos que se han mencionado. Así como se señalaron las diversas técnicas para la identificación de sistemas, en la literatura existe una variedad de propuestas para la valoración de los efectos ISE, entre los que se pueden mencionar trabajos de tipo analítico (Avilés, 1999; Dobry y Gazetas, 1986 y 1988; Gazetas, 1991; Kaynia y Kausel, 1982; Stewart *et al.*, 1999a; Veletsos y Wei, 1971) o aplicaciones prácticas en las que se utilizan los resultados de estructuras instrumentadas (Luco, 1980; Luco *et al.*, 1987; Mendoza *et al.*, 1991; Stewart y Fenves, 1998; Stewart *et al.*, 1999b).

En el presente trabajo se hará uso de algunas de estas propuestas o similares, y se evaluará la importancia de los efectos ISE en la respuesta dinámica de un edificio instrumentado en la ciudad de Acapulco. Pero antes de esbozar los objetivos y alcances del presente trabajo es apropiado revisar los antecedentes que han conducido a su estudio.

## **ANTECEDENTES**

Desde la aparición de la tecnología para la instrumentación sísmica de estructuras, el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) ha promovido su práctica para el estudio de la respuesta de estructuras ante eventos de importante intensidad.

A pesar de ello, fue solo hasta la experiencia vivida durante los sismos de septiembre de 1985 y debido a la diversidad de los daños observados, que surgió un fuerte interés por esclarecer las dudas concernientes a las respuestas estructurales de las edificaciones. Esto señaló a las autoridades en turno, profesionales de la construcción y algunos propietarios de inmuebles, la necesidad de contar con datos experimentales para resolver las dudas sobre los diferentes aspectos del análisis y diseño sísmico de edificios.

Fue así como en 1987 se hizo posible comenzar estudios de instrumentación. Sin embargo, actualmente en el país no excede de 25 el número de edificios instrumentados. Once de ellos son atendidos por algún centro de investigación, cinco de los cuales se encuentran a cargo del II-UNAM. Es obvio que esta cantidad no es

representativa ni suficiente para comprender la respuesta de las estructuras, más aun cuando con los edificios actualmente instrumentados no es posible cubrir las zonas de mayor peligro sísmico del país. A pesar de ello, los resultados que se han obtenido son bastante interesantes, si se tiene en cuenta que otros países aventajan estos trabajos en poco menos de tres décadas de estudio.

Entre los aspectos que han permitido resaltar los estudios realizados se encuentran el deterioro estructural y los efectos ISE (Murià-Vila *et al.*, 1997, 2000 y 2001; Fuentes y Murià-Vila, 2001). Precisamente en la versión preliminar de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del nuevo Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTCDS-RCDF, 2000), se incluye ya una sección sobre los efectos de interacción suelo-estructura.

Desafortunadamente no se han obtenido registros de movimientos sísmicos de gran intensidad en los edificios que se encuentran instrumentados a la fecha.

En 1997, ante el panorama descrito, el grupo responsable del proyecto de instrumentación sísmica de edificios del II-UNAM acordó, como uno de sus objetivos principales, hacer los esfuerzos necesarios para instrumentar edificios típicos en las regiones de mayor peligro sísmico del país, fuera de la ciudad de México. Para lograr esta meta, en 1998 el II-UNAM aceptó la propuesta de adquirir los acelerómetros requeridos para la instrumentación de un edificio dentro los proyectos de infraestructura del convenio UNAM-BID.

Lamentablemente, por la falta de recursos económicos, no pudo continuarse con la selección del lugar, los posibles edificios y los estudios necesarios para proceder a la instalación y puesta en operación de los equipos adquiridos. De forma tal que fue sólo hasta septiembre de 2000, gracias al patrocinio de la Dirección General para Asuntos del Personal Académico (DGAPA), que se pudieron retomar las actividades.

La elección del lugar fue la ciudad de Acapulco. Las razones se estribaron en que es uno de los sitios con más alta probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos en el país. Además que, de acuerdo con el historial de eventos registrados, se está a la espera de que ocurra un temblor de gran intensidad en la denominada brecha de Guerrero. Esto hace pensar que a corto plazo podremos contar con información valiosa sobre la respuesta estructural ante eventos de moderada y alta intensidad.

Adicional a la probabilidad de ocurrencia, la cercanía de Acapulco con las fuentes de generación de los movimientos sísmicos agrega un factor valioso en la instrumentación, como es el hecho de que las excitaciones a las que son sometidas las estructuras poseen amplios contenidos frecuenciales, aspecto muy distante del caso de los edificios instrumentados en la ciudad de México, donde las señales de temblores son prácticamente monocromáticas.

Otro aspecto interesante fue la oportunidad de estudiar la respuesta dinámica de suelos blandos arenosos, de los cuales se espera que, a diferencia de los suelos arcillosos del lago de Texcoco, presenten una respuesta no lineal aun para intensidades relativamente bajas. Por lo tanto, se hace de interés práctico que en un futuro se comparen las respuestas de edificios altos desplantados en las zonas sísmicas más importantes del país y con características de sitio muy diferentes.

En el caso de la selección del edificio se establecieron los siguientes requisitos: que estuviera en la zona de suelo blando de la ciudad, que el sistema estructural fuera, en lo posible, sencillo, regular y simétrico, que su estructura fuera de concreto reforzado y que la frecuencia fundamental del sistema fuera levemente superior a la fundamental del suelo de cimentación. Se hizo también importante que se contara con la documentación técnica sobre su construcción y que se otorgaran los permisos de acceso para la instalación y operación la red acelerométrica, así como para las futuras inspecciones, cuando las circunstancias lo ameriten.

Se visitaron 30 edificios en total, y tras estudiar la información, se seleccionó la opción más adecuada: el edificio SIS. Este, adicionalmente, contaba con un aspecto de interés, se trataba de una construcción reciente (diciembre de 2000). Los detalles del estudio que se condujo para la elección del edificio SIS pueden verse ampliados en Escobar *et al.* (2001).

Finalmente, la operación de la red se puso en marcha en septiembre de 2001. A la fecha se han registrado más de 90 eventos de pequeña intensidad y se han realizado dos registros de vibración ambiental. En todos los casos la red ha mostrado un buen funcionamiento. Con los datos obtenidos, a partir de algunos de los eventos más representativos, ya se han realizado dos trabajos en los que se estudiaron las propiedades dinámicas del sistema y algunas de las características de los efectos ISE (Murià-Vila *et al.*, 2002 y Taborda *et al.*, 2002). Al momento el edificio no ha presentado daños.

## **OBJETIVOS Y ALCANCE**

Este trabajo tiene como objetivo el estudio de la respuesta dinámica y los efectos ISE del edificio SIS, mediante el análisis de una selección de los registros más significativos que han sido obtenidos tras la puesta en marcha de su instrumentación. Para el cumplimiento de este, se hace uso de metodologías paramétricas y no paramétricas en el análisis de las señales registradas y además, se abarcan procedimientos de tipo analítico para la confrontación teórica de los resultados experimentales.

Adicionalmente, se busca establecer una base para los trabajos posteriores sobre el edificio SIS. Los resultados y propiedades de la estructura y de los efectos ISE, que de este trabajo se derivan, deberán ser una relevante guía para la elaboración de modelos lineales y no lineales de la estructura y para las posteriores comparaciones que puedan establecerse, con los trabajos ya realizados sobre edificios instrumentados en la ciudad de México.

Complementariamente, pero de manera no menos importante, cabe anotar que este trabajo pretende aportar resultados que ilustren una mejor comprensión de los efectos ISE, para una correcta utilización y futura afinación de procedimientos como los que plantea la propuesta de las NTCDS-RCDF (2000) en la ciudad de México, y ser una contribución para futuras incursiones en este tema por parte de las normas de diseño del Estado de Guerrero.

En una primera parte del trabajo se presentan las características estructurales del edificio y su cimentación, así como la instrumentación del mismo y la selección de los registros a ser estudiados. Resaltando sus características más relevantes.

Más adelante se abordan las metodologías a ser utilizadas en el análisis de las señales registradas. Algunas de estas son las que se ha acostumbrado utilizar en el análisis del comportamiento de edificios instrumentados en la ciudad de México (Toro, 1997; Zapata 2001; Murià-Vila y Rodríguez, 2002; Palacios, 2003). Mientras que en otros casos, se apela a variaciones de las mismas o al uso de nuevos procedimientos y herramientas.

Respecto al estudio tradicionalmente abordado, se hace un análisis de tipo espectral en el que se utilizan metodologías no paramétricas de identificación de sistemas para la estimación de las propiedades de la estructura y, haciendo uso de modelos simplificados, para la valoración de las propiedades de los efectos ISE (Luco, 1980; Luco *et al.*, 1987).

Estas mismas propiedades son estimadas con algunos de los modelos propuestos por Zapata (2001), mediante un análisis paramétrico modal que ajusta la respuesta en el tiempo y las propiedades de modelos de uno o varios grados de libertad a la respuesta medida en la estructura. Este procedimiento permite estimar las frecuencias fundamentales, factores de participación, fracciones de amortiguamiento crítico y formas modales del sistema.

Como ampliación a estos estudios se hace un trabajo de tipo no paramétrico en el dominio del tiempo con el procedimiento de cruces por cero. Se explora su utilidad en el análisis de las propiedades dinámicas del sistema y los subsistemas de estructura e interacción.

Adicionalmente, las propiedades de rigidez del subsistema de interacción derivadas del uso del modelo simplificado en el análisis espectral, son también estimadas con los procedimientos que han sido incorporados en la propuesta de las NTCDS-RCDF (2000) y utilizando el programa de cómputo Dyna5 (Novak *et al.*, 1995).

Es adecuado aclarar que en el presente trabajo la estimación de los efectos ISE se abarca desde el punto de vista de la interacción inercial. Subestimar los efectos de interacción cinemática, es decir, asumir que la señal de entrada no se ve determinantemente afectada por la presencia de la cimentación, se basa en el concepto de que la longitud de onda que domina un movimiento sísmico en suelo blando, es mucho mayor que las dimensiones de la fundación. Esto es equivalente a decir que, la fundación filtra en un grado considerable, únicamente las frecuencias altas e intermedias de la excitación (Kaynia y Kausel, 1982; Meli *et al.*, 1998).

Existen estudios que permiten concluir que esta simplificación es válida sin afectar de manera significativa la respuesta total del problema o que, el descartarla, induciría a que la respuesta se encuentre del lado conservador (Novak, 1991). Sin embargo, se debe tener presente que aun cuando no se aborde el estudio de la influencia de la interacción cinemática, esta está ineludiblemente presente en los resultados obtenidos, toda vez que no puede aislarse su participación en la reducción de los movimientos de traslación de la cimentación y en la generación de movimientos de cabeceo y torsión en la misma.

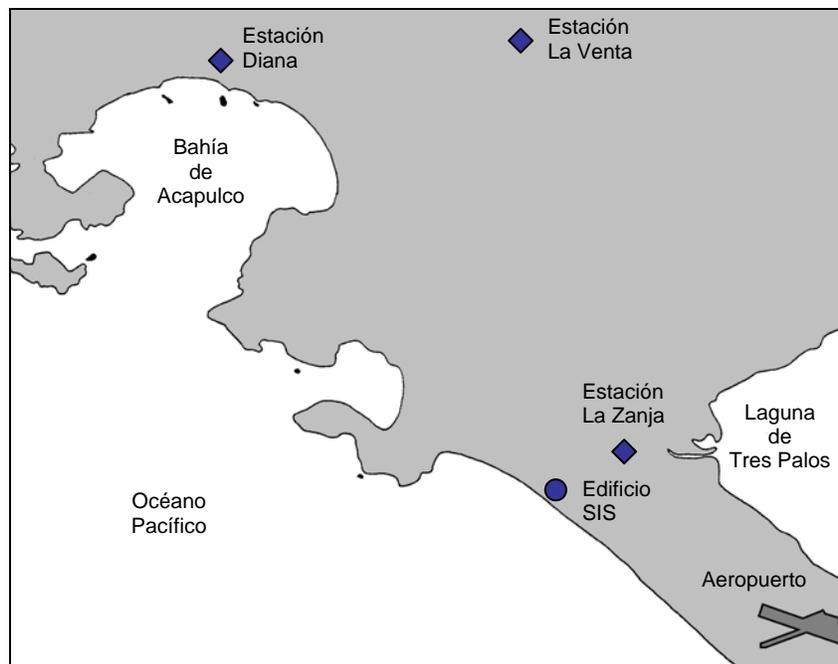
Finalmente, los resultados obtenidos por las diferentes metodologías utilizadas son comparados entre sí y con los derivados de los registros de vibración ambiental capturados con la misma red de instrumentación. Su análisis permite destacar las bondades y limitaciones de cada una de las técnicas y presentar las conclusiones más relevantes que este estudio permitió identificar sobre el comportamiento del edificio y su cimentación.

# CAPÍTULO 1

## EL EDIFICIO SIS

### 1.1 LOCALIZACIÓN

El edificio SIS se encuentra ubicado en el sector de Playa Diamante en Acapulco, Guerrero, cerca al aeropuerto internacional de la ciudad (fig 1.1). Esta zona pertenece a un área de depósitos de barra donde se encuentran arenas de compacidad variable (Lermo, 2002). De acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para los Municipios del Estado de Guerrero (NTCDS-RCMEG, 1989), el sitio pertenece a la zona sísmica D, con terreno Tipo III, al que corresponde un coeficiente sísmico  $c = 1.08$ .



*Fig 1.1 - Localización del edificio*

### 1.2 DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La edificación está compuesta por un semisótano utilizado como estacionamiento, una planta baja de uso común y 16 niveles de apartamentos, más el nivel de azotea. La planta del semisótano cuenta con 32.90 m en la dirección que se ha denominado como longitudinal (L), contra 37.55 m en la dirección que se reconocerá como transversal (T). Por su parte, la planta típica es de 23.90 por 24.60 m en las direcciones L y T, respectivamente (figs 1.2 y 1.3).

El semisótano tiene una altura de 2.80 m y está desplantado a una profundidad de 0.80 m. La altura típica de entrepiso es de 3.60 m, con excepción de la planta baja y el último nivel que cuentan con 4.45 y 3.80 m, respectivamente. La altura total del edificio es de 71.50 m (figs 1.4 a 1.6).

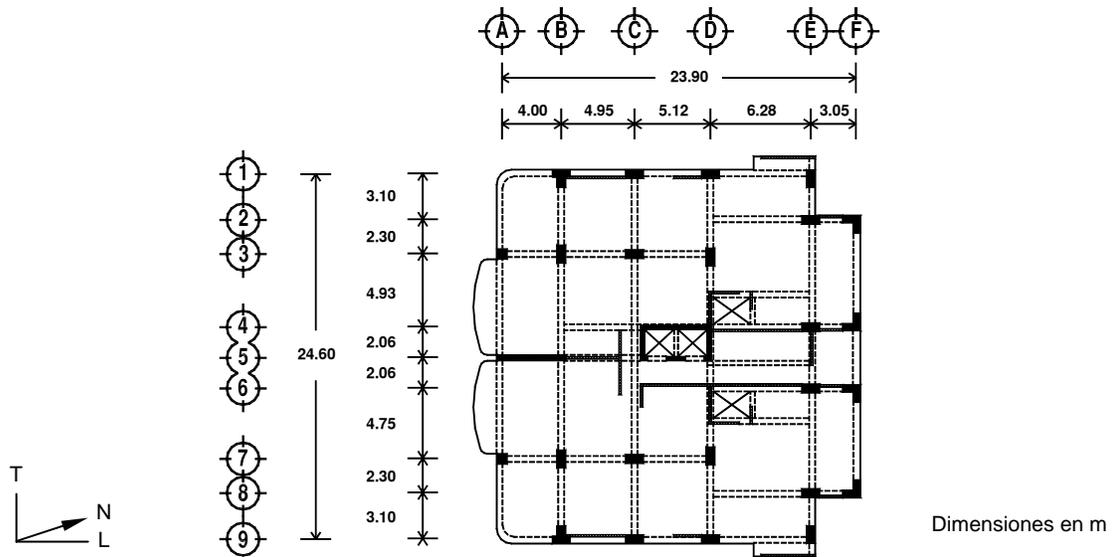


Fig 1.2 - Planta tipo

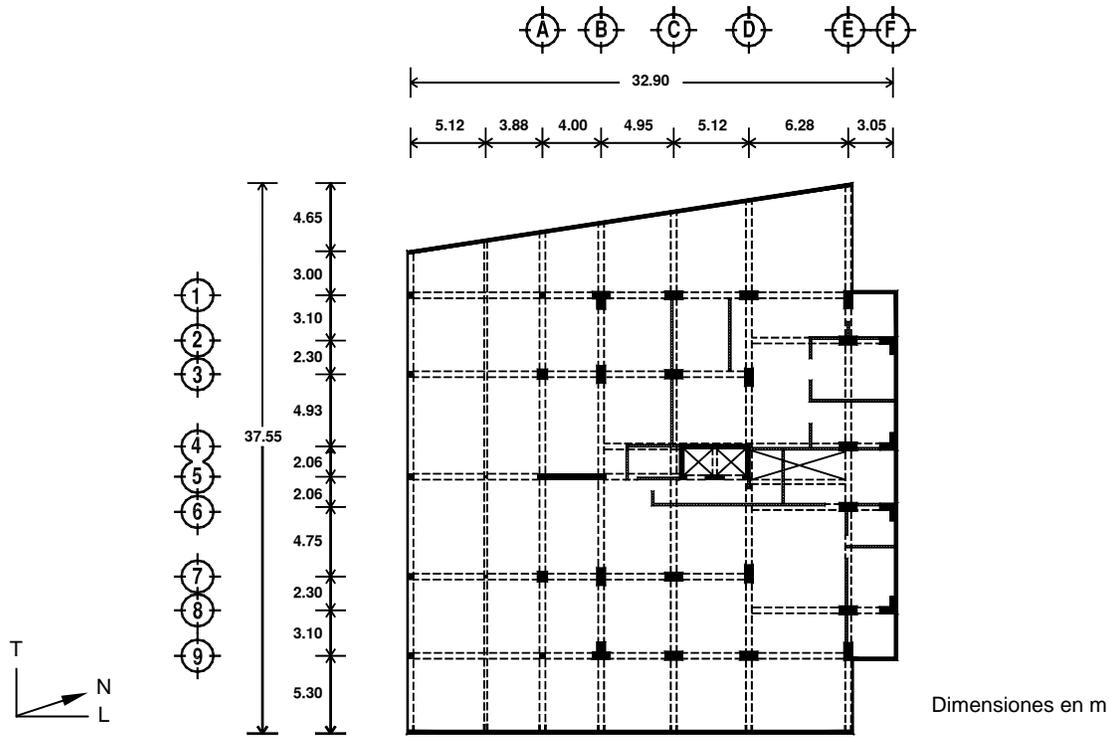
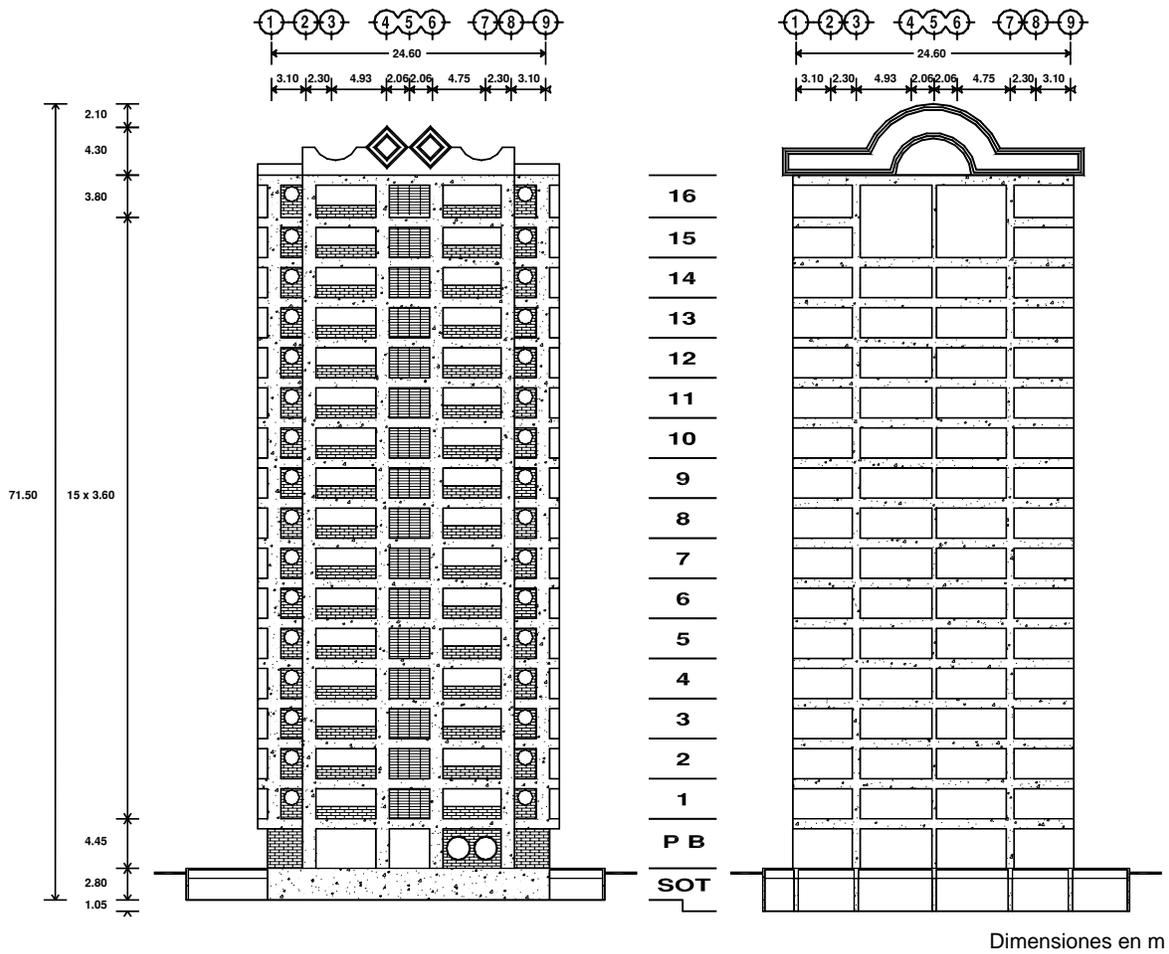


Fig 1.3 - Planta del sótano

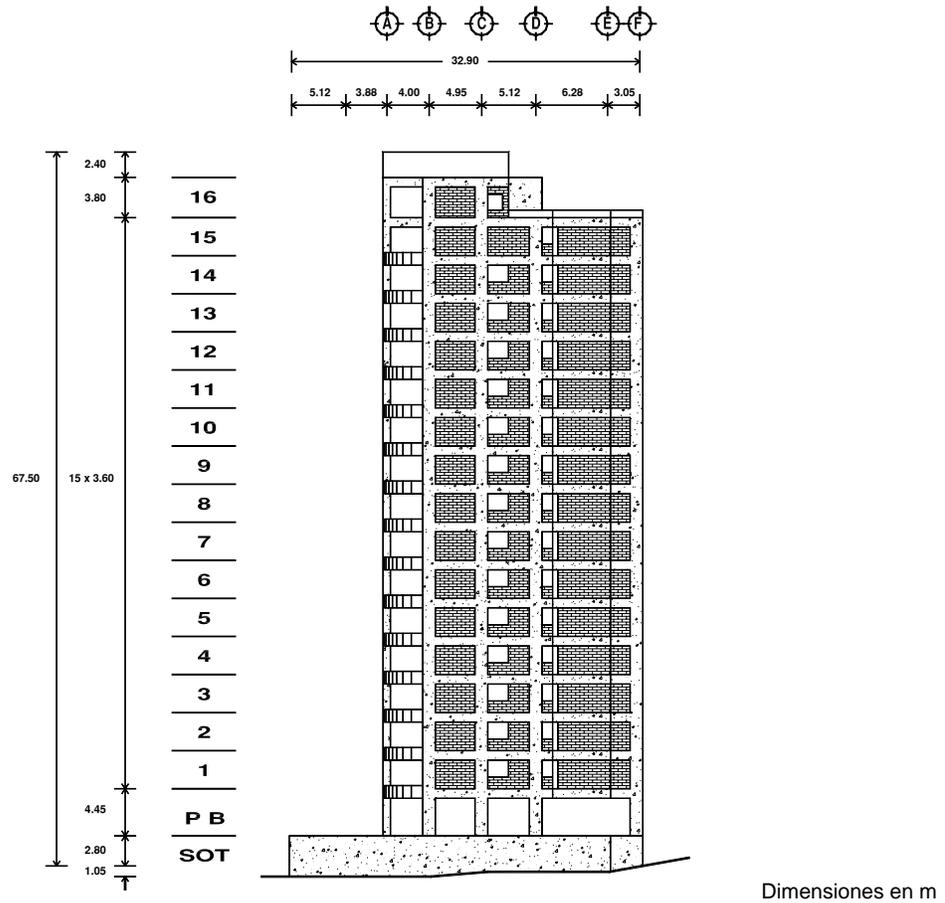


**Fig 1.4 - Fachada norte (izquierda) y fachada sur (derecha)**

Estructuralmente, el edificio está compuesto por columnas de concreto reforzado, la mayoría de estas de sección rectangular y dos grupos con secciones T y L. Hacen parte también del sistema estructural, muros de concreto reforzado, uno de ellos ubicado en la dirección longitudinal y los restantes, conformando el cubo de elevadores. Adicionalmente, en el perímetro y en algunas divisiones internas, se cuenta con la presencia de muros de mampostería. El sistema de piso está compuesto por losas macizas, con un espesor de 0.10 m, monolíticas a las traves perimetrales, estas últimas tienen un peralte de 0.90 m.

Por su parte, la cimentación está compuesta por muros de concreto reforzado en los costados norte, este y oriente del sótano, contratrabes de 2.00 m de peralte y 30 pilas de fricción, con sección circular de 1.00, 1.20, 1.40 y 1.60 m de diámetro, vaciadas en el sitio y que se extienden a una profundidad de 12.5 m por debajo del nivel de piso del sótano (fig 1.7). Las pilas se ligaron a las contratrabes que a su vez se encuentran prolongadas de forma tal que reciben las columnas y muros de la estructura.

La resistencia nominal del concreto es  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$ , mientras que la del acero es  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ .

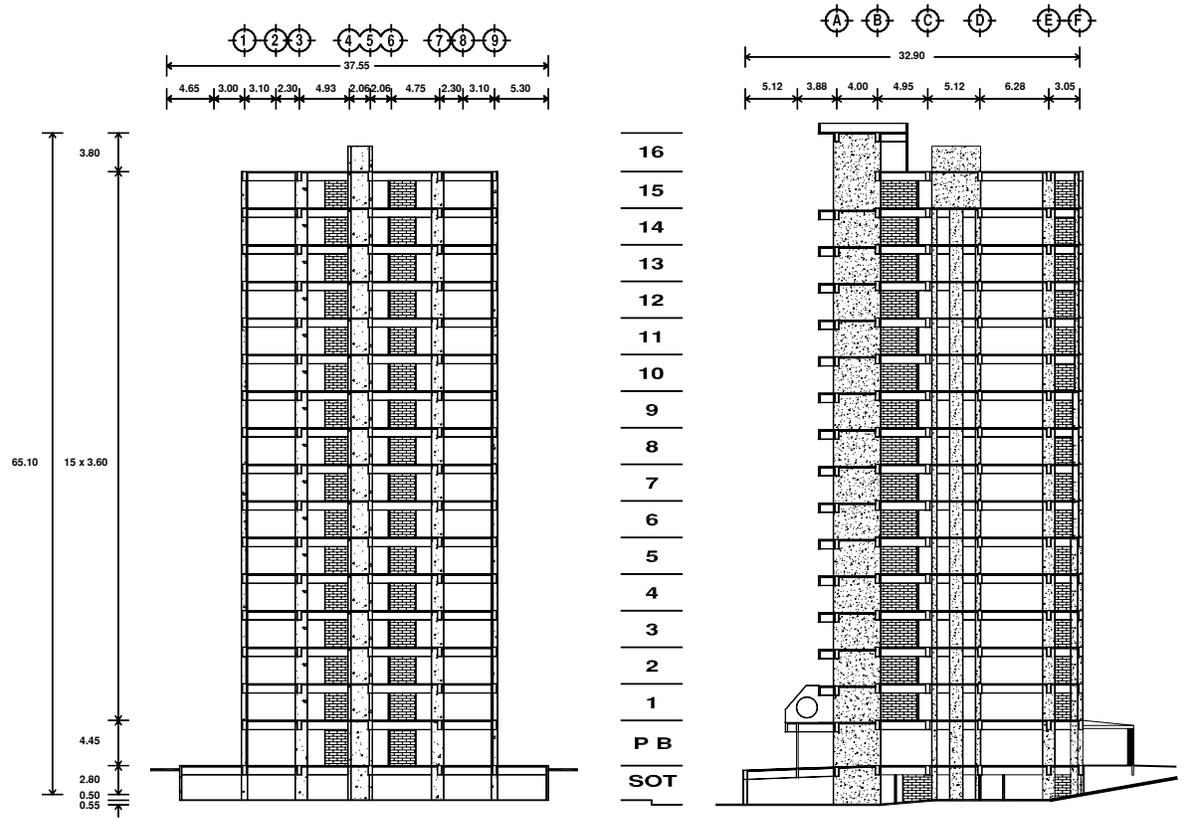


**Fig 1.5 - Fachada lateral (oriente)**

### 1.3 DESCRIPCIÓN DEL SUELO DE CIMENTACIÓN

El suelo sobre el cual se encuentra desplantado el edificio SIS pertenece a una zona geotécnica de depósitos de barra, la cual se caracteriza por la presencia de arena fina a media y cuya formación pertenece a los médanos producto de la acción eólica y el mar. Se ha identificado que estos materiales llegan a superar espesores de 20 y 30 m (Ovando y Romo, 1992; Gutiérrez y Singh, 1992; Chávez-García y Cuenca, 1998).

En el lugar de construcción del edificio y en un terreno adyacente se realizaron estudios geotécnicos que permitieron determinar la estratigrafía del sitio y la frecuencia fundamental del suelo (Lermo, 2002). En lo que se refiere a los estratos observados, en un primer tramo de aproximadamente 1.00 m de profundidad, se encontró arena fina, materia orgánica y desechos de construcción. El primer estrato de suelo propiamente dicho, alcanzó 3.00 m de profundidad, en él se encontró arena fina poco limosa, de compacidad suelta a semicompacta, de color café claro. En éste se estimó un contenido promedio de humedad de 10 % y se determinó un contenido de finos de 15 %.



Dimensiones en m

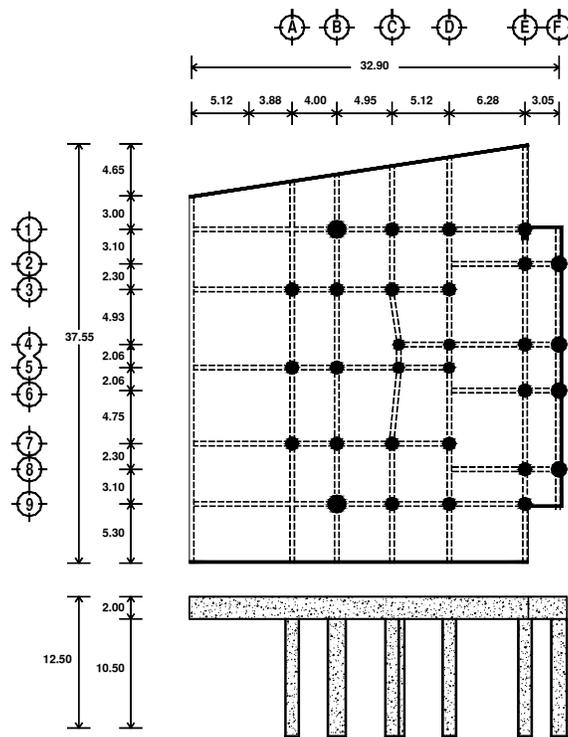
**Fig 1.6 - Cortes a lo largo del eje D (izquierda) y a lo largo del eje 5 (derecha)**

Entre 3.00 y 5.70 m, se encontró arena fina de color café claro, semicompacta, con propiedades de humedad y contenido de finos similares al estrato anterior. De igual forma sucede con el tramo comprendido entre 5.70 y 8.20 m, donde se identificó material compuesto por arena limosa, también de color café claro.

El estrato delimitado entre 8.20 y 9.00 m de profundidad, la arena se caracterizó por la presencia de granos. Lo mismo se tiene para el estrato siguiente que llega hasta 10.80 m, y que se describió como arena graduada de color café claro con granos redondeados. En este tramo se estimó una humedad natural promedio de 20 % y un contenido de finos de 37 %.

El último estrato caracterizado por el estudio alcanzó los 27.00 m de profundidad. En el se encontró arena fina silica, parcialmente limpia, con un contenido variable de conchas. Esta masa de suelo presentó un color gris olivo, una humedad promedio de 25 % y un valor de 30 % correspondiente al contenido de material fino.

El nivel de aguas freáticas se identificó a 5.60 m de profundidad. En la tabla 1.1 se presenta un resumen de la prueba de penetración estándar realizada.



Dimensiones en m

**Fig 1.7 - Cimentación del edificio**

En cuanto a la estimación de la frecuencia fundamental del suelo, en el trabajo citado (Lermo, 2002) se desarrolló un modelo matemático unidimensional que fue calibrado con funciones de transferencia empíricas obtenidas mediante pruebas de vibración ambiental.

Para la estimación de las funciones de transferencia empíricas, se obtuvieron registros en dos componentes horizontales y en el componente vertical de siete puntos en un predio adyacente al del edificio SIS. Para cada uno de estos registros se seleccionaron ventanas de 30 y 60 s de duración, para las cuales se calculó su transformada de amplitudes de Fourier. A partir de los espectros obtenidos y promediados para cada punto, se determinaron las funciones de transferencia entre cada una de los componentes horizontales y el respectivo componente vertical.

En cada una de las funciones de transferencia determinadas se identificó la primera frecuencia fundamental asociada al movimiento característico del suelo y la amplificación asociada a la misma. No corresponde al alcance del presente estudio discutir sobre la validez de esta técnica para la estimación de las frecuencias de sitio, sin embargo, en la misma referencia se comparan los resultados con trabajos realizados en estaciones de registro sísmico de la zona y los valores encontrados se aceptan como coherentes y cercanos a los esperados.

En la tabla 1.2 se presentan las frecuencias dominantes y amplificaciones máximas relativas entre los componentes horizontales y el componente vertical (Nakamura, 1989), obtenidas para cada uno de los siete sitios analizados. Estos resultados señalan una variación de la frecuencia dominante entre 0.71 y 0.78 Hz, de forma tal que el valor promedio es de 0.75 Hz. En cuanto a la amplificación se observa una variación de 4 a 9, con un valor promedio de 7.

**Tabla 1.1 - Sondeo geotécnico (SPT) realizado en la zona**

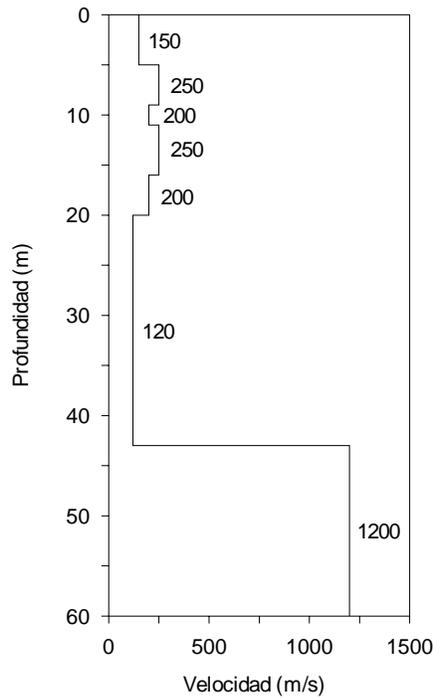
Descripción del estrato	Profundidad (m)	Número de Golpes
Arena poco limosa de color café claro	3.0	5
		8
		9
		11
		10
Arena fina de color café claro	5.7	11
		15
		36
Arena limosa de color café claro	8.2	>50
		42
		>50
Arena de color café claro, con granos.	9.0	>50
Arena graduada con granos redondeados, de color café claro	10.8	>50
		47
		40
		33
		49
		37
		>50
		44
		>50
		46
		>50
>50		
Arena fina silica parcialmente limpia, de color gris olivo, con contenido variable de conchas	27.0	41
		43
		31
		39
		35
		>50
		45
>50		

**Tabla 1.2 - Frecuencias dominantes y amplificaciones relativas**

Punto	Frecuencia dominante (Hz)	Amplificación relativa máxima
1	0.76	7
2	0.78	9
3	0.73	7
4	0.71	8
5	0.78	9
6	0.76	4
7	0.73	5
Promedio	0.75	7

Conocidas las características del suelo se presentan en la misma referencia (Lermo, 2002) los resultados del modelo unidimensional que fue calibrado para que reprodujera el valor promedio de la frecuencia dominante y que fuera envolvente de las funciones de transferencia, de forma tal que representara adecuadamente la amplificación máxima.

El resultado fue una curva que se ajustó adecuadamente entre 0.40 y 1.30 Hz, intervalo éste que cubre los valores de frecuencias dominantes identificados. La frecuencia fundamental ajustó al valor promedio de 0.75 Hz y a la amplificación a la máxima de los siete puntos estudiados. En dicho modelo se usó como valor de peso específico del suelo  $\gamma = 1.80 \text{ t/m}^3$ , una fracción de amortiguamiento crítico de 0.02 y por su parte, los valores de la velocidad de ondas S ( $V_s$ ) se estimaron de acuerdo a como se muestra en la fig 1.8.



**Fig 1.8 - Perfil de velocidad de ondas S estimado para la zona**

Es importante mencionar que la frecuencia fundamental del suelo identificada por Lermo (2002) concuerda con los resultados a los que se llegó mediante el análisis de espectros de respuesta de los primeros eventos registrados en el edificio (Murià-Vila *et al.*, 2002), en el que las primeras frecuencias dominantes del suelo se identificaron entre 0.71 y 0.79 Hz.

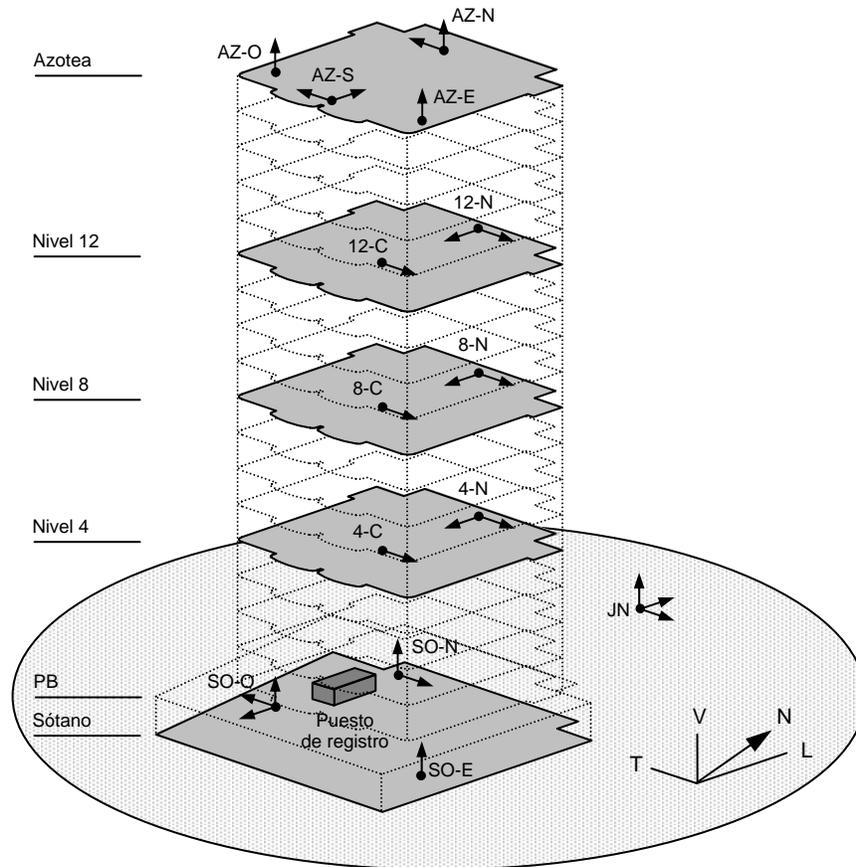
## CAPÍTULO 2

### INSTRUMENTACIÓN Y REGISTROS SÍSMICOS

#### 2.1 INSTRUMENTACIÓN SÍSMICA

En el edificio se instaló, a finales del año 2001, una red compuesta por 18 servoacelerómetros uniaxiales y dos triaxiales, que conforman en total un sistema de 24 canales para el registro de los movimientos de la estructura, su cimentación y el suelo circundante. La ubicación y orientación de estos instrumentos se muestra en la fig 2.1, donde T, L y V denotan las direcciones transversal, longitudinal y vertical. A continuación se detalla su distribución en el edificio.

- En el jardín al norte del edificio, un sensor triaxial (JN).
- En el sótano, un sensor triaxial en la esquina oeste (SO-O), dos sensores al norte (SO-N) y un sensor más en el costado este (SO-E).
- En cada uno de los niveles 4, 8 y 12, se instalaron tres sensores, dos en el costado norte (nivel-N) y uno al centro, en el interior del foso del ascensor (nivel-C).
- Por último, en la azotea, se colocaron seis instrumentos, uno al norte (AZ-N), dos al sur (AZ-S) y dos en las esquinas este y oeste (AZ-O y AZ-E, respectivamente).



**Fig 2.1 - Ubicación y dirección de los instrumentos**

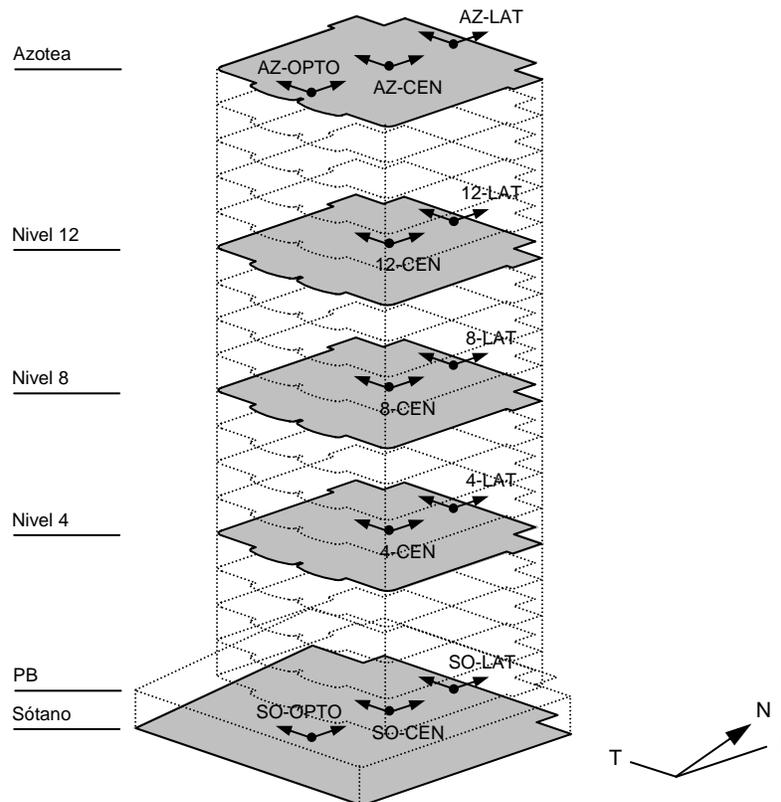
Los sensores se encuentran conectados en una configuración maestro esclavo, mediante la cual, una vez que el movimiento en el sensor maestro rebasa un umbral previamente establecido, se activa la operación simultánea de la red de forma que, gracias a que cuenta con una señal común de tiempo, se obtienen registros sincronizados que permiten conocer con precisión el movimiento relativo de todos los puntos instrumentados.

Cada uno de los sensores está conectado por cable a uno de los dos registradores ubicados en el puesto de registro, que se encuentra localizado en el sótano (fig 2.1). A cada registrador llegan 12 señales, las cuales son almacenadas con una velocidad de captura de 100 muestras por segundo (delta de tiempo de 0.01 s) y con una memoria de pre-evento y post-evento de 20 y 30 s, respectivamente.

La instrumentación posee características tales que permite registrar con suficiente resolución las vibraciones de sismos de pequeña a gran intensidad, así como de vibración ambiental. Información adicional sobre los sistemas utilizados, escalas de registro y sistemas de captura puede encontrarse en Alcántara *et al.* (2002).

## 2.2 GENERACIÓN DE SEÑALES

Inicialmente, en procura de obtener señales de mejor calidad, se deseaba que los instrumentos estuvieran en las esquinas o en los costados de cada nivel. Sin embargo, para el caso de los pisos intermedios, ello hubiese implicado tratar directamente con cada uno de los propietarios de los apartamentos. Por lo tanto se optó por la distribución descrita en la fig 2.1, por medio de la cual se puede visualizar la respuesta tridimensional del sistema suelo-estructura.



**Fig 2.2 - Localización de las señales horizontales generadas**

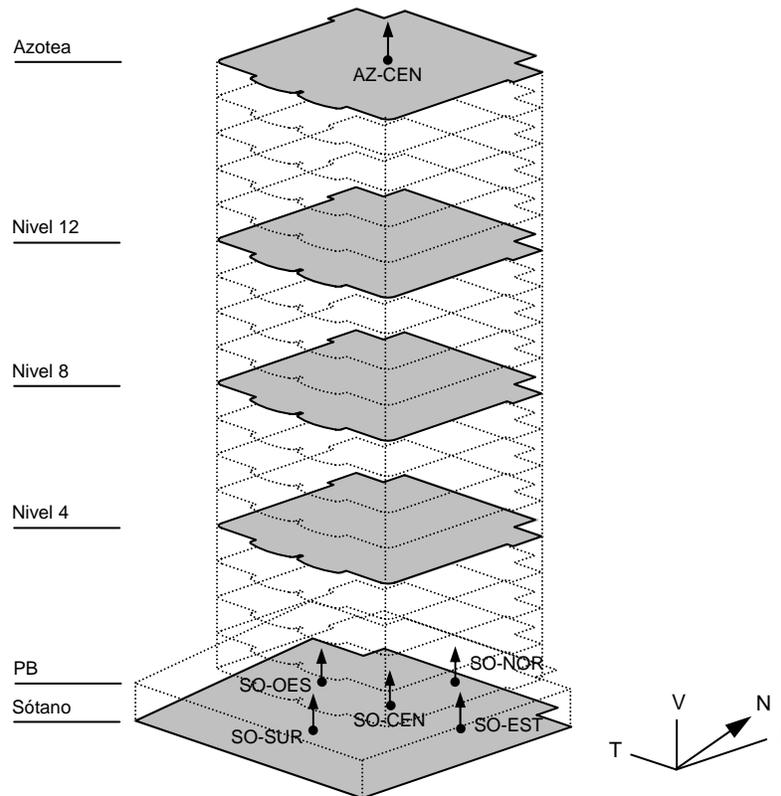
Por lo anterior, y debido a otros detalles de la distribución y ocupación del edificio, los instrumentos al norte del sótano y la azotea tampoco pudieron ser colocados en los mismos lugares en que se ubicaron los instrumentos al norte de los niveles 4, 8 y 12.

A raíz de esto, y con la intención de optimizar el estudio del comportamiento del edificio y los efectos de torsión e interacción suelo-estructura, se desarrollaron las expresiones necesarias para la generación de señales en puntos estratégicos. El procedimiento utilizado, el cual se basa en la hipótesis de diafragma rígido, se describe en el apéndice A y fue implementado en un programa de cómputo (Taborda y Murià-Vila, 2002b).

Conforme a lo anterior se generaron señales de movimiento horizontal en el centro geométrico de cada uno de los niveles (CEN), en el costado norte del edificio, denominado lateral (LAT) y además, en el sótano y la azotea, en el costado sur, denominado como opuesto (OPTO). La ubicación y orientación estas señales es la que se muestra en la fig 2.2.

En cuanto a las señales verticales, en el sótano se generaron registros en cada uno de los costados sur, norte, este y oeste, así como en el centro (SUR, NOR, EST, OES y CEN, respectivamente). Además, se generaron señales verticales en el centro de la azotea (fig 2.3).

Es así como la distribución de las señales generadas permite identificar de manera más clara las propiedades dinámicas del sistema, tales como las frecuencias fundamentales y formas modales, detectar los efectos de torsión y estudiar las características de interacción suelo-estructura.



**Fig 2.3 - Localización de las señales verticales generadas**

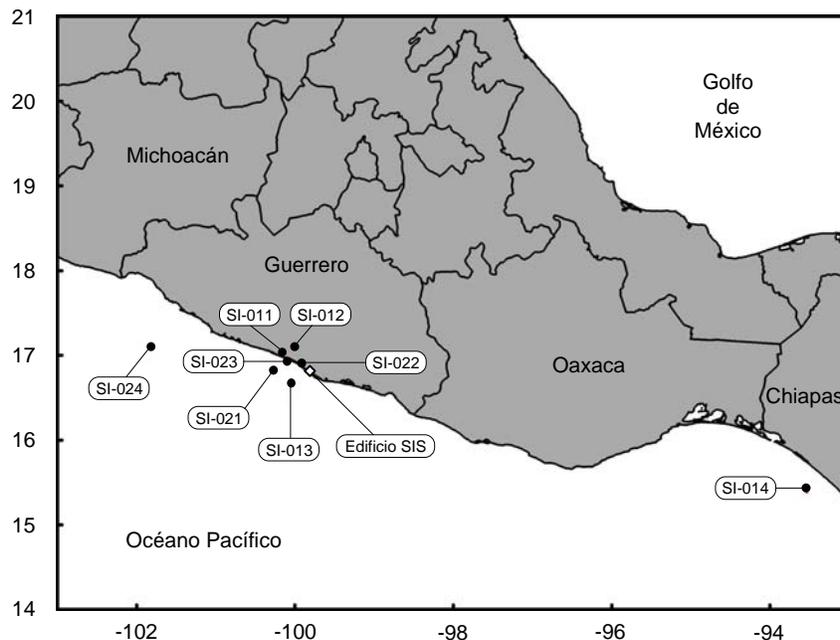
### 2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

La red acelerográfica del edificio comenzó a trabajar en septiembre de 2001. A partir del momento de su puesta en marcha hasta la fecha de publicación del presente trabajo se han registrado más de 90 sismos de pequeña intensidad, en todos ellos la instrumentación ha trabajado satisfactoriamente. Durante este tiempo se han realizado dos pruebas de vibración ambiental (VA), la primera de ellas el 13 de septiembre de 2001 (VA-011) y la segunda el 24 de abril de 2002 (VA-021).

Para el análisis realizado en el presente trabajo, del período de tiempo comprendido entre las dos pruebas de VA, se seleccionaron ocho registros sísmicos que ilustran la respuesta del sistema. La elección de los eventos se hizo con base en los siguientes aspectos:

- Escoger los eventos más intensos que se hubiesen registrado, aun cuando desafortunadamente ninguno de ellos es de gran intensidad.
- Seleccionar registros cuyas características frecuenciales fueran variables entre si.
- Contar con sismos de fuente cercana y lejana.
- Incluir aquellos eventos en los que se apreciase claramente la etapa de vibración luego de la fase intensa del movimiento obtenido en los sensores JN.

El resultado de esta selección fue el análisis de ocho eventos, siete de los cuales tuvieron epicentro en las costas y el interior del estado de Guerrero y uno, cuyo lugar de origen, se ubicó en las costas del estado de Chiapas (fig 2.4).



**Fig 2.4 - Epicentros de los sismos seleccionados**

En la tabla 2.1 se pueden observar las principales características de los sismos seleccionados: fecha, magnitud, distancia epicentral al edificio, intensidad horizontal de Arias (1970) calculada con los registros de la estación de campo (JN) y las aceleraciones máximas del terreno (JN), el sótano (SO) y la azotea del edificio (AZ) en los dos componentes de movimiento (T y L).

Tabla 2.1 - Características de los eventos sísmicos

Evento	Fecha	$M_E^*$	Distancia Epicentral (km)	$I_{Arias}$ (cm/s)	$A_{max} T$ (cm/s <sup>2</sup> )			$A_{max} L$ (cm/s <sup>2</sup> )		
					Terreno	Sótano	Azotea	Terreno	Sótano	Azotea
SI-011	8/10/01	6.1	44	16.420	101.90	47.97	164.65	77.48	57.61	165.86
SI-012	8/10/01	3.4	43	0.184	15.01	6.46	18.61	9.69	3.71	7.96
SI-013	29/10/01	4.0	30	0.019	8.05	2.89	10.45	4.01	2.35	4.03
SI-014	28/11/01	6.0	688	0.017	2.01	0.38	8.51	2.71	0.42	2.51
SI-021	20/01/02	4.7	52	0.873	28.55	13.06	41.94	28.76	19.38	7.04
SI-022	17/02/02	4.6	19	1.490	47.75	19.29	36.97	32.14	19.38	40.48
SI-023	19/02/02	4.6	36	0.530	31.22	12.84	32.81	17.97	9.17	22.85
SI-024	18/04/02	5.5	213	0.004	0.90	0.35	6.45	0.68	0.32	3.04

\* Fuente: Servicio Sismológico Nacional.

Puede observarse que los eventos de mayor magnitud fueron los ocurridos el 8 de octubre y 28 de noviembre de 2001. Sin embargo, éste último tuvo epicentro a una gran distancia del edificio, por lo que fue para el primero de los dos (SI-011), para el que se obtuvieron los valores máximos en intensidad y aceleraciones. Este sismo tuvo epicentro en el poblado de Coyuca de Benítez, a 30 km al noroeste de la ciudad de Acapulco, y presentó una magnitud de 6.1. Los valores máximos de aceleración registrados en el edificio fueron de 166, 58 y 102 cm/s<sup>2</sup> en la azotea, el sótano y el jardín, respectivamente. El edificio no presentó daños.

Es preciso anotar que, excepto en los eventos SI-014 y SI-021, las aceleraciones máximas en terreno se dieron en la dirección transversal. Por su parte, las aceleraciones máximas en azotea se dan en la dirección T para los eventos SI-012 a SI-021, SI-023 y SI-024, mientras que en la dirección L sólo ocurren en los sismos SI-011 y SI-022.

Adicionalmente, como evidencia de los efectos ISE, interesa resaltar las diferencias que se observan entre las aceleraciones del terreno y el sótano. En general, los valores del sótano son menores que los del terreno, con reducciones que varían entre 26 y 85 %. Las mayores reducciones se dieron en el evento SI-014 (81 y 85 % para T y L, respectivamente), mientras que las menores correspondieron a los sismos SI-021 en T (54 %) y SI-011 en L (26 %). En promedio, las reducciones en T fueron de 61 % y en L de 48 %.

En las figs 2.5 a 2.8 se muestran las historias de aceleraciones en los componentes T y L, correspondientes a los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN. En las figs 2.9 y 2.10 se ilustran los registros obtenidos en el componente V, para los mismos puntos. Adicionalmente, en las figs 2.11 y 2.12 se presentan los componentes de torsión en la azotea y el sótano, obtenidos como la diferencia entre las señales AZ-LAT y AZ-CEN, y entre SOT-LAT y SOT-CEN, respectivamente.

En estas señales es importante resaltar la diferencia entre los movimientos de SO y JN, en las cuales puede notarse claramente la influencia de los efectos ISE, los cuales parecen pronunciarse de manera más notable en los tramos correspondientes a las fases intensas de la excitación.

También es interesante observar la duración del movimiento de vibración de la estructura una vez que culminan estas fases intensas, como por ejemplo sucede en el sismo SI-011 luego de los primeros 50 s, o en los eventos SI-021, SI-022 y SI-023 pasados los 40 s iniciales. Tiempos tras los cuales la estructura experimenta alrededor de 50 s de vibración libre.

Esta misma vibración de apariencia senoidal se hace visible en los dos eventos de menor intensidad (SI-014 y SI-024) en los cuales el movimiento de respuesta en la azotea es prácticamente monocromático.

De otra parte, en las figs 2.13 y 2.14 pueden verse los espectros de amplitudes de Fourier (EAF) de las aceleraciones registradas en los puntos AZ-CEN y JN, mientras que en la fig 2.15 se presentan los EAF de las señales de AZ-CEN y AZ-LAT, a partir de las cuales se determinaron las señales de torsión. Adicionalmente,

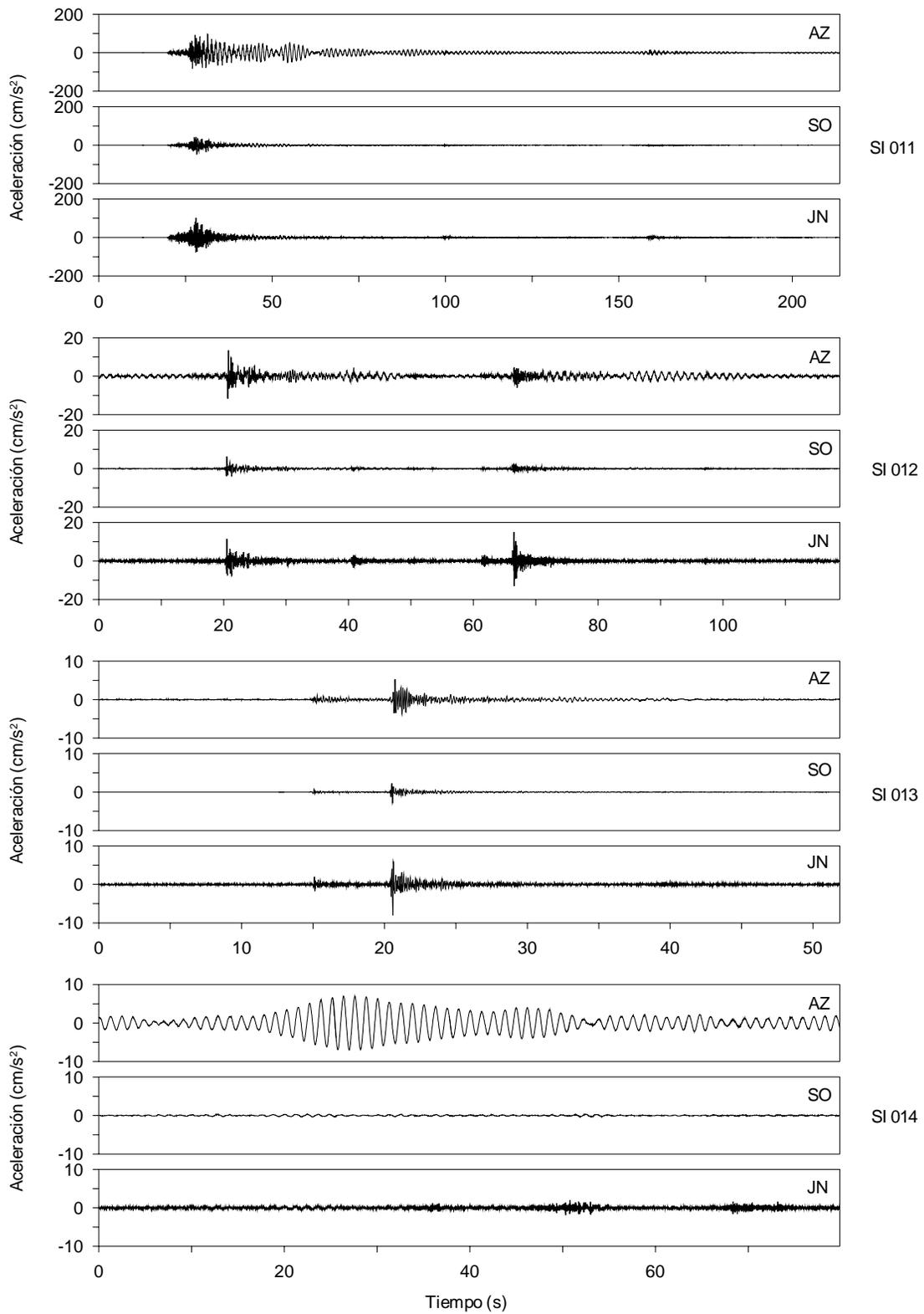


Fig 2.5 - Acelerogramas en los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en T (eventos SI-011 a SI-014)

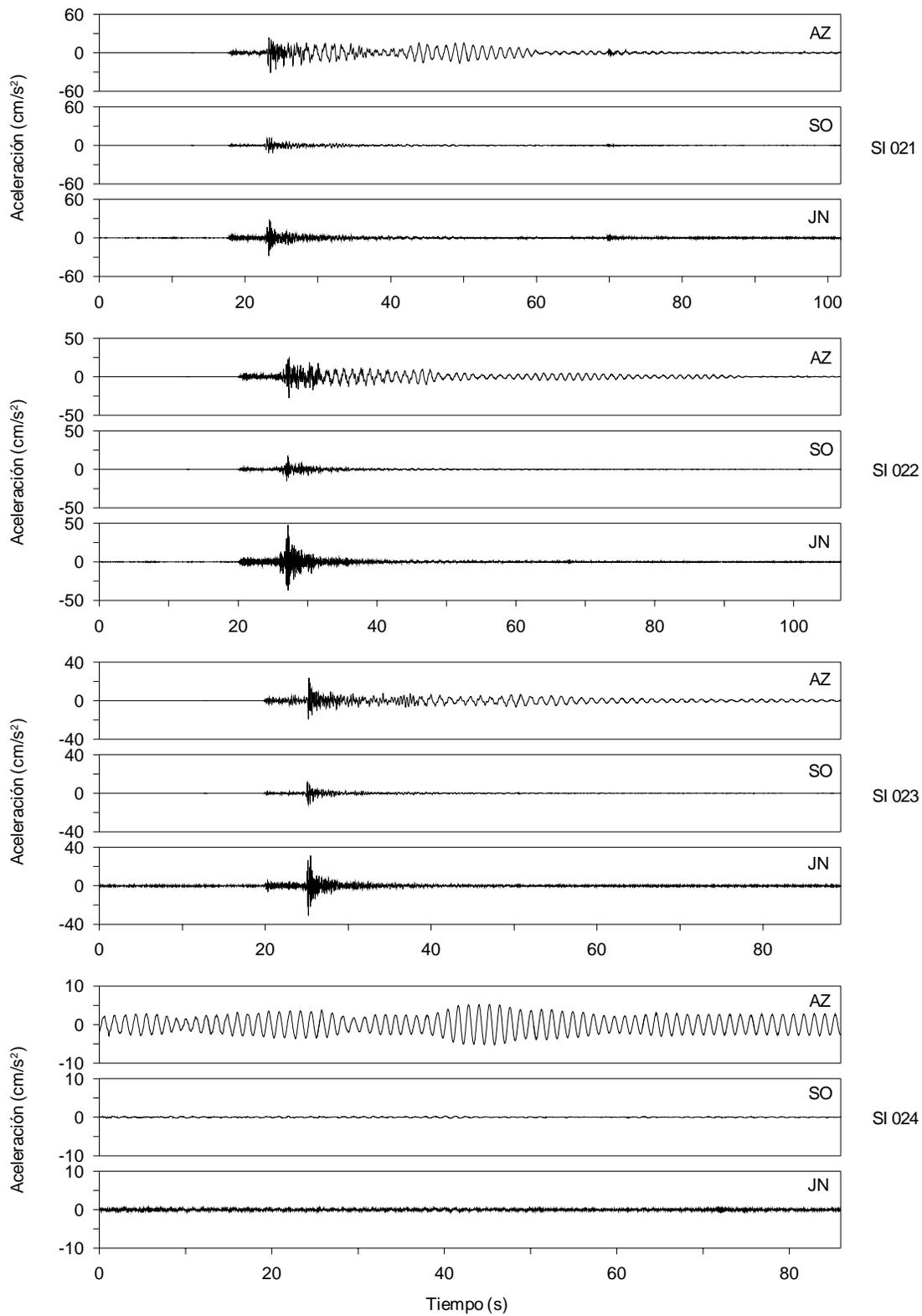


Fig 2.6 - Acelerogramas en los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en T (eventos SI-021 a SI-024)

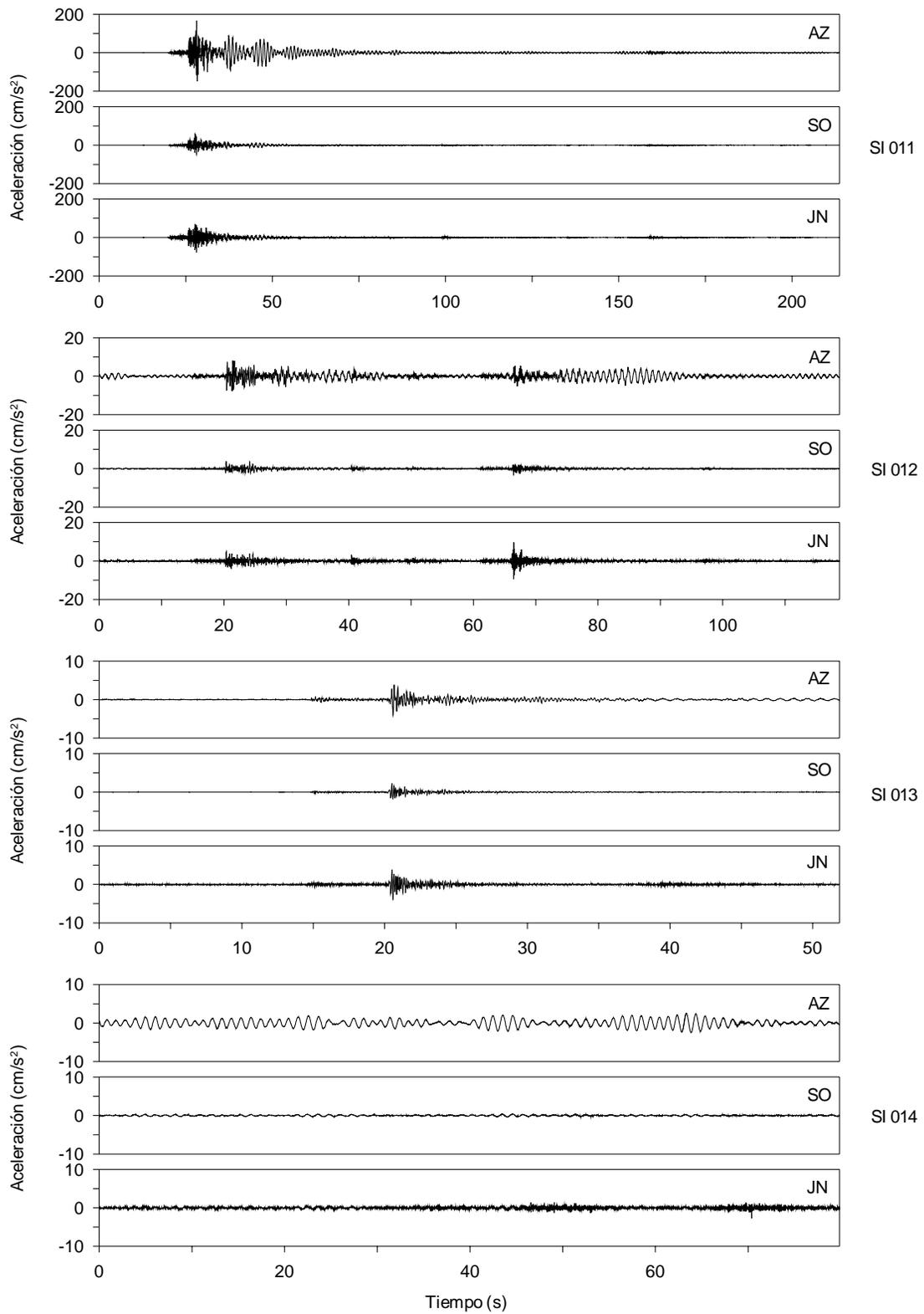


Fig 2.7 - Acelerogramas en los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en L (eventos SI-011 a SI-014)

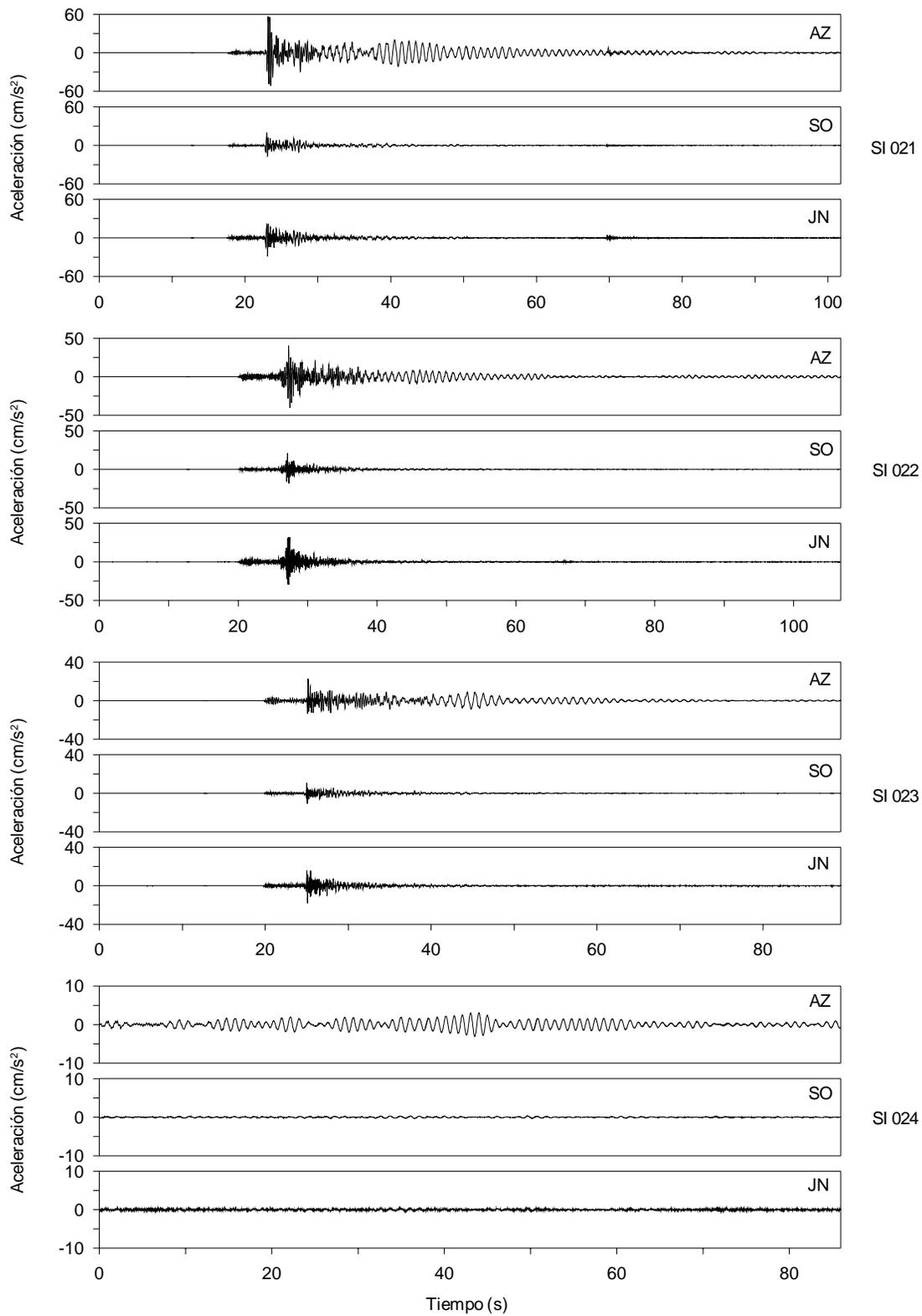


Fig 2.8 - Acelerogramas en los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en L (eventos SI-021 a SI-024)

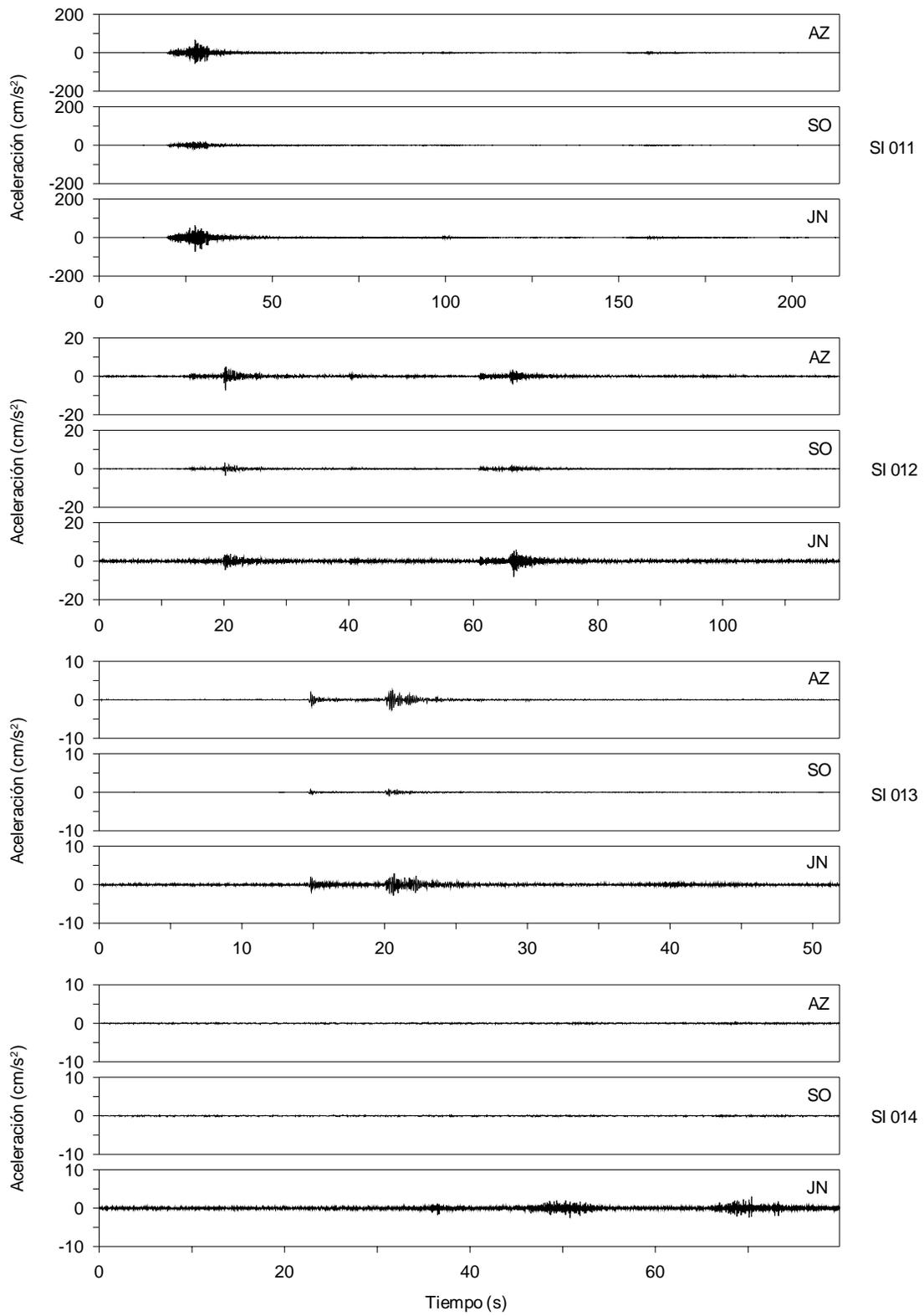


Fig 2.9 - Acelerogramas en los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en V (eventos SI-011 a SI-014)

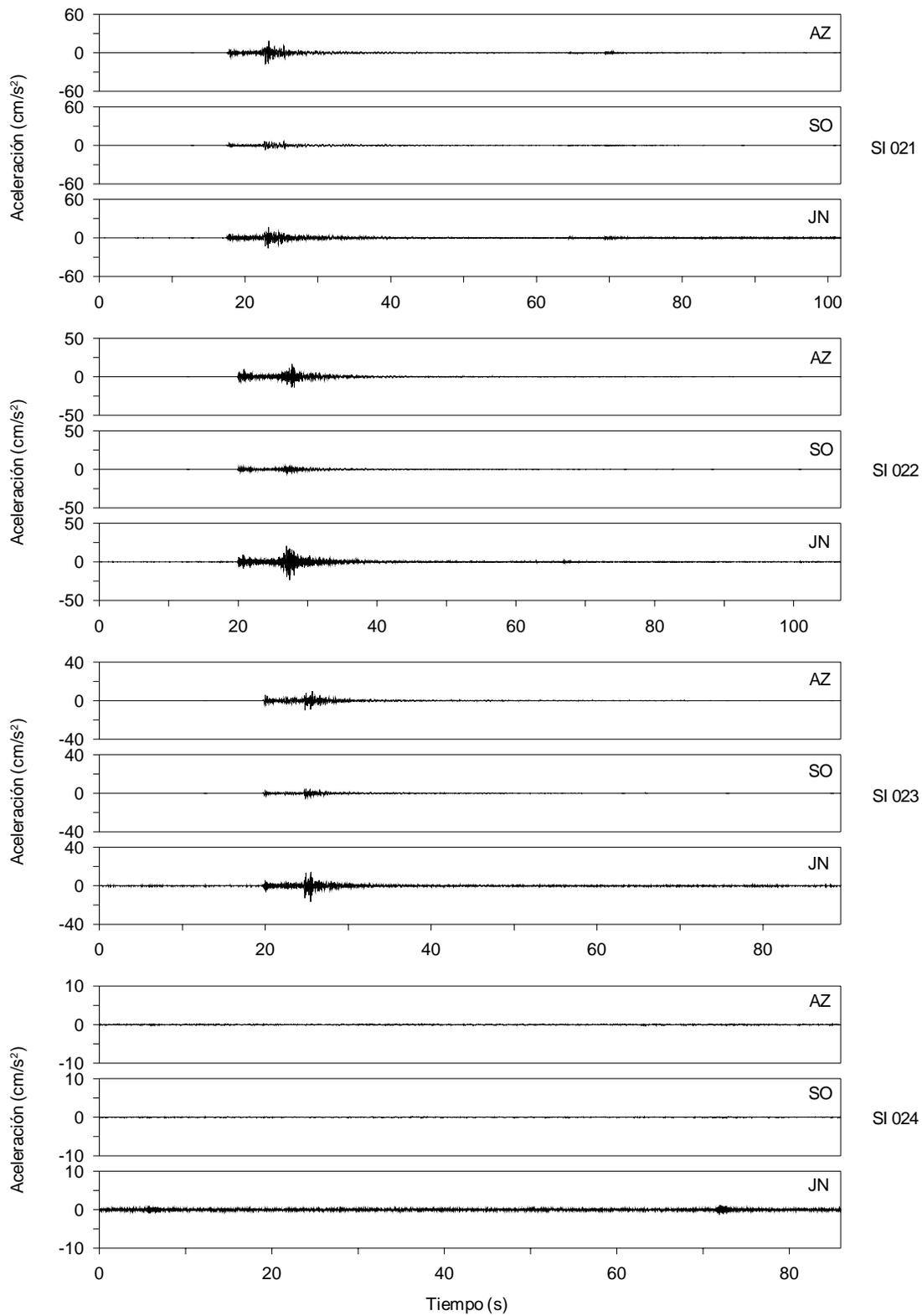
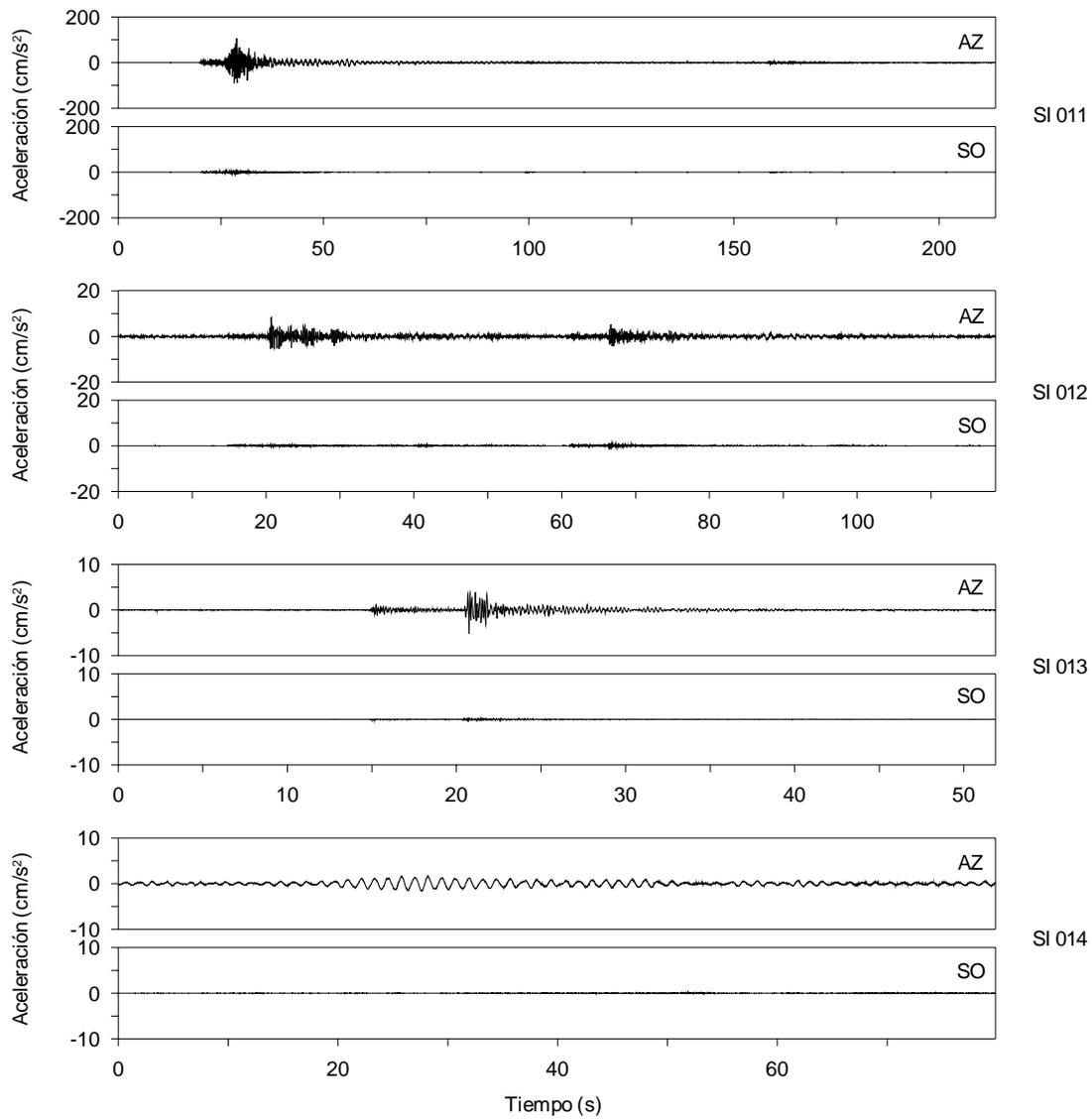


Fig 2.10 - Acelerogramas en los puntos AZ-CEN, SO-CEN y JN en V (eventos SI-021 a SI-024)

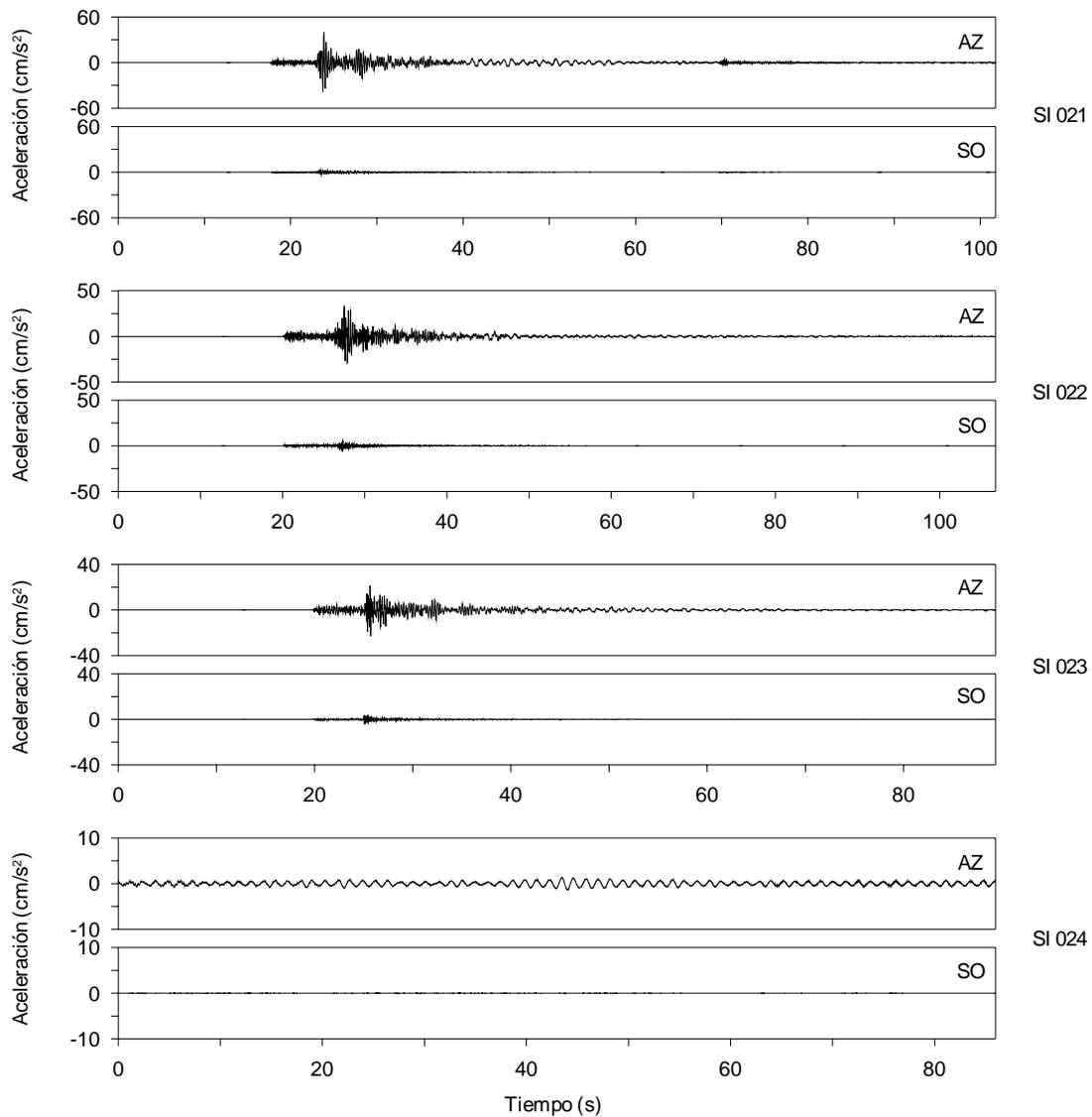


**Fig 2.11 - Aceleraciones de torsión en la azotea y el sótano (eventos SI-011 a SI-014)**

en las figs 2.16 a 2.18 se comparan los EAF de las señales del sótano (SO-CEN) y el terreno (JN) en los tres componentes de movimiento (T, L y V, respectivamente).

Un aspecto a señalar en los espectros de Fourier de estos eventos sísmicos es que, a diferencia de los movimientos típicos de edificios en suelos blandos de la ciudad de México, en los cuales el contenido de energía se concentra entre 0 y 4 Hz, en el caso de el edificio SIS puede observarse un importante contenido de frecuencias hasta valores superiores a 10 Hz.

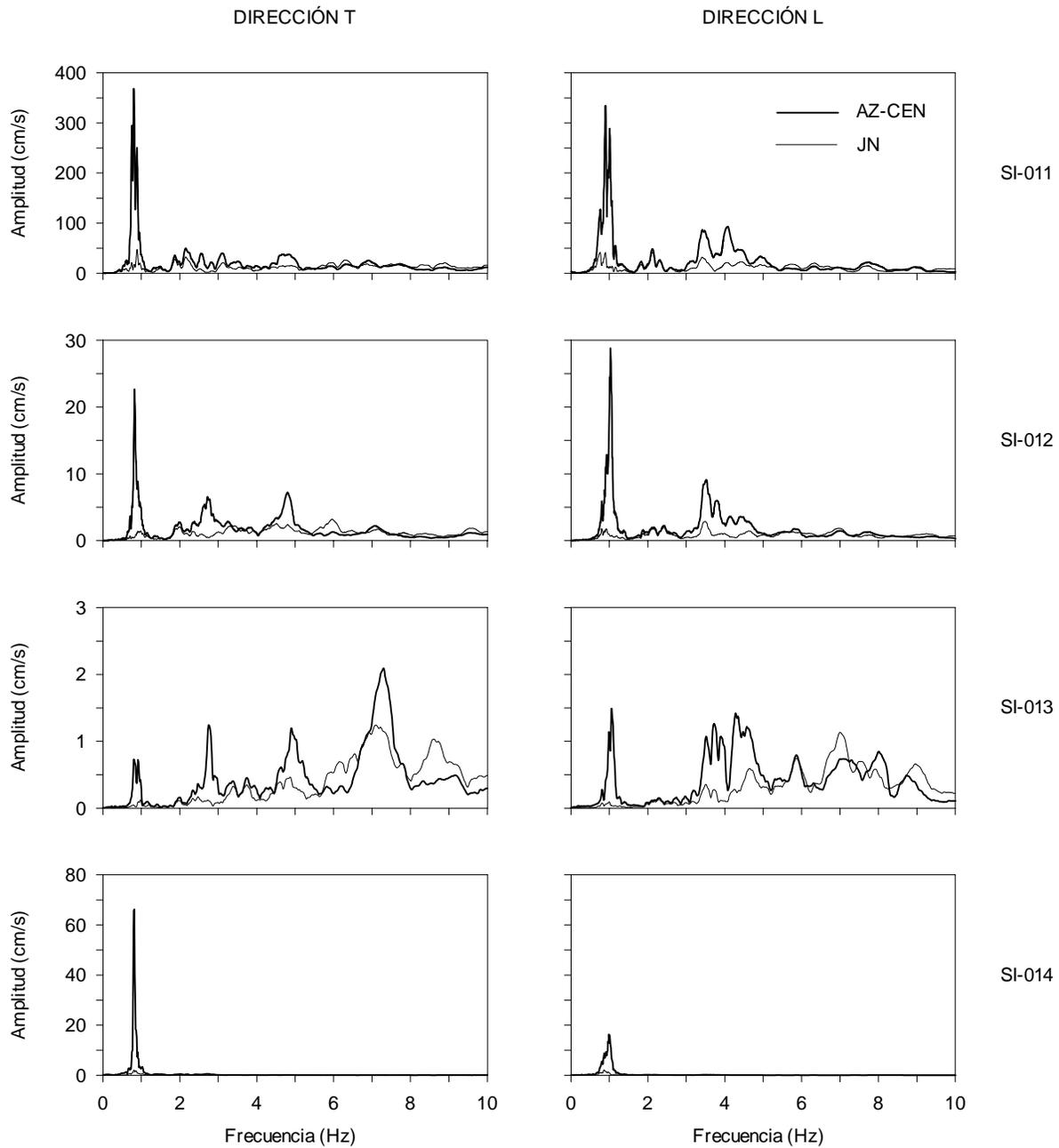
Esta característica hará posible identificar con suficiente resolución las frecuencias fundamentales y de algunos modos superiores, así como sus formas modales, evitando las dificultades que se esperarían en otro tipo de estructuras instrumentadas.



**Fig 2.12 - Aceleraciones de torsión en la azotea y el sótano (eventos SI-021 a SI-024)**

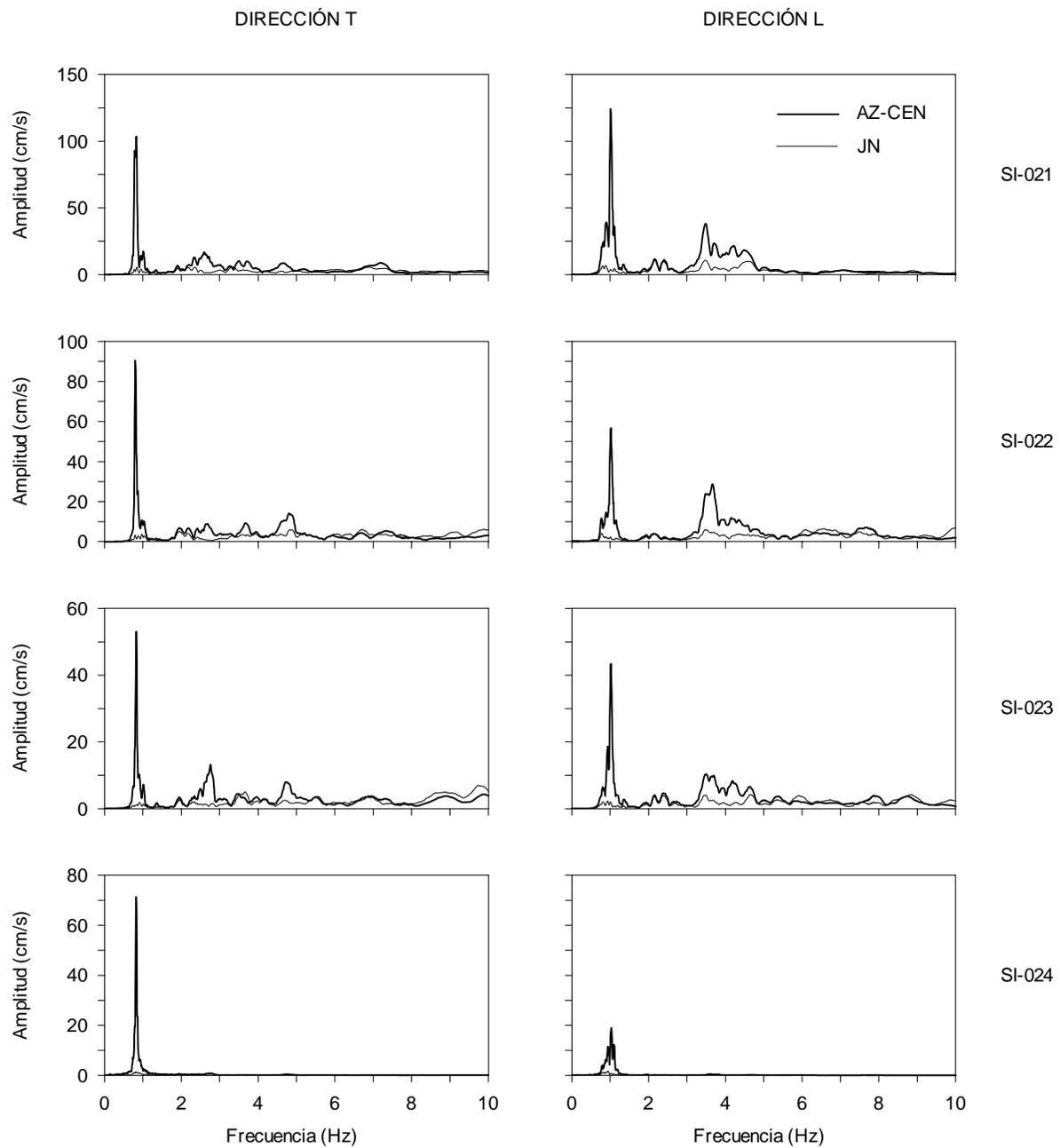
Es valioso resaltar la diversidad de características de los espectros. Eventos como el SI-011, SI-012 y SI-021 a SI-023 presentan espectros con contenidos de frecuencia distribuidos en un amplio intervalo de frecuencias, principalmente entre 0.5 y 5 Hz. Mientras que eventos de fuente lejana o muy baja intensidad, como los son los sismos SI-014 y SI-024 presentan espectros con la energía concentrada en una franja angosta de frecuencia, concentrada alrededor de 1.0 Hz y cuyas características monocromáticas ya se hicieron notar en las observaciones sobre los registros.

Muy distinto es el caso del evento SI-013, el cual a pesar de ser uno de los de menor intensidad, tiene una gran riqueza de contenido de energía en frecuencias superiores al intervalo de 0.8 a 1.0 Hz, que es el predominante en el resto de las señales. En éste en cambio, los mayores contenidos de energía se dan en las cercanías de 2.8, 5.0 y 7.5 Hz, en la dirección T y alrededor de 1.0 Hz y entre 3.2 y 4.5 Hz, en la dirección L.

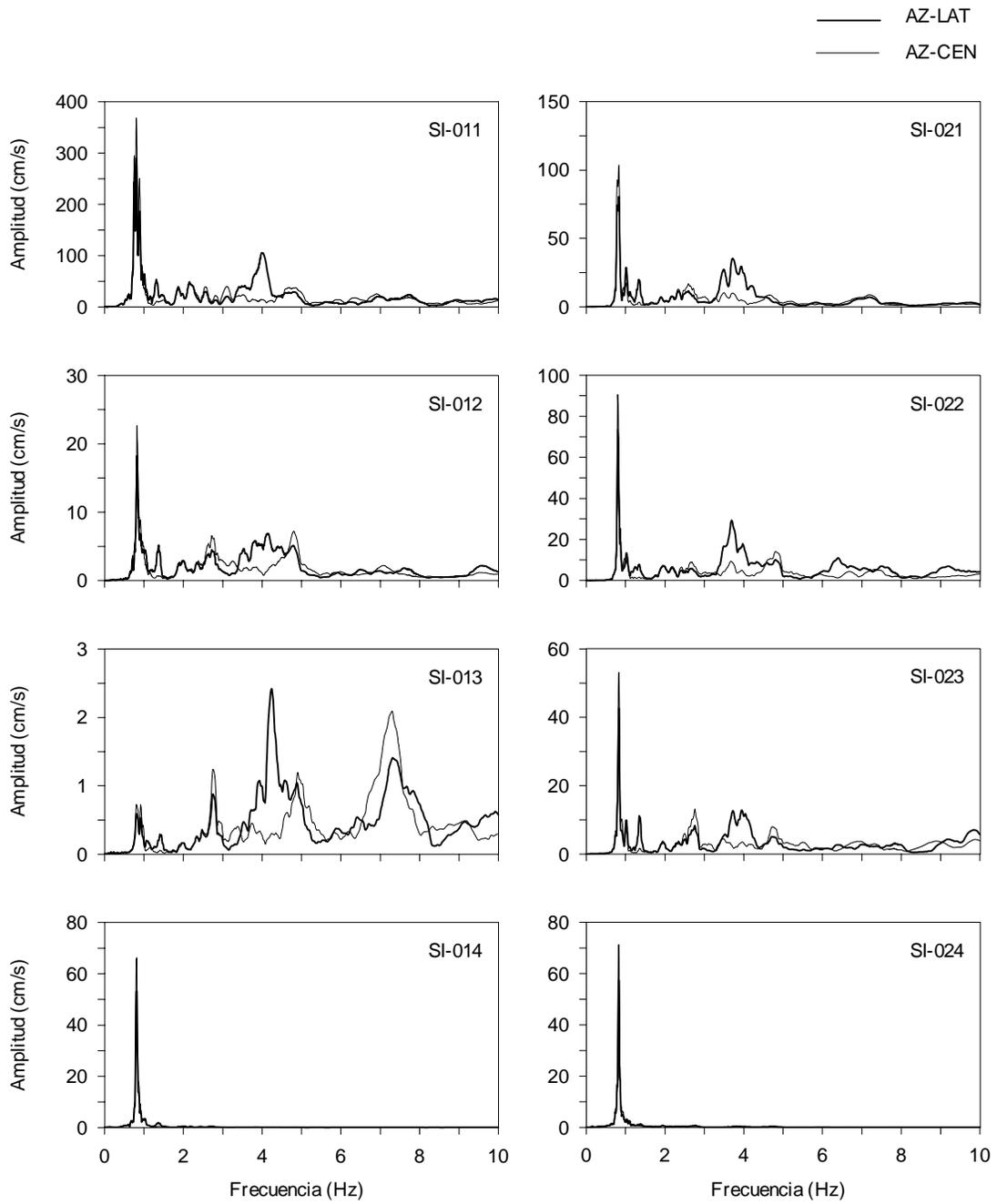


**Fig 2.13 - Espectros de amplitudes de Fourier de las aceleraciones de los puntos AZ-CEN y JN para los eventos SI-011 a SI-014**

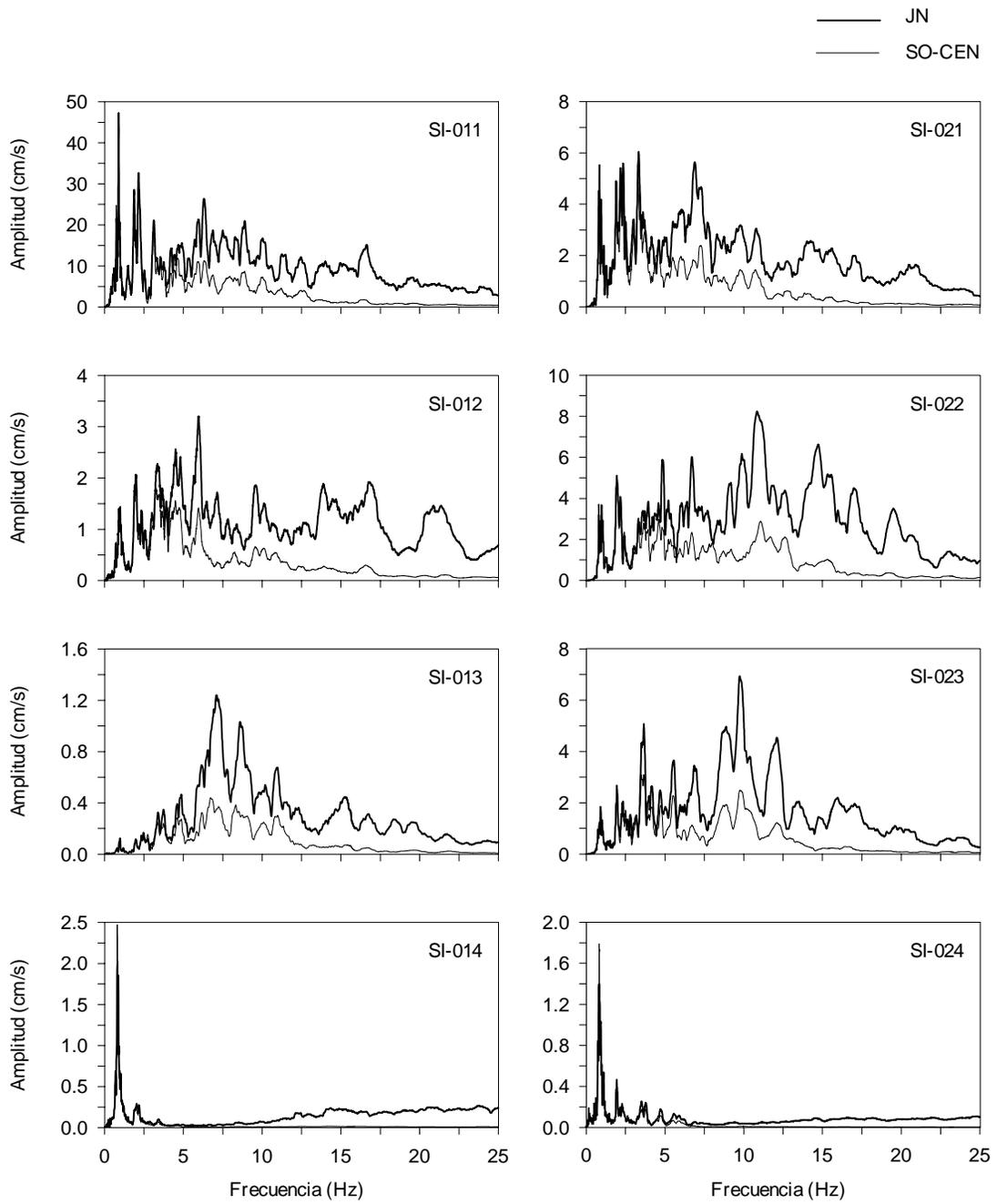
Finalmente, de la observación de los espectros de las señales a partir de las cuales se reproduce el componente de torsión, es resaltable la forma en que, claramente, el movimiento del punto AZ-LAT se amplifica con respecto al movimiento en AZ-CEN, diferenciando así el contenido de energía en aquellas frecuencias en las que el movimiento está asociado con el comportamiento de torsión del sistema.



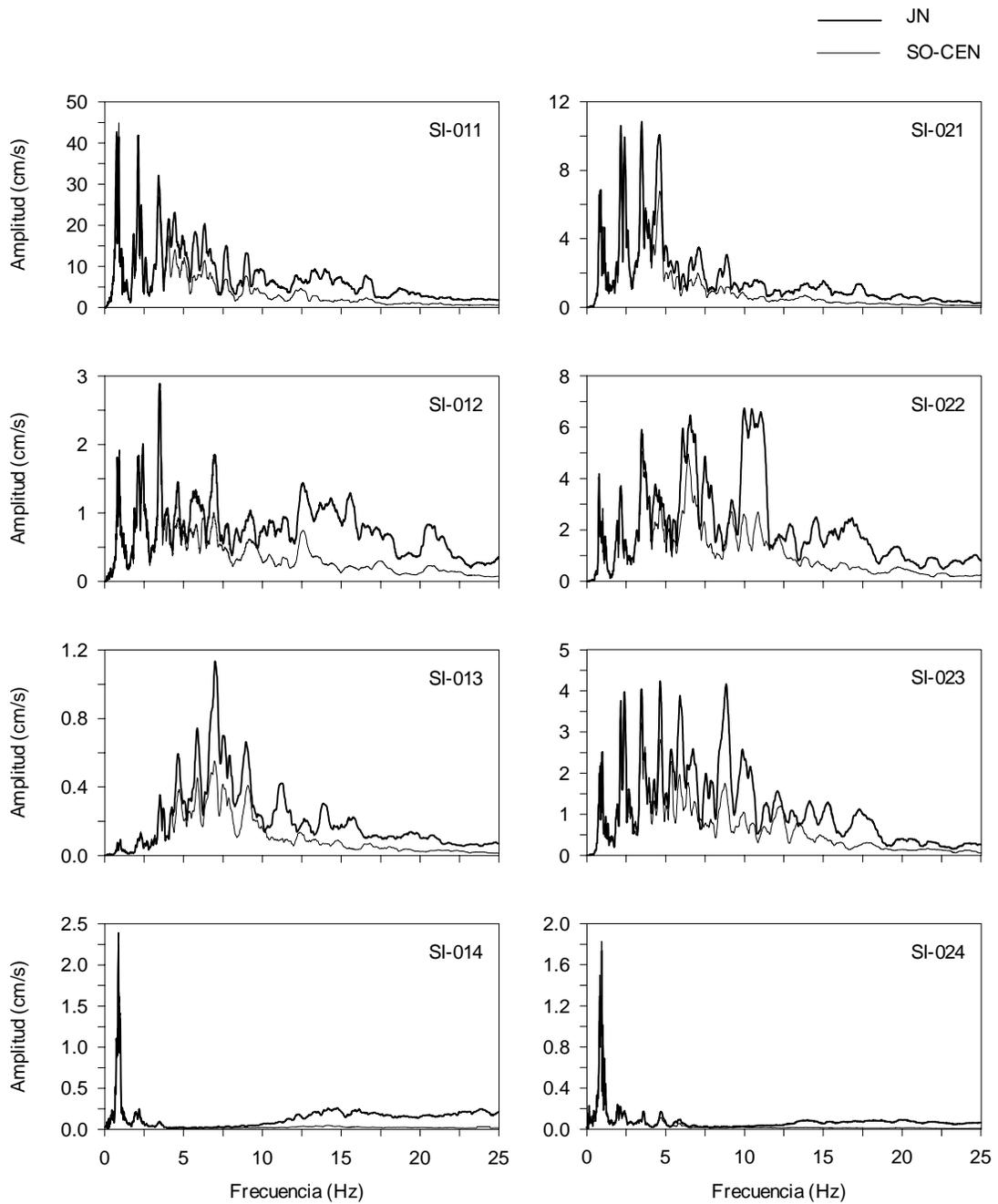
**Fig 2.14 - Espectros de amplitudes de Fourier de las aceleraciones de los puntos AZ-CEN y SO-CEN para los eventos SI-021 a SI-024**



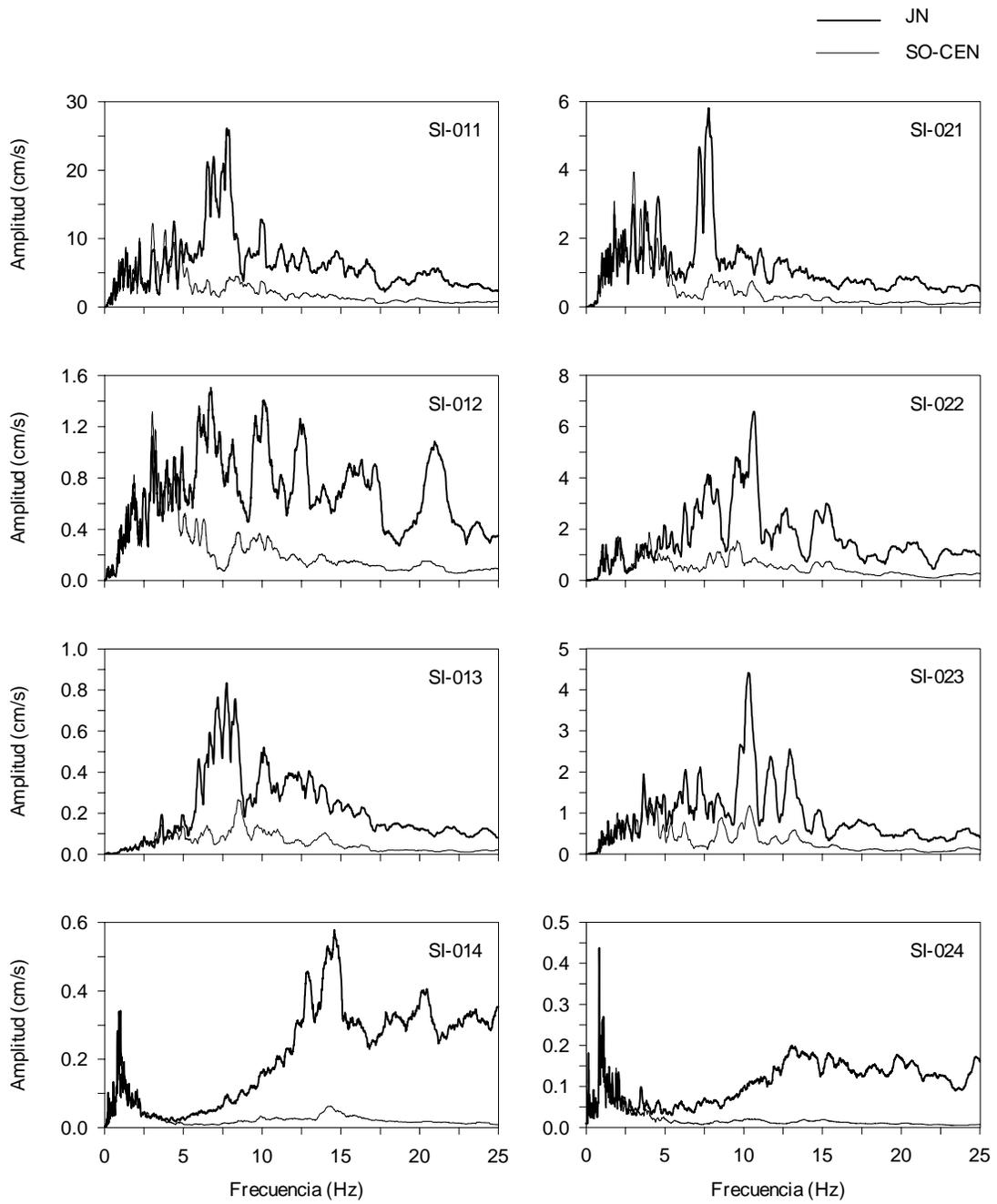
**Fig 2.15 - Espectros de amplitudes de Fourier para las aceleraciones involucradas en el calculo de la torsión (AZ-LAT y AZ-CEN)**



**Fig 2.16 - Espectros de amplitudes de Fourier de las aceleraciones registradas en los puntos SO-CEN y JN en el componente T**



**Fig 2.17 - Espectros de amplitudes de Fourier de las aceleraciones registradas en los puntos SO-CEN y JN en el componente L**



**Fig 2.18 - Espectros de amplitudes de Fourier de las aceleraciones registradas en los puntos SO-CEN y JN en el componente V**

## CAPÍTULO 3

### MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL SISTEMA Y DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

La búsqueda por una adecuada interpretación de los registros provenientes de estructuras instrumentadas y el interés que despierta el deseo de comprender los efectos ISE, ha conducido al desarrollado de diferentes técnicas de análisis de señales y procedimientos de tipo analítico, que permiten identificar las diferentes propiedades de un sistema y los efectos a los que éste se ve sometido por las condiciones de interacción.

En lo que se refiere a la interpretación de señales, se pueden encontrar diversas técnicas que facilitan la identificación de propiedades dinámicas a partir del análisis de registros sísmicos, bien sea con análisis en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, las cuales generalmente se diferencian por ser consideradas como de tipo paramétrico o no paramétrico (Ljung, 1987; Ewins, 1986; Bendat y Piersol, 1989).

En el presente trabajo se abarcan diferentes procedimientos que han sido comúnmente utilizados en México, en estudios de estructuras instrumentadas, para la estimación de las características dinámicas del edificio y del sistema suelo-estructura (Toro, 1997; Murià-Vila *et al.*, 1997 y 2001; Zapata 2001; Murià-Vila y Rodríguez, 2002), y se proponen métodos alternativos para una más completa y mejor interpretación de la información disponible. Adicionalmente, se incursiona en el uso de otras técnicas de fácil implementación y que también permiten identificar algunas de las propiedades que se desean conocer en un sistema.

Por otra parte, se tienen los procedimientos analíticos para la estimación de las propiedades del sistema de interacción suelo-estructura. En la literatura existe una amplia gama de estudios en los cuales se proponen modelos matemáticos para estimar los coeficientes de rigidez del subsistema de interacción (Veletsos y Wei, 1971; Kaynia y Kausel, 1982; Dobry y Gazetas, 1986 y 1988; Gazetas, 1991). Para este trabajo se quiso evaluar la propuesta que al respecto se hace en la versión preliminar de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (NTCDS-RCDF, 2000), y adicionalmente se hizo uso del programa Dyna5 (Novak *et al.*, 1995) como alternativa para la estimación de estos mismos valores.

#### 3.1 ESTIMACIÓN NO PARAMÉTRICA

Se entiende como estimación de tipo no paramétrico, aquella que se hace directamente del análisis de los registros sísmicos obtenidos mediante artificios matemáticos que permiten identificar las propiedades que se desean conocer. En la estimación no paramétrica no se ajusta explícitamente ningún tipo de modelo a la información que se ha obtenido experimentalmente. Generalmente este tipo de estimación se realiza en el dominio de la frecuencia, aunque también hay alternativas con las que se trabaja en el dominio del tiempo.

Los análisis en frecuencia, normalmente se basan en la interpretación de funciones que relacionan las señales de excitación o entrada, a las cuales está sometido un sistema, y las de respuesta o salida. Por su parte, los análisis en el dominio del tiempo, se basan en la interpretación directa que de la señal puede derivarse, bien sea ésta la que se registró en los instrumentos, o el resultado de la manipulación de varias de ellas.

Para ambas alternativas, la selección de las señales y la manipulación a la que han de ser sometidas, se hace de acuerdo con las propiedades dinámicas que se desean identificar. En lo que sigue se abarcan los procedimientos usados para el procesamiento e interpretación de los registros y la información que de ellos puede obtenerse.

### 3.1.1 Análisis en el dominio de la frecuencia

Para realizar este análisis es necesario aplicar a las señales una transformada matemática que las convierta del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, y una vez que estas han sido convertidas, es útil realizar una serie de operaciones de forma tal que se haga aun más fácil su interpretación. En seguida se detalla el procedimiento utilizado para llevar las señales al dominio de la frecuencia y los pasos posteriores para la identificación de las propiedades del sistema y de los efectos ISE.

#### 3.1.1.1 Análisis espectral

Para la aplicación de este método se requiere que los registros sean procesados mediante un análisis espectral convencional (Bendat y Piersol, 1989). Por lo tanto se recurre a la transformación al dominio de la frecuencia mediante la aplicación de la transformada de Fourier, la cual esta dada por

$$\ddot{X}(f) = \int_0^T \ddot{x}(t) e^{-i2\pi f \cdot t} dt \quad (3.1)$$

donde

$\ddot{x}(t)$  es la aceleración absoluta

$\ddot{X}(f)$  es la transformada de Fourier de la aceleración absoluta.

La transformada de la aceleración es una función compleja, lo cual podemos ver de manera más clara si se describe la expresión 3.1 así

$$\ddot{X}(f) = \int_0^T \ddot{x}(t) \cos(2\pi f \cdot t) dt - i \int_0^T \ddot{x}(t) \sin(2\pi f \cdot t) dt \quad (3.2)$$

de forma tal que es válido decir que la transformada de Fourier de la aceleración está compuesta por una parte real y una parte imaginaria, cuya norma o amplitud está dada por

$$|\ddot{X}(f)| = \sqrt{(\ddot{X}_R(f))^2 + (\ddot{X}_I(f))^2} \quad (3.3)$$

donde

$\ddot{X}_R(f)$  es la parte real de la transformada de Fourier de la aceleración

$\ddot{X}_I(f)$  es la parte imaginaria de la transformada de Fourier de la aceleración.

Otra manera de expresar una señal en el dominio de la frecuencia es a través su autoespectro de potencia, el cual se obtienen como

$$S_{\ddot{X}\ddot{X}}(f) = \ddot{X}^*(f) \cdot \ddot{X}(f) \quad (3.4)$$

donde  $\ddot{X}^*(f)$  es el espectro conjugado de Fourier de la aceleración.

La función de la transformada de Fourier cuenta entre sus propiedades con la característica de ser una función simétrica, lo que implica que

$$X^*(f) = X(-f) \quad (3.5)$$

de manera que resulta útil definir el espectro de potencia como

$$G_{XX}(f) = \begin{cases} 2S_{XX}(f) & ; f > 0 \\ S_{XX}(f) & ; f = 0 \\ 0 & ; f < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Cuando se desea relacionar dos señales de aceleración, es valioso conocer la manera en que estas se vinculan a partir del espectro cruzado de potencia, el cual está dado por

$$S_{XY}(f) = \ddot{X}^*(f) \cdot \ddot{Y}(f) \quad (3.7)$$

función esta, que también posee la propiedad de simetría, por lo que se puede decir que

$$S_{XY}^*(f) = S_{XY}(-f) \quad (3.8)$$

y por lo tanto, de manera similar al caso en que se trabaja con una sola señal, se puede calcular el espectro cruzado de potencia como

$$G_{XY}(f) = \begin{cases} 2S_{XY}(f) & ; f > 0 \\ S_{XY}(f) & ; f = 0 \\ 0 & ; f < 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Es importante señalar que, las diversas funciones vistas anteriormente, son susceptibles al ruido instrumental que contienen las señales o al ocasionado por los cálculos numéricos, motivo por el cual se hace necesario recurrir a procedimientos de suavizado. Para el presente trabajo se hace uso de dos métodos para suavizar los diferentes espectros.

El primer método, que fue principalmente usado en el procesamiento de las señales completas, suaviza las ordenadas espectrales con promedios cuadráticos móviles, de forma que la amplitud suavizada se calcula como

$$\left(\ddot{X}_s(f)\right)^2 = \left(\frac{1}{N}\right) \sum_{f_1}^{f_2} \left(\ddot{X}(f)\right)^2 \quad (3.10)$$

Los límites de la sumatoria están determinados por

$$f_1 = f \cdot 2 \left(\frac{-1}{2FS}\right) \quad (3.11a)$$

$$f_2 = f \cdot 2 \left(\frac{1}{2FS}\right) \quad (3.11b)$$

donde

$N$  es el número de puntos comprendido entre las frecuencias  $f_1$  y  $f_2$   
 $FS$  es el factor suavizado.

Aun cuando éste método posee la característica de preservar la energía del espectro sin importar el factor de suavizado utilizado, en lo que se refiere a las ordenadas espectrales suavizadas, conforme aumenta el valor de  $f$ , el número de ordenadas a promediar ( $N$ ) se hace aun mayor, por lo que a mayores frecuencias mayor es el

efecto de suavizado en las ordenadas espectrales. Esto puede dificultar la identificación de las propiedades asociadas con frecuencias superiores, lo que en algunos casos no es deseable.

El segundo método utilizado para suavizar las ordenadas espectrales (Trifunac, 1972) consiste en el uso de un promedio móvil pesado, que solo involucra las ordenadas anterior y siguiente a la ordenada a suavizar, como se muestra en la expresión 3.12. Este método fue predominantemente usado en el procesamiento de tramos de señales (ventanas).

$$\ddot{X}_s(f) = \frac{\ddot{X}(f-1)}{4} + \frac{\ddot{X}(f)}{2} + \frac{\ddot{X}(f+1)}{4} \quad (3.12)$$

Conforme se tienen las señales expresadas en el dominio de la frecuencia, bien sea como espectros de amplitudes Fourier o como espectros de potencia, el siguiente paso es la determinación de las propiedades dinámicas del sistema. Para esto se requiere obtener la función de transferencia entre las señales, conocida también como función de cocientes espectrales, y acompañar la información que ésta brinda con el cálculo de la coherencia y los ángulos de fase entre ambas señales.

Las funciones de transferencia es posible obtenerlas de tres maneras. La primera de ellas corresponde al cociente entre los autoespectros de potencia de ambas señales o entre los espectros de Fourier de las dos señales.

$$FT = \left( \frac{G_{XX}(f)}{G_{YY}(f)} \right)^{1/2} = \frac{\ddot{X}(f)}{\ddot{Y}(f)} \quad (3.13)$$

La segunda y tercera forma de expresar la función de transferencia es a través de los cocientes del espectro cruzado de las dos señales consideradas y el autoespectro de una de ellas.

$$FT_{XY} = \frac{G_{XY}(f)}{G_{XX}(f)} \quad \text{y} \quad FT_{YX} = \frac{G_{YX}(f)}{G_{YY}(f)} \quad (3.14)$$

Es valioso señalar que estas funciones de transferencia resultan ser iguales tan solo en el caso en que ambas señales se encuentren relacionadas de manera lineal.

Para determinar la correlación que existe entre los componentes frecuenciales de ambas señales, se recurre a la determinación del vínculo que existe entre la función del espectro cruzado y el producto de los espectros de potencia de cada señal

$$|G_{XY}(f)|^2 \leq G_{XX}(f) \cdot G_{YY}(f) \quad (3.15)$$

Relación a partir de la cual se define la función de coherencia entre ambas señales como

$$C^2(f) = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f) \cdot G_{YY}(f)} \quad (3.16)$$

Puede demostrarse que, sin importar cual sea la real coherencia que exista ente  $x(t)$  y  $y(t)$ , la función de coherencia es siempre igual a la unidad. Sin embargo, se sabe que cuando esta expresión se evalúa en un análisis por ventanas, tal como se muestra más adelante en referencia al procesamiento de los registros de pruebas de vibración ambiental (ecs 3.20 a 3.24), entonces es tal que el valor de la coherencia varía entre cero y uno (ec 3.17).

Si el resultado es igual a uno significa que existe una relación completamente lineal entre las dos señales, mientras que en el caso en que equivalga a cero significa que esta relación es por completo nula.

$$0 \leq \hat{C}^2(f) \leq 1 \quad (3.17)$$

Ahora bien, para calcular la función de ángulos de fase entre las señales es necesario conocer el cociente entre la parte real y la parte imaginaria del espectro cruzado de potencia. De manera que si se expresa este espectro como

$$G_{XY}(f) = A_{XY}(f) + iB_{XY}(f) \quad (3.18)$$

la función de los ángulos de fase queda definida por

$$\theta_{XY}(f) = \tan^{-1} \frac{B_{XY}(f)}{A_{XY}(f)} \quad (3.19)$$

donde

$A_{XY}(f)$  es la componente real del espectro cruzado de potencia  
 $B_{XY}(f)$  es la componente imaginaria del espectro cruzado de potencia.

En este trabajo, las expresiones que hasta acá han sido presentadas, se utilizan en lo que se refiere al procesamiento de los registros sísmicos, excepto en el caso de la coherencia, para el cual se señaló que se procede de la misma forma que cuando se trabaja con señales capturadas en pruebas de vibración ambiental (VA), situación en la que es necesario realizar algunas modificaciones.

Cada registro de VA (o de los registros sísmicos para el cálculo de la coherencia) se divide en tramos iguales llamados ventanas, que para el caso de las señales con las que se cuenta fueron de 1024, 2048 ó 4096 puntos. La selección del tamaño de estas ventanas se hace de acuerdo con el número total de puntos que posee el registro, es decir, con el número de ventanas que resultan de la división de la señal en tramos (un número adecuado de ventanas puede ser alrededor de diez), y de acuerdo con el grado de resolución que se desee obtener en frecuencia, teniendo en cuenta que a menor número de puntos, menor es la precisión y por lo tanto se puede incurrir en errores numéricos en el análisis (Bendat y Piersol, 1989; Murià-Vila y González, 1995).

Las expresiones se modifican entonces de la siguiente manera:

$$\hat{S}_{XX}(f) = E[\ddot{X}_i^*(f) \cdot \ddot{X}_i(f)] \quad (3.20)$$

$$\hat{S}_{XY}(f) = E[\hat{X}_i^*(f) \cdot \ddot{Y}_i(f)] \quad (3.21)$$

y

$$\hat{G}_{XX}(f) = \begin{cases} 2\hat{S}_{XX}(f) & ; f > 0 \\ \hat{S}_{XX}(f) & ; f = 0 \\ 0 & ; f < 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

$$\hat{G}_{XY}(f) = \begin{cases} 2\hat{S}_{XY}(f) & ; f > 0 \\ \hat{S}_{XY}(f) & ; f = 0 \\ 0 & ; f < 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

donde E es valor esperado. Siendo así, la coherencia queda definida ahora como

$$\hat{C}^2(f) = \frac{E|G_{XY}(f)|^2}{\hat{G}_{XX}(f) \cdot \hat{G}_{YY}(f)} \quad (3.24)$$

En cuanto al cálculo de los ángulos de fase de las señales de VA, de manera similar al caso de los registros sísmicos, es necesario primero expresar el espectro cruzado de potencia como la suma de su parte real y su parte imaginaria

$$\hat{G}_{XY}(f) = E[A_{iXY}(f) + iB_{iXY}(f)] \quad (3.25)$$

de manera que la función de los ángulos de fase queda definida como

$$\hat{\theta}_{XY}(f) = E \left[ \tan^{-1} \frac{B_{iXY}(f)}{A_{iXY}(f)} \right] \quad (3.26)$$

Todo el anterior procedimiento para el análisis espectral de señales se ha implementado en diferentes programas de cómputo (Ordaz, 1993; Pérez y Murià-Vila, 1994; Murià-Vila *et al.*, 1999; Ordaz y Montoya, 2002) algunos de los cuales se basaron en las rutinas propuestas por Stearns y Hustt (1990). Con estas herramientas se procesó la información y se determinaron las diferentes funciones de acuerdo a las propiedades que se buscaban identificar.

Adicionalmente, se implementaron algunas nuevas rutinas para la captura de datos, visualización, determinación de espectros por ventanas y suavizado de promedios pesados (Taborda y Murià-Vila, 2002a; Taborda, 2003a), gracias a las cuales fue posible el fácil procesamiento de los diferentes registros sísmicos y las pruebas de vibración ambiental realizadas.

### 3.1.1.2 Procedimiento para la estimación de las propiedades del sistema

Mediante el análisis espectral realizado a las señales tal como se ha descrito, es posible identificar algunas propiedades dinámicas del sistema como lo son sus frecuencias fundamentales y las formas modales y amortiguamientos asociados a estas. Este proceso de identificación depende principalmente de la adecuada instrumentación en puntos estratégicos, o en su defecto, de la posibilidad de contar con señales generadas en las posiciones deseadas.

Interesa entonces conocer dichas propiedades para las direcciones T y L del edificio y para el componente de torsión. Para el caso de las propiedades de los movimientos de traslación se procede de la siguiente manera:

- Se determinan los espectros de las diferentes señales al centro de los pisos instrumentados (AZ, N12, N8, N4 y SO) y en la estación de campo libre (JN).
- Se calculan las funciones de transferencia, ángulos de fase y coherencia entre las señales de los pisos instrumentados con respecto a la señal de JN.

- En el cociente AC-CEN/JN se seleccionan las frecuencias asociadas con las ordenadas máximas, las cuales corresponden a las frecuencias de vibración del sistema en el respectivo componente. Los valores seleccionados se confrontan con aquellos que de igual manera pueden identificarse en los cocientes de las señales al centro de los pisos intermedios con respecto JN. Los valores o intervalos de valores de frecuencia coincidentes se fijan como los asociados con las frecuencias de resonancia del sistema. También es de utilidad verificar que a estas frecuencias corresponda un valor cercano a la unidad en la función de coherencia, aunque es preciso anotar que este no es un aspecto necesariamente determinante.
- Una vez que se han seleccionado las frecuencias, se determinan las formas modales asociadas a cada una de ellas. Para esto se utilizan las ordenadas asociadas como las amplitudes de la forma modal en cada uno de los niveles instrumentados, y por medio de la función de ángulos de fase, se determina la polaridad de cada una de las amplitudes con respecto al punto de referencia (JN). Se considera que cuando el ángulo de fase asociado a la frecuencia seleccionada se encuentra alrededor  $0^\circ$  las señales se encuentran “en fase”, y que cuando este valor es cercano a  $180^\circ$ , las señales están en “fase opuesta”. Generalmente los valores de amplitudes de las formas modales se normalizan con respecto a la amplitud en la azotea.
- Adicionalmente la fracción de amortiguamiento crítico asociada con el primer modo de vibrar del sistema suelo-estructura, se estima aproximadamente a partir de la amplitud asociada con la frecuencia fundamental mediante el método del factor de amplificación dinámica. Sin embargo, es sabido que al equiparar la respuesta de un sistema de un grado de libertad equivalente con la respuesta total de un sistema de múltiples grados de libertad mediante la aplicación de este procedimiento, se cometen errores derivados de descartar la influencia de los modos superiores. Para mejorar ésta estimación y tener una primera valoración de los amortiguamientos de modos superiores, se ha incluido el cálculo de las fracciones de amortiguamiento crítico por el método propuesto por Taborda y Ordaz (2003), sobre el cual se hace una breve explicación en el apéndice D.

Ahora bien, para el caso de la estimación de estas mismas propiedades en el componente de movimiento de torsión, el anterior procedimiento sufre algunas variaciones y se complementa con el cálculo de funciones de transferencia adicionales. Los pasos que se siguen son los que se describen a continuación.

- Se determinan los espectros de las señales en AZ-LAT, N12-LAT, N8-LAT, N4-LAT y SO-LAT en el componente T.
- Se calculan las funciones de transferencia, coherencia y ángulos de fase, de cada una de estas señales con relación a su respectiva señal en el centro de cada nivel, y con respecto a la señal en JN, todas estas en el componente T de movimiento.
- En la función de transferencia entre AZ-LAT y AZ-CEN se identifican las frecuencias asociadas con las máximas ordenadas, que a su vez son corroboradas con las que se pueden identificar de equivalentes funciones de transferencia en los niveles intermedios. Adicionalmente, estas mismas frecuencias deben ser identificables en la función de transferencia AZ-LAT/JN, en las que se observarán como crestas adicionales a las que se han identificado en el procedimiento para el caso de traslación en T.
- De forma complementaria puede determinarse la función de ángulos de fase entre AZ-LAT y AZ-PTO en el componente T, donde, para las frecuencias identificadas, se deben observar ángulos de fase alrededor de  $180^\circ$ , toda vez que cuando el movimiento del sistema está caracterizado por la torsión, las señales de puntos opuestos en la planta se encontraran fuera de fase.
- Luego, de forma similar al caso de traslación, se pueden determinar las formas modales y las fracciones de amortiguamiento crítico asociadas con el movimiento de torsión, si se utilizan las amplitudes en las funciones de transferencia nivel-LAT/JN.

Este mismo análisis puede realizarse para tramos de señales, de manera secuencial, de forma tal que pueda evaluarse la evolución de las propiedades del sistema. De igual manera a como se señaló cuando se hizo referencia al cálculo de la coherencia, el análisis por ventanas implica la selección de un adecuado número de puntos que no comprometan la resolución en frecuencia.

Para los análisis por ventanas que se realizaron con registros sísmicos, se seleccionaron tramos de 20 s con traslapes de 10 s, y se agregaron ceros al principio y al final, de forma tal que los procesos espectrales se realizaran para 4096 puntos, proporcionando así una adecuada resolución (Murià-Vila y González, 1995). Para no perder precisión en las amplitudes se recurrió al procedimiento de suavizado con promedios pesados.

### 3.1.1.3 Procedimiento para la estimación de los efectos de interacción suelo-estructura

Para ilustrar la importancia de los efectos ISE, es valioso conocer los cocientes espectrales entre los registros del sótano (SO-CEN) y los del terreno (JN), en los tres componentes ortogonales de movimiento T, L y V. Estas funciones de transferencia indican si el movimiento en la base de la estructura se amplifica o se abate con respecto al movimiento del terreno y por lo tanto, pueden revelar la presencia de los efectos ISE.

Aun así, es necesario comprender que el movimiento de sistemas que se caracterizan por presentar efectos ISE, no solo es el resultado del movimiento de la estructura y su deformación, sino que además está compuesto por los movimientos de traslación y cabeceo de la base, tal como se muestra en la fig 3.1. Es así como, asumiendo que la base es infinitamente rígida, el desplazamiento total al centro de un nivel cualquiera  $j$ , puede ser expresado como

$$x_T^j = x_s + x_0 + h_j \phi_{ry} + x_e^j \quad (3.27)$$

donde

- $x_T^j$  es el desplazamiento total al centro del nivel  $j$
- $x_0$  es el desplazamiento relativo de la base con respecto al terreno
- $x_s$  es el desplazamiento del terreno
- $h_j \phi_{ry}$  es el desplazamiento en el nivel  $j$ , debido al cabeceo de la base
- $x_e^j$  es el desplazamiento en el nivel  $j$ , debido a la deformación de la estructura.

Esta misma relación puede expresarse en el dominio de la frecuencia, así

$$X_T^j = X_s + X_0 + h_j \Phi_{ry} + X_j \quad (3.28)$$

De igual manera, en el caso de la torsión, el movimiento total de un nivel dado en este componente, es el resultado de la suma de las respuestas rotacionales de la base y la estructura, así

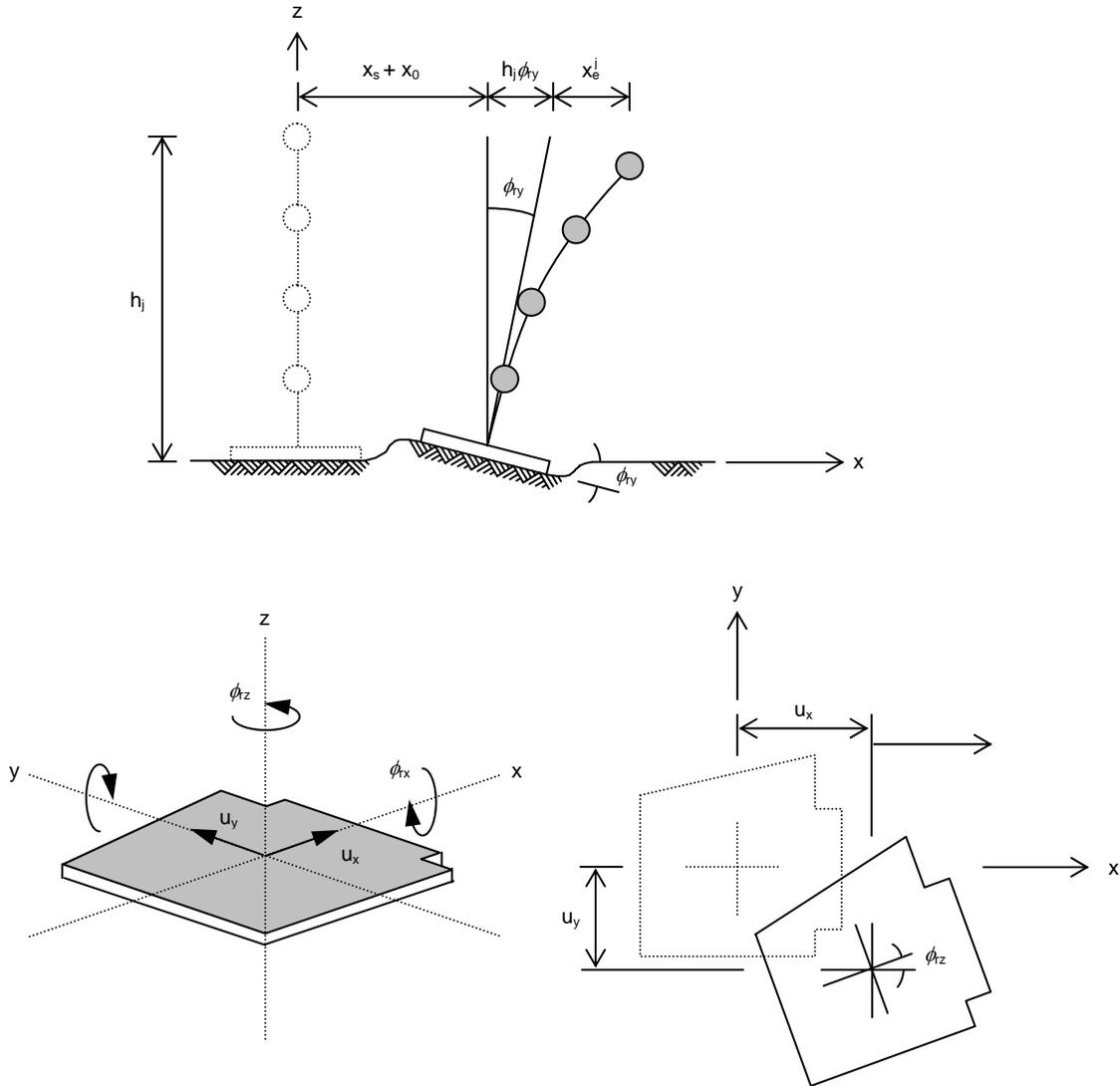
$$\Phi_T^j = \Phi_0 + \Phi_j \quad (3.29)$$

donde

- $\Phi_0$  es la respuesta rotacional de la base
- $\Phi_j$  es la respuesta rotacional de la estructura en el nivel  $j$ .

Interesa entonces poder identificar las frecuencias asociadas con los movimientos de traslación y cabeceo de la base, así como la frecuencia propia de la estructura, como si está estuviese realmente empotrada en la base. Además es importante conocer el aporte de cada uno de los componentes del movimiento en la respuesta total.

Para poder descomponer el movimiento, con el fin de identificar dichas frecuencias, se requiere conocer los registros de puntos estratégicos en el sistema. Es necesario entonces, contar con los registros al centro de la azotea y el sótano, además de los del terreno (AZ-CEN, SO-CEN y JN, respectivamente), para los dos componentes de traslación. En cuanto a la caracterización los movimientos de cabeceo, es necesario poder contar con señales en el componente vertical, en los costados opuestos a lo largo de ambas direcciones en la planta del sótano (SO-SUR, SO-NOR, SO-EST y SO-OES), de forma tal que sea posible calcular el giro alrededor de cada uno de los dos ejes de rotación ( $\phi_{ry}$  y  $\phi_{rx}$ ). Adicionalmente, para poder establecer una señal de referencia, es útil conocer la señal vertical al centro del sótano.



**Fig 3.1 - Modelo simplificado para la estimación de los efectos ISE**

A partir del conocimiento de estas señales, se han propuesto diferentes procedimientos que se basan en la combinación de los componentes del movimiento para lograr la estimación de las frecuencias del subsistema de interacción, es decir, de los movimientos de cabeceo y traslación de la cimentación, así como del movimiento de traslación por flexión de la estructura misma cuando esta se considera con base empotrada. Es

preciso aclarar que la descomposición del conjunto suelo-estructura en estos subsistemas obedece a suponer la existencia de tres estados idealizados del mismo. Para identificar la frecuencia de traslación de la cimentación se asume que la estructura es infinitamente rígida y su base sólo puede trasladarse. En el caso del cabeceo de la cimentación se supone nuevamente la estructura como un cuerpo rígido, pero en esta ocasión sobre una base que sólo puede balancearse. Mientras que, finalmente, en el movimiento por deformación de la estructura, ésta es flexible pero apoyada en una base rígida.

En lo que respecta a la última de éstas, se ha propuesto que puede determinarse de forma aproximada a partir de un análisis espectral de la descomposición de las historias de aceleración (Paolucci, 1993; Meli *et al.*, 1998). Este se realiza mediante la identificación de las frecuencias asociadas con las ordenadas máximas en el cociente espectral entre la aceleración absoluta en la azotea y la suma de las historias de aceleración de la traslación horizontal absoluta de la base y la traslación en la azotea debido al cabeceo

$$FT_e = \frac{\ddot{X}_T^{azotea}}{\ddot{X}_s + \ddot{X}_0 + H\Phi_{ry}} \quad (3.30)$$

donde  $H$  es la altura medida del sótano a la azotea.

Por otra parte, las frecuencias asociadas con el movimiento de cabeceo en la base, se pueden identificar mediante el análisis espectral de los registros de aceleración vertical en dos de los costados opuestos del sótano, entre sí y con respecto a la señal vertical al centro del mismo. En la función de transferencia de las señales en los costados con respecto al centro podrán observarse las ordenadas de amplificación y seleccionar las frecuencias que a éstas estén asociadas. Ha de esperarse que si estas frecuencias corresponden a movimientos de cabeceo, el movimiento en ambos costados sea de signo contrario, por lo que en las frecuencias identificadas deberá encontrarse que, al calcular la función de ángulos de fase entre ambas señales, estos tengan valores cercanos a  $180^\circ$ .

Desafortunadamente, los movimientos de cabeceo y traslación de la cimentación están íntimamente ligados, por un lado, con los movimientos del sistema, y por otro, con los movimientos rotacionales del suelo. De forma tal que en el procedimiento anterior las frecuencias fundamentales de estos componentes no permitan la clara identificación de las frecuencias propias del cabeceo de la cimentación. Sin embargo, para contar con una estimación del orden de dichas frecuencias, en el trabajo realizado por Zapata (2001), se propone un procedimiento similar al de la expresión 3.30, con el cual se pueden identificar las frecuencias asociadas al movimiento de cabeceo. Esta propuesta consiste en la identificación de las frecuencias asociadas con las mayores amplitudes en la función de transferencia dada por

$$FT_c = \frac{\ddot{X}_T^{azotea}}{\ddot{X}_s + \ddot{X}_0 + \ddot{X}_e} \quad (3.31)$$

donde la señal de excitación es la suma de los movimientos de traslación del suelo, la base y la estructura y la señal de respuesta es la traslación en la azotea.

Adicionalmente, en la literatura se han propuesto métodos que idealizan el sistema como la combinación de dos subsistemas, el de la estructura y el de interacción. En los modelos más complejos, el subsistema de la estructura se considera como un problema de  $n$  grados de libertad asociados a la traslación en la dirección de análisis, mientras que en los métodos más simplificados se idealiza como un sistema de un solo grado de libertad. Por su parte, el subsistema de interacción es comúnmente abordado como un problema de dos grados de libertad, el primero de ellos asociado con el movimiento de traslación en la base y el segundo con el movimiento de cabeceo de la misma.

De estos métodos se seleccionó el propuesto por Luco (1980) para complementar el análisis espectral descrito hasta el momento. Este procedimiento, que ha sido aplicado en diversos trabajos sobre estructuras

instrumentadas (Luco *et al.*, 1987; Mendoza *et al.*, 1991; Murià-Vila *et al.*, 2001), consiste en idealizar el problema de interacción como un subsistema de cinco grados de libertad, cuatro de ellos asociados con la traslación horizontal y el cabeceo de la base de la estructura, en los componentes T y L, y un quinto correspondiente al movimiento de torsión en la base, tal como se muestra en la fig 3.1.

Es así como el modelo puede desacoplarse y ser analizado como dos sistemas de tres grados de libertad para el problema en cada uno de los componentes T y L, y un tercero en el que se estudia el comportamiento en torsión.

Bajo estas condiciones y considerados los grados de libertad descritos, es posible determinar la frecuencia fundamental de traslación de la estructura con base empotrada, la de traslación de la base y la de cabeceo de la misma, así como las rigideces equivalentes asociadas a cada uno de estos movimientos.

De acuerdo con lo anterior, y asumiendo que la masa de la fundación, el momento de rotación de la estructura y la contribución de los modos superiores son despreciables (Luco, 1980), se establece que la frecuencia fundamental de traslación del sistema suelo-estructura está aproximadamente dada por

$$\frac{1}{\bar{f}_1^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_c^2} + \frac{1}{f_h^2} \quad (3.32)$$

donde

- $\bar{f}_1$  es la frecuencia fundamental del sistema determinada experimentalmente
- $f_1$  es la frecuencia de la superestructura suponiendo que esta se encuentra empotrada e la base
- $f_c$  es la frecuencia natural suponiendo que su base sólo puede girar alrededor del eje perpendicular a la dirección de análisis y que la superestructura es infinitamente rígida (frecuencia de cabeceo)
- $f_h$  es la frecuencia natural suponiendo que su base sólo puede trasladarse en la dirección de análisis y que la superestructura es infinitamente rígida (frecuencia de traslación)

Para la expresión 3.32, se establece que las frecuencias  $f_c$  y  $f_h$  pueden ser determinadas aproximadamente de acuerdo con las siguientes relaciones

$$f_c = \bar{f}_1 \sqrt{\gamma_1 \frac{H\Phi_{ry}}{X_T^{az}}} \quad (3.33)$$

$$f_h = \bar{f}_1 \sqrt{\beta_1 \frac{X_T^{so}}{X_T^{az}}} \quad (3.34)$$

donde

- $X_T^{az}$  es la respuesta total medida en la azotea para la frecuencia fundamental del sistema
- $X_T^{so}$  es la respuesta total medida en el sótano para la frecuencia fundamental del sistema
- $\Phi_{ry}$  es la respuesta rotacional en la base para la frecuencia fundamental del sistema.

Los valores de  $\gamma_1$  y  $\beta_1$  corresponden a parámetros modales, asociados con el primer modo fundamental de la estructura, cuando esta se considera como con base empotrada, y están dados por

$$\beta_1 = \frac{1}{M_1} \{\phi_1\}^T [M] \{1\} \quad (3.35)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{HM_1} \{\phi_1\}^T [M] \{h\} \quad (3.36)$$

donde

- $[M]$  es la matriz de masas de la estructura
- $M_1$  es la masa modal correspondiente al primer modo de vibrar de la estructura cuando esta se supone como con base empotrada
- $\{\phi_1\}$  es el vector que define la forma modal correspondiente al primer modo de vibrar de la estructura cuando esta se supone como con base empotrada, normalizada de forma tal que la amplitud en la azotea sea igual a uno
- $\{h\}$  es un vector que posee las alturas de cada nivel de la estructura con respecto a la base.

Si remplazamos las expresiones 3.34 y 3.35 en la ecuación 3.33 es posible despejar la frecuencia fundamental de la estructura y escribirla así

$$f_1 = \bar{f}_1 \sqrt{1 - \gamma_1 \frac{H\Phi_{ry}}{X_T^{az}} - \beta_1 \frac{X_T^{so}}{X_T^{az}}} \quad (3.37)$$

De acuerdo con lo anterior, el método propone que las rigideces equivalentes de traslación horizontal y cabeceo de la base ( $K_h$  y  $K_c$ , respectivamente), asociadas a los efectos ISE, pueden determinarse aproximadamente con las siguientes relaciones

$$K_h = \beta_1^2 M_1 (2\pi f_h)^2 \quad (3.38)$$

$$K_c = \gamma_1^2 M_1 H^2 (2\pi f_c)^2 \quad (3.39)$$

Es importante que se haga notar, que los valores  $\gamma_1$  y  $\beta_1$  implican que, además de la información experimental determinada a partir del proceso espectral, es necesario tener un modelo matemático preliminar de la estructura con base empotrada, de forma tal que puedan determinarse estos dos factores, así como la matriz de masas y la masa modal asociada con la frecuencia fundamental.

Hecho el anterior trabajo, es valioso estimar la contribución de los movimientos de traslación y cabeceo de la base con respecto a la respuesta total de traslación en la azotea, lo cual puede obtenerse por medio de los respectivos cocientes

$$\frac{X_T^{so}}{X_T^{az}} \quad \text{y} \quad \frac{H\Phi_{ry}}{X_T^{az}} \quad (3.40)$$

cuya suma representa la contribución de los efectos ISE en la respuesta de traslación del sistema. De manera que la contribución por traslación de la estructura en la azotea, estará dada por

$$\frac{X_e^{az}}{X_T^{az}} = 1 - \left( \frac{X_T^{so}}{X_T^{az}} + \frac{H\Phi_{ry}}{X_T^{az}} \right) \quad (3.41)$$

Ya que se han caracterizado los movimientos de traslación conviene estimar las frecuencias de torsión de la base y la estructura en el caso en que esta se considera como si fuese empotrada. Por un procedimiento similar al anterior, si se conoce la frecuencia fundamental de torsión del sistema, esta se puede expresar como

una combinación de las frecuencias de los movimientos que componen la respuesta total en torsión, de la siguiente forma

$$\frac{1}{\bar{f}_{1r}^2} = \frac{1}{f_{1r}^2} + \frac{1}{f_r^2} \quad (3.42)$$

donde

$\bar{f}_{1r}$  es la frecuencia fundamental de torsión del sistema determinada experimentalmente  
 $f_{1r}$  es la frecuencia fundamental de torsión de la estructura con base empotrada  
 $f_r$  es la frecuencia fundamental de torsión del sistema si la estructura fuera infinitamente rígida y su base solo pudiera girar en su plano.

El valor de la frecuencia de rotación de la base ( $f_r$ ) puede determinarse aproximadamente como

$$f_r = \bar{f}_{1r} \sqrt{\beta_1 \frac{\Phi_{rz}^{so}}{\Phi_{rz}^{az}}} \quad (3.43)$$

donde

$\Phi_{rz}^{az}$  es la respuesta rotacional medida en azotea  
 $\Phi_{rz}^{so}$  es la respuesta rotacional medida en la base

que se obtienen de las diferencias entre los registros AZ-LAT y SO-LAT con respecto a los de AZ-CEN y SO-CEN, divididas entre la distancia que separa a ambas señales en cada nivel, respectivamente. Mientras que en este caso,  $\beta_1$  es un parámetro modal dado por

$$\beta_1 = \frac{1}{I_1} \{\phi_{r1}\}^T [I] \{1\} \quad (3.44)$$

donde

$\phi_{r1}$  es el vector de la forma modal en torsión asociada con 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.

De tal forma que la frecuencia fundamental de rotación de la estructura cuando esta se considera con base empotrada puede conocerse a partir de las expresiones 3.42 y 3.43, y queda definida como

$$f_{1r} = \bar{f}_{1r} \sqrt{1 - \beta_1 \frac{\Phi_{rz}^{so}}{\Phi_{rz}^{az}}} \quad (3.45)$$

Conocidas estas frecuencias, la rigidez equivalente de torsión  $K_r$ , se calcula de acuerdo con

$$K_r = \beta_1^2 I_1 (2\pi \bar{f}_{1r})^2 \quad (3.46)$$

Así pues, queda caracterizado el subsistema que representa los efectos ISE en lo que corresponde a la componente del movimiento en torsión. Al igual que se señaló en los casos de traslación, es importante expresar el efecto como una fracción de la respuesta total de torsión en la azotea, esto es

$$\frac{\Phi_{rz}^{so}}{\Phi_{rz}^{az}} \quad (3.47)$$

lo que implica que el aporte de la estructura a dicho respuesta queda definida como

$$\frac{\Phi_{rz}^a}{\Phi_{rz}^{az}} = 1 - \frac{\Phi_{rz}^{so}}{\Phi_{rz}^{az}} \quad (3.48)$$

De esta forma quedan entonces definidas las propiedades que se asocian con los diferentes grados de libertad que caracterizan el modelo simplificado propuesto por Luco (1980). Es pertinente señalar que el procedimiento que se ha descrito, al igual que en casos anteriores, es aplicable a un análisis por tramos o ventanas, de forma que puedan evaluarse las variaciones de las diferentes propiedades.

### 3.1.2 Análisis en el dominio del tiempo

Los procedimientos que se utilizan para el análisis en el dominio del tiempo, parten prácticamente de los mismos preceptos que vimos para los procedimientos en frecuencia, lo que es, tener una clara concepción de cuáles son los elementos que caracterizan las señales de respuesta del sistema y la manera en que éstas se componen del acoplamiento de una serie de movimientos, que reflejan por si mismos, cada una de las propiedades del sistema, asumiendo que es válido verlos individualmente.

Dado que el edificio cuenta con una adecuada instrumentación y que se generaron las señales necesarias para complementar esta información, es posible determinar la contribución en la respuesta estructural, de los movimientos de cabeceo y traslación de la base, debido a los efectos ISE, así como los de flexión y torsión de la estructura. Para llevar a cabo la descomposición del movimiento, se supone que la losa del sótano es infinitamente rígida, y que los diafragmas de entrepiso son infinitamente rígidos en su plano.

De acuerdo con esto, es esencial poder representar una señal de respuesta en el sistema de manera similar a como se hizo en la expresión 3.27. Incorporando ahora el movimiento por torsión, la aceleración absoluta de un punto cualquiera  $i$  en un nivel dado  $j$ , está dada por

$$\ddot{x}_T^{j-i} = \ddot{x}_s + \ddot{x}_0 + \ddot{x}_c^j + \ddot{x}_e^j + \ddot{x}_t^j \quad (3.49)$$

donde

- $\ddot{x}_T^{j-i}$  es la aceleración absoluta total de un punto  $i$  en el nivel  $j$
- $\ddot{x}_s$  es la aceleración absoluta del terreno
- $\ddot{x}_0$  es la aceleración relativa de la base con respecto al terreno
- $\ddot{x}_c^j$  es la componente de aceleración en el nivel  $j$ , debida al cabeceo de la base
- $\ddot{x}_e^j$  es la componente de aceleración en el nivel  $j$ , debida a la deformación de la estructura
- $\ddot{x}_t^j$  es la componente de aceleración en el nivel  $j$ , debida a la torsión del sistema en dicho nivel.

La aceleración absoluta del terreno es la misma que se registra en JN, y de igual manera, cualquiera de los registros en traslación obtenidos en los niveles intermedios o en la azotea, pueden ser representados por la expresión 3.49 como la aceleración absoluta en un punto  $i$  en un nivel dado  $j$ .

Ahora bien, cabe hacer algunas anotaciones de lo qué representan o sobre cómo están compuestos los términos restantes. Por ejemplo, siendo los componentes L, T y V equivalentes a las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  en el espacio (fig 3.1), si se analiza la respuesta en el sótano en el componente T de movimiento, se puede decir que

$$\ddot{y}_T^{SO-CEN} = \ddot{y}_s + \ddot{y}_0 \quad (3.50)$$

es la aceleración absoluta registrada al centro del sótano y que

$$\ddot{y}_T^{SO-LAT} = \ddot{y}_s + \ddot{y}_0 + \ddot{y}_t^{SO-LAT} \quad (3.51)$$

es la aceleración absoluta registrada en el costado norte del sótano, en la cual

$$\ddot{y}_t^{SO-LAT} = \phi_{rz}^{SO} D_x \quad (3.52)$$

Siendo

$$\ddot{\phi}_{rz}^{SO} = \frac{\ddot{y}_T^{SO-LAT} - \ddot{y}_T^{SO-CEN}}{D_x} \quad (3.53)$$

donde

$D_x$  es la distancia en  $x$  entre los puntos SO-LAT y SO-CEN  
 $\ddot{\phi}_{rz}^{SO}$  es la aceleración angular absoluta en el sótano, debida a la torsión.

De manera similar, se puede expresar el registro obtenido en el punto AZ-LAT, para el componente T de movimiento, por la siguiente expresión.

$$\ddot{y}_T^{AZ-LAT} = \ddot{y}_s + \ddot{y}_0 + \ddot{y}_e^{AZ} + \ddot{y}_e^{AZ} + \ddot{y}_t^{AZ-LAT} \quad (3.54)$$

La cual as su vez, puede expresarse como

$$\ddot{y}_T^{AZ-LAT} = \ddot{y}_T^{AZ-CEN} + \ddot{y}_t^{AZ-LAT} \quad (3.55)$$

De tal forma que, al igual que en el caso anterior, puede decirse que el componente debido al movimiento por torsión equivale a

$$\ddot{y}_t^{AZ-LAT} = \ddot{y}_T^{AZ-LAT} - \ddot{y}_T^{AZ-CEN} \quad (3.56)$$

que puede expresarse como

$$\ddot{y}_t^{AZ-LAT} = \phi_{rz}^{AZ} D_x \quad (3.57)$$

donde

$$\ddot{\phi}_{rz}^{AZ} = \frac{\ddot{y}_T^{AZ-LAT} - \ddot{y}_T^{AZ-CEN}}{D_x} \quad (3.58)$$

Ésta, a su vez, puede interpretarse como la suma de la torsión de la base más la torsión relativa de la estructura, lo que es

$$\ddot{\phi}_{rz}^{AZ} = \ddot{\phi}_{rz}^{SO} + \ddot{\phi}_{rz-e}^{AZ} \quad (3.59)$$

donde  $\ddot{\phi}_{rz-e}^{AZ}$  es la torsión propia de la estructura en la azotea, es decir, relativa a la base. Siendo así, a partir de las expresiones 3.52, 3.58 y 3.59, éste término puede escribirse como

$$\ddot{\phi}_{z-e}^{AZ} = \frac{\left( \ddot{y}_T^{AZ-LAT} - \ddot{y}_T^{AZ-CEN} \right) - \left( \ddot{y}_T^{SO-LAT} - \ddot{y}_T^{SO-CEN} \right)}{D_x} \quad (3.60)$$

En lo que respecta al componente de aceleración de cabeceo en la azotea, éste corresponde a

$$\ddot{y}_c^{AZ} = \phi_{rx} H \quad (3.61)$$

siendo

$H$  la altura medida entre el la azotea y sótano  
 $\ddot{\phi}_{rx}$  la aceleración angular por cabeceo en la base.

La aceleración angular se calculada como

$$\ddot{\phi}_{rx} = \frac{\ddot{z}_T^{SO-EST} - \ddot{z}_T^{SO-OES}}{L_y} \quad (3.62)$$

donde

$\ddot{z}_T^{SO-EST}$  es la aceleración vertical en SO-EST  
 $\ddot{z}_T^{SO-OES}$  es la aceleración vertical en SO-OES  
 $L_y$  es la distancia entre los puntos SO-EST y SO-OES.

De acuerdo con lo anterior, las amplitudes de los movimientos relativos de traslación de la estructura por flexión en el centro de la azotea, se calculan restando de la aceleración absoluta medida en dicho punto, las contribuciones por cabeceo y traslación relativa de la base, así

$$\ddot{y}_e^{AZ} = \ddot{y}_T^{AZ-CEN} - \left( \ddot{y}_s + \ddot{y}_0 + \ddot{y}_c^{AZ} \right) \quad (3.63)$$

Para todo lo anterior, es importante tener en cuenta la polaridad de las señales, de forma que la orientación de los componentes de cabeceo y torsión concuerden adecuadamente con la señal que se está analizando. En el caso de estudio, dichas polaridades se establecieron de acuerdo con los registros de traslación en la azotea.

Es común utilizar la manipulación de los diferentes componentes para ilustrar el movimiento de la estructura por medio de gráficas en las que se visualizan aspectos como el cambio en el tiempo de los aportes de cada uno de los componentes en la respuesta total del sistema, la evolución de la configuración deformada de la estructura conforme transcurre el evento (animaciones), el trazo de orbitas de desplazamiento relativo de un punto en el plano, o el cambio en el tiempo de los desplazamientos relativos de entrepiso (Murià-Vila y Rodríguez, 2002).

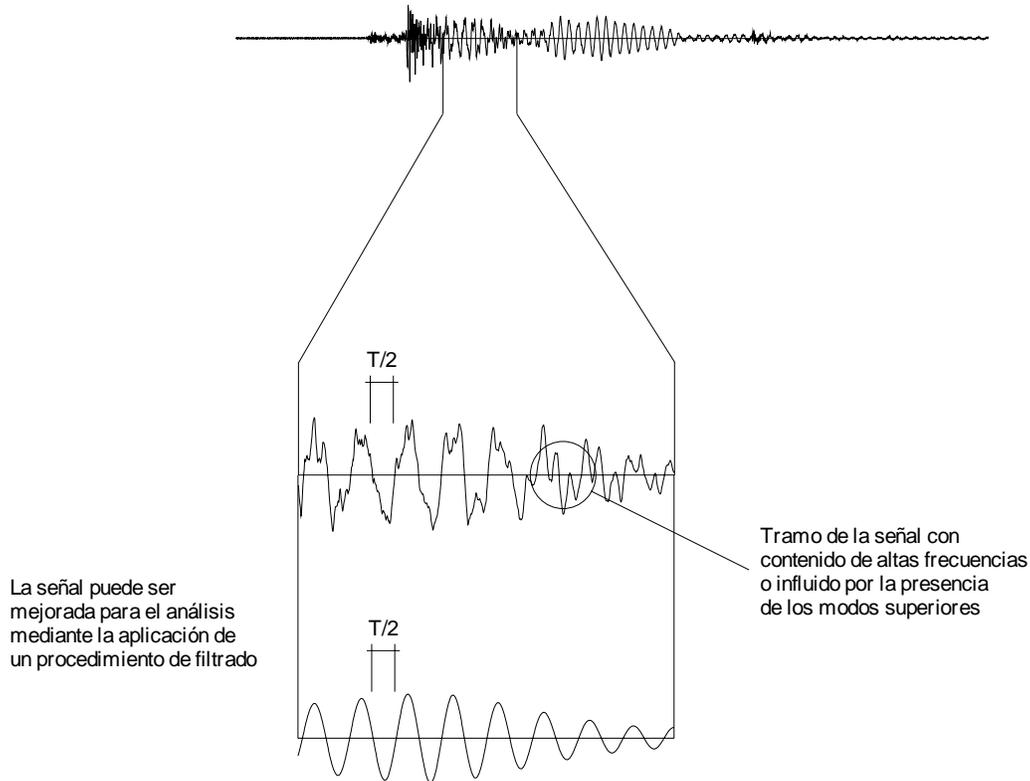
Para el presente trabajo se optó por utilizar el procedimiento de cruces por cero. Este método, partiendo de conceptos simples, permite llegar a una estimación del cambio de la frecuencia del sistema (Trifunac *et al.*, 2001b). Adicionalmente, se quiso evaluar el potencial de ésta técnica para de estimar las frecuencias asociadas a los movimientos de interacción suelo-estructura.

### 3.1.2.1 Método de cruces por cero

Este método consiste en determinar, a partir de la observación de la señal, el tiempo existente entre dos cruces consecutivos por el eje que determina la amplitud nula de movimiento y, a partir de la estimación de dicho

intervalo, obtener la frecuencia característica del sistema, cuya respuesta esta representada por la señal en estudio (Trifunac *et al.*, 2001b).

Sabiendo que el período de un sistema lineal ( $T$ ), sometido a una excitación de tipo sinusoidal, equivale al tiempo que la respuesta tarda en cumplir un ciclo completo, bien sea éste el determinado por dos crestas consecutivas o por dos cruces por cero con igual pendiente, entonces es válido decir que dicho período entre dos, es el tiempo medido entre dos cruces consecutivos con pendiente contraria (fig 3.2).



**Fig 3.2 - Método de cruces por cero**

A partir de ello, el método de cruces por cero parte de la base de suponer que, en el intervalo de tiempo determinado por la mitad de un ciclo de movimiento, el sistema en análisis tiene un comportamiento lineal y está definido por un solo componente frecuencial. Por lo tanto, la frecuencia misma del sistema en dicho instante se puede estimar a partir de la medición de tal intervalo de acuerdo con

$$f = \frac{1}{2(t_{i+1} - t_i)} \tag{3.64}$$

donde

- $t_i$  es el tiempo en que ocurre el cruce por cero  $i$
- $t_{i+1}$  es el tiempo en que ocurre el cruce por cero  $i+1$ .

y cuya diferencia, como se mencionó, equivale al periodo dividido entre dos.

$$\frac{T}{2} = (t_{i+1} - t_i) \quad (3.65)$$

A pesar de su simplicidad, este procedimiento está sujeto a la claridad de la señal, de forma que los amplios contenidos de frecuencia, bien sean debidos a la contribución en la señal de los modos superiores del sistema, o al ruido instrumental, pueden llevar a interpretaciones erróneas.

Una alternativa para evitar superar estos inconvenientes es seleccionar manualmente únicamente aquellos cruces por cero que separan crestas con amplitudes similares. Sin embargo, para efectos prácticos, éste es un procedimiento sumamente laborioso y por lo tanto resulta más práctico someter la señal a un proceso de filtrado.

Para el presente estudio a los registros se les aplicaron filtros Butterworth en el dominio de la frecuencia (paso-banda y paso-altas). Estos filtros operan sobre las amplitudes del espectro de Fourier de la señal, de forma que no alteran las fases, y por tanto, las señales conservan su orientación original en el dominio del tiempo (Oppenheim y Schafer, 1975).

La señal filtrada está dada por la transformada inversa de su equivalente en el dominio de la frecuencia, la cual es el producto de la transformada de la señal original operada por una función de filtrado. El procedimiento es el siguiente, sea

$$\ddot{X}_f(f) = H(f) \cdot \ddot{X}(f) \quad (3.66)$$

donde

$\ddot{X}(f)$  es la transformada de Fourier de la señal original  
 $\ddot{X}_f(f)$  es la transformada de Fourier de la señal filtrada  
 $H(f)$  es el filtro, el cual puede tomar diferentes valores según sea el tipo que se quiere aplicar.

Para un filtro tipo paso-altas  $H(f)$  esta dada por

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{\min}}{f}\right)^{2N}}} \quad (3.67)$$

Mientras que en un filtro para baso-banda, toma la siguiente forma

$$H(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f^2 - f_{\min}f_{\max}}{f(f_{\max} - f_{\min})}\right)^{2N}}} \quad (3.68)$$

donde

$f_{\min}$  es la frecuencia mínima a partir de la cual se permite el paso del contenido de amplitudes  
 $f_{\max}$  es la frecuencia máxima hasta la cual se permite el paso del contenido de amplitudes  
 $N$  es el número de polos que caracterizan el filtro.

Es importante señalar que conforme el valor de  $N$  se hace mayor, el filtro se hace aún más pronunciado, pero esto a la vez puede introducir ruido en la señal filtrada. Un valor recomendado de  $N$  es cuatro, que es el que aquí se ha usado.

De manera que, conforme a lo anterior, la señal filtrada en el dominio del tiempo, esta dada por la transformada inversa de Fourier, de su homóloga en el dominio de la frecuencia, así

$$\ddot{x}_F(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^T \ddot{X}_F(f) e^{i2\pi f t} df \quad (3.69)$$

El procedimiento de filtrado se tiene implementado en el programa Degtra A4 (Ordaz y Montoya, 2002), y la estimación de la frecuencia a través del procedimiento de cruces por cero fue implementada para el presente trabajo (Taborda, 2003b), de forma tal que pudiera llevarse a cabo la estimación de las diferentes propiedades del sistema y evaluar su capacidad en la estimación de los efectos ISE.

### 3.1.2.2 Procedimiento para la estimación de las propiedades del sistema

Para el cálculo de la frecuencia fundamental del sistema haciendo uso del método de cruces por cero se procedió de la siguiente manera:

- Se selecciona la señal de respuesta del sistema en el componente que se desea analizar. Tales pueden ser la aceleración total en azotea, en los componentes T o L, o el giro debido a la torsión.
- Se somete la señal al procedimiento de cruces por cero y, de acuerdo con el grado de dispersión de los resultados observados, se toma la decisión de conservar éstos o de aplicar un filtro que pueda optimizarlos. Los valores límite de  $f_{\min}$  o  $f_{\max}$ , se pueden fijar de acuerdo a los resultados preliminares del análisis no paramétrico en el dominio de la frecuencia o, en su ausencia, estableciendo una banda que cubra el valor esperado y aisle la influencia de frecuencias no deseadas.
- La señal filtrada es nuevamente sometida al procedimiento de cruces por cero para evaluar los resultados y tomar una determinación al respecto. Si la dispersión en los valores persiste, tal vez sea necesario fijar nuevos límites de filtrado.

Es preciso anotar que el proceso de filtrado requiere de una aplicación cuidadosa, toda vez que la utilización de límites cercanos (banda estrecha), únicamente redundará en una falsa interpretación de las señales. Ya que lo que se estaría logrando es la obtención de resultados, a partir de una señal forzada a proporcionar una información que en realidad no influye en su composición, y simplemente es fruto de un desarrollo matemático impuesto.

### 3.1.2.3 Procedimiento para la estimación de los efectos de interacción suelo-estructura

En lo que respecta a la estimación de los efectos ISE, interesa poder determinar, primero que todo, la utilidad del método y el grado de correspondencia con los demás procedimientos tratados en este capítulo. De manera que se aplicó el método de cruces por cero a diferentes combinaciones de señales de forma que pudieran identificarse las frecuencias de la estructura, así como las de traslación y cabeceo de la base.

En general, se procedió de acuerdo a los pasos que se describieron en el numeral anterior, lo único que varió fue la señal de análisis. Para el cálculo de la frecuencia fundamental del componente de movimiento debido a la traslación por flexión de la estructura, se utilizó la señal calculada a partir de la expresión 3.63 en cada uno de los dos componentes T y L. Mientras que para el caso de la torsión propia de la estructura se utilizó la señal derivada de la ecuación 3.60.

Por su parte, para la estimación de la frecuencia fundamental del componente de movimiento debido al cabeceo de la base y el debido a la traslación de la misma, se recurrió para cada uno de los componentes de movimiento a las expresiones 3.61 y 3.50, respectivamente.

### 3.2 ESTIMACIÓN PARAMÉTRICA

Se entiende como estimación paramétrica aquella en la cual, la identificación de las propiedades de un sistema, se hace a partir de un modelo idealizado, por medio del cual se busca reproducir la información que se ha obtenido experimentalmente. Para el presente trabajo se ha seleccionado una metodología que ajusta la respuesta de un modelo dado a la que se ha registrado en el edificio, seleccionando señales de entrada y salida, según los componentes de movimiento que se buscan caracterizar.

Este procedimiento consiste básicamente en el método de superposición modal propuesto por Beck y Jennings (1980), el cual ha sido implementado por Li y Mau (1990) en el programa MIMO (Multiple Input - Multiple Output), cuya eficiencia ha sido satisfactoriamente probada en la identificación de las propiedades de estructuras instrumentadas (Li y Mau, 1991; Durrani *et al.*, 1994; Li y Mau, 1997).

En México son también varios los estudios sobre identificación de sistemas, en los cuales se ha hecho uso del programa MIMO (Pérez, 1995; Murià-Vila *et al.*, 2001; Palacios, 2003), a partir de los cuales se han tomado diferentes propuestas sobre los modelos más adecuados para la reproducción y estimación de los parámetros dinámicos que interesa identificar en este trabajo.

#### 3.2.1 Estimación paramétrica modal

El método de superposición propuesto por Beck y Jennings (1980) en el cual se basa el programa MIMO (Li y Mau, 1990), parte de la descomposición modal de un sistema de múltiples grados de libertad, cuyo movimiento está caracterizado por  $n$  ecuaciones diferenciales y que es transformado en un conjunto de igual número de expresiones desacopladas de segundo orden, las cuales corresponden a los modelos clásicos de vibrar.

De acuerdo con lo anterior, el método propone que la respuesta de un sistema, puede ser adecuadamente representada por la superposición de solo una parte del número total de modos que componen su movimiento. Dicha parte está compuesta por  $nm$  modos dominantes de movimiento.

Siendo así, los parámetros del sistema se determinan al lograr un ajuste satisfactorio entre las respuestas calculadas con un modelo y las obtenidas experimentalmente. Tal ajuste se realiza minimizando el error cuadrático medio, en intervalos de tiempo en que se asume que el sistema se comporta linealmente. De esta manera, para cada ventana se obtienen los parámetros óptimos que hacen que el modelo reproduzca la señal real, obteniendo así los valores de frecuencias, fracciones de amortiguamiento crítico, factores de participación modal y, según sea el modelo propuesto, las configuraciones modales tales que caracterizan el sistema.

En lo que sigue se describen las expresiones bajo las cuales opera el procedimiento implementado en el programa MIMO.

Sea un sistema cualquiera con  $n$  grados de libertad, sometido a una excitación de aceleración en su base (señal de entrada), la ecuación desacoplada de movimiento para un grado de libertad cualquiera ( $r$ ) está dada por

$$\ddot{x}^{(r)} + a_2^{(r)} \dot{x}^{(r)} + a_1^{(r)} x^{(r)} = -a_3^{(r)} \ddot{x}_s(t) \quad (3.70)$$

siendo

$$a_1^{(r)} = \omega_r^2 \quad (3.71)$$

$$a_2^{(r)} = 2\xi_r \omega_r \quad (3.72)$$

$$a_3^{(r)} = P_r \quad (3.73)$$

donde

- $\omega_r$  es la frecuencia modal para el modo  $r$  en la ventana de medición
- $\xi_r$  es la fracción de amortiguamiento crítico para el modo  $r$  en la ventana de medición
- $P_r$  es el factor de participación modal efectiva para el modo  $r$  en la ventana de medición
- $\ddot{x}_s(t)$  es el registro de aceleración en la base, en la componente especificada
- $x$  es el desplazamiento modal relativo a la base, en la componente de análisis.

De forma que los valores de desplazamiento y velocidad inicial para cada modo están dados por

$$x_{(t_i)}^{(r)} = a_4^{(r)} \quad (3.73)$$

$$\dot{x}_{(t_i)}^{(r)} = a_5^{(r)} \quad (3.74)$$

respectivamente, donde

- $a_4^{(r)}$  es la contribución del modo  $r$  al desplazamiento inicial,
- $a_5^{(r)}$  es la contribución del modo  $r$  al velocidad inicial,
- $t_i$  es el tiempo inicial de la ventana de análisis.

De acuerdo a lo anterior, la respuesta modal expresada como el desplazamiento relativo a la base, corresponde a una función en el tiempo la cual está determinada por cinco parámetros en cada una de las ventanas de análisis, como

$$x(t; a^{(1)}, \dots, a^{(nm)}) = \sum_{r=1}^{nm} x^{(r)}(t, a^{(r)}) \quad (3.75)$$

en la que los parámetros a ser estimados son

$$a^{(r)} = \{a_1^{(r)}, a_2^{(r)}, a_3^{(r)}, a_4^{(r)}, a_5^{(r)}\}, r = 1, 2, \dots, nm \quad (3.76)$$

los cuales son propuestos como valores iniciales, y se optimizan mediante la minimización de la función que evalúa el error cuadrático de la diferencia existente entre la respuesta del modelo matemático y la respuesta real del sistema, la cual está dada por

$$J(a^{(1)}, \dots, a^{(nm)}) = k_1 v_1 \int_{t_i}^{t_f} (x_0 - x)^2 dt + k_2 v_2 \int_{t_i}^{t_f} (v_0 - \dot{x})^2 dt + k_3 v_3 \int_{t_i}^{t_f} (a_0 - \ddot{x})^2 dt \quad (3.77)$$

donde

- $x_0$  es el registro de desplazamiento relativo
- $v_0$  es el registro de velocidad relativa
- $a_0$  es el registro de aceleración relativa
- $k_i$  son parámetros que son seleccionados según sea la componente de respuesta estructural que está siendo analizada (desplazamiento, velocidad o aceleración), pueden tomar valores de 0 ó 1
- $v_i$  son parámetros que normalizan cada una de las integrales
- $t_i$  y  $t_f$  son el tiempo inicial y final que delimitan la ventana de análisis, respectivamente.

Tal minimización se lleva a cabo de acuerdo con los siguientes procesos:

- **Barrido modal:** Consiste en agregar uno a uno, los modos que contribuyen en la respuesta total del modelo. Primero,  $J$  se minimiza para el primer modo, una vez que haya convergido la respuesta, los parámetros correspondientes son fijados y se proponen nuevos valores para los que definen el aporte del segundo modo. Se procede a la minimización de  $J$  nuevamente y una vez lograda, se fijan los valores de los parámetros del segundo modo y se proponen nuevos para el tercer modo. Se procede así sucesivamente hasta que el valor de  $J$  sea inferior a un límite predeterminado o hasta que se haya completado un número de modos adecuado.
- **Minimización de modos:** Para cada modo  $r$  se minimiza el valor de  $J$  con respecto a los parámetros  $a^{(r)}$ , optimizando en primer lugar los valores correspondientes a la frecuencia y el amortiguamiento ( $a_1$  y  $a_2$ ) ya que, de acuerdo a la condición lineal del modelo, los parámetros restantes ( $a_3$ ,  $a_4$  y  $a_5$ ) pueden ser expresados en función de los dos primeros (Beck, 1978).
- **Minimización unidimensional:** Se fundamenta en que cada uno de los dos primeros parámetros son optimizados mientras se mantiene al otro fijo. Es decir, primero se minimiza el valor de  $a_1$  manteniendo  $a_2$  fijo, y luego se minimiza el valor de  $a_2$ , manteniendo  $a_1$  como un valor fijo. Es importante señalar que, el concepto bajo el cual se dice que se minimiza alguno de los parámetros, corresponde a encontrar el valor mínimo de la parábola que encierra dicho valor.
- **Evaluación numérica de  $J$ :** Una vez que se ha hecho el barrido para los  $nm$  modos que están siendo tenidos en cuenta, se tienen entonces una nueva estimación de los parámetros  $a^{(r)}$ . Se evalúa entonces el valor de la función  $J$  de forma que se busque la convergencia de mínimo valor local más cercano a los parámetros iniciales propuestos. En este punto radica la importancia de la adecuada selección de los valores iniciales para  $a^{(r)}$ .

Por otra parte, el programa MIMO admite el análisis de sistemas con múltiples entradas y salidas. En tal caso las excitaciones a las que está sometido el sistema se denotan como  $a_{gk}(k=1,2,\dots,m)$ , mientras que las respuestas reales del mismo como  $a_{0i}(i=1,2,\dots,n)$ , donde  $m$  representa el número total de entradas y  $n$  el número de salidas.

Considerando que  $a_{0i}$  representa las respuestas de aceleraciones relativas del sistema con respecto a las excitaciones  $a_{gk}$ , entonces la respuesta de aceleración relativa calculada ( $a_i$ ), puede determinarse como

$$a_i = \sum_j^n \phi_{ij} \ddot{u}_j \quad (3.78)$$

donde

$\ddot{u}_j$  es la respuesta de aceleración relativa del modo  $j$   
 $\phi_{ij}$  es la componente de la forma modal del modo  $j$  en la respuesta  $i$ .

De tal manera que las respuestas modales están determinadas por una ecuación diferencial de segundo orden, equivalente a la expresada anteriormente, y que corresponde a la caracterización de equilibrio dinámico de un sistema con amortiguamiento clásico, dada por

$$\ddot{u}_j + 2\zeta_j \omega_j \dot{u}_j + \omega_j^2 u_j = \sum_k^m p_{ik} a_{gk} \quad (3.79)$$

donde

- $\xi_j$  es la fracción de amortiguamiento crítico del modo  $j$ ,  
 $\omega_j$  es la frecuencia del modo  $j$  expresada en rad/s,  
 $p_{jk}$  es el factor de participación del modo  $j$  con respecto a la excitación  $k$ ,  
 $a_{gk}$  es la aceleración de excitación  $k$ .

Siendo así, la solución de esta expresión puede determinarse analíticamente por medio de la integral de Duhamel, suponiendo que, para cada intervalo de tiempo, la función de excitación  $a_{gk}(t)$  corresponde a una recta, de tal forma que la respuesta de aceleración relativa del modo  $j$ , esta dada por

$$\begin{aligned} \ddot{u}_j = e^{-\xi_j \omega_j t} & \left( (-2\xi_j \omega_j \dot{u}_j(0) - \omega_j^2 u_j(0)) \cos(\omega_{dj} t) + \frac{1}{\omega_{dj}} (-\omega_j^2 (1 - 2\xi_j^2) \dot{u}_j(0) + \xi_j \omega_j^3 u_j(0)) \operatorname{sen}(\omega_{dj} t) \right) \\ & + \sum_k p_{jk} \left( a_{gk}(t) + \frac{1}{\omega_{dj}} \int_0^t a_{gk}(\tau) e^{-\xi_j \omega_j (t-\tau)} \left( -2\xi_j \omega_j \omega_{dj} (t-\tau) - \omega_j^2 (1 - 2\xi_j^2) \right) \operatorname{sen}(\omega_{dj} (t-\tau)) dt \right) \end{aligned} \quad (3.80)$$

donde

- $\omega_{dj}$  es la frecuencia amortiguada del modo  $j$   
 $\dot{u}_j(0)$  es la velocidad modal inicial  
 $u_j(0)$  es el desplazamiento modal inicial.

Entonces, para el caso de múltiples entradas y salidas, lo que el programa MIMO hace es identificar los parámetros modales, además de los valores de desplazamiento y velocidad inicial, mediante un proceso equivalente al que se explicó antes, en el que se minimiza el error cuadrático entre las respuestas conocidas y las calculadas, expresado por la función  $J$  como

$$J = \sum_i \sum_s (a_{0i}(s\Delta t) - a_i(s\Delta t))^2 \quad (3.81)$$

la cual representa el error absoluto y donde  $\Delta t$  un el intervalo de tiempo constante a lo largo del cual se realiza la sumatoria, siendo  $s$  el número de intervalos considerados en la ventana de análisis.

Una vez que el proceso de iteración para la estimación de los parámetros ha convergido, se calculan dos medidas adicionales del error en el ajuste de las respuestas (Li y Mau, 1990), el error relativo total correspondiente a  $J$  definido como

$$E = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_s (a_{0i}(s\Delta t) - a_i(s\Delta t))^2}{\sum_i \sum_s (a_{0i}(s\Delta t))^2}} \quad (3.82)$$

y el error relativo para cada una de las señales de respuesta, dado por

$$E_i = \sqrt{\frac{\sum_s (a_{0i}(s\Delta t) - a_i(s\Delta t))^2}{\sum_s (a_{0i}(s\Delta t))^2}} \quad (3.83)$$

Adicionalmente, la contribución de cada uno de los modos  $j$  en cada una de las respuesta  $i$ , es estimada en términos del índice determinado por

$$R_{ij} = \frac{\sum_s (\phi_{ij} \ddot{u}_j (s\Delta t))^2}{\sum_s a_{0i}^2 (s\Delta t)} \quad (3.84)$$

Es así como, de acuerdo con el proceso mostrado, para llevar a cabo la estimación de las propiedades de un sistema dado haciendo uso del programa MIMO, en forma general, se actúa conforme el siguiente procedimiento:

- Primero se define el modelo a ser usado considerando que éste reproduzca adecuadamente el sistema sobre el cual se desean conocer los parámetros dinámicos. Esto es, seleccionar las señales de entrada y de salida, según sean los componentes de movimiento que representan y teniendo en cuenta que las respuestas deben ser relativas a las excitaciones.
- Luego se determina el tamaño de la ventana de análisis, guardando atención sobre dos aspectos: que la ventana sea lo suficientemente reducida para hacer válido el planteamiento bajo el cual se considera que en dicho lapso de tiempo el sistema se comporta linealmente, y que a la vez sea lo suficientemente grande como para captar adecuadamente las variaciones en frecuencia. Se recomienda que el tamaño de la ventana sea por lo menos tres veces el período de la estructura (Pérez, 1995).
- Paso seguido se prepara el archivo de datos para el programa MIMO. En él se incluyen el número de modos a analizar, el intervalo de tiempo de los registros, el número de respuestas que se incluyen en el modelos, así como el número de excitaciones a las que es sometido, el número de puntos que posee la ventana y el punto inicial de la misma. Adicionalmente, se proporciona el número de parámetros que se consideran como valores fijos (para el caso de modos superiores). Finalmente se incluyen los valores iniciales.
- Por último, se procede a identificar modo por modo, las propiedades dinámicas del modelo, ajustando las señales de respuesta calculadas con las registradas. Se identifica un modo a la vez, y conforme el primero converge, se fijan sus parámetros y se itera sobre los correspondientes al siguiente. Se continúa de igual forma con los modos superiores, hasta alcanzar un número de modos adecuados, tales que los valores de error total y de cada señal, sean satisfactorios.

De esta manera, para cada ventana, se obtienen los valores de las frecuencias, fracciones de amortiguamiento crítico, factores de participación y formas modales, y adicionalmente, las señales calculadas.

Los valores iniciales a partir de los cuales se parte para el proceso de identificación, en la primera ventana de análisis, pueden determinarse a partir de procedimientos previos como los que se describieron en el análisis no paramétrico, y los de las ventanas siguientes con base en las anteriores.

Respecto al nivel de ajuste de las señales calculadas frente a las registradas, este puede definirse de acuerdo con varios criterios. Una opción es hacerlo de acuerdo con los índices de error total e individual de cada una de las respuestas. Se ha observado que errores superiores al 80 % no reproducen adecuadamente las señales medidas. Durrani *et al.* (1994) recomienda llegar a errores menores al 20 %. Sin embargo la experiencia de estudios como los elaborados por Zapata (2001) y Palacios (2003) indica que es posible lograr ajustes apropiados con errores inferiores al 40 %.

Otro criterio adecuado es verificar que la suma de los porcentajes de participación de cada modo en la respuesta, se aproxime al cien por ciento. Adicionalmente, es recomendable verificar que los parámetros identificados sean coherentes entre sí, como por ejemplo, que la distribución en altura de las formas modales si corresponda a la frecuencia y el modo identificado, o que los valores de amortiguamiento sean acordes con el tipo de sistema en estudio.

Ya que se ha descrito ampliamente el procedimiento y las premisas bajo las cuales actúa, conviene pasar a describir los modelos usados para la identificación de las propiedades del sistema y los efectos ISE. Para ello se utilizaron modelos basados en los propuestos por trabajos similares sobre edificios instrumentados en la ciudad de México (Zapata, 2001; Palacios, 2003), y se plantean nuevos arreglos que complementan y mejoran los anteriores.

Se consideraron modelos de uno o varios grados de libertad, en uno, dos y tres componentes de movimiento. Adicionalmente se incursiona en uso señales de respuesta filtradas, usando los mismos procedimientos descritos en el análisis de cruces por cero, como una alternativa para la mejor comprensión de algunas de las características que se desean identificar. La nomenclatura utilizada para nombrar los modelos fue la siguiente:

- Los primeros caracteres corresponden al número de componentes de movimiento considerados en el análisis, los cuales pueden ser: 1D, 2D o 3D, que indican si el análisis fue en uno, dos o tres componentes. A los modelos del tipo 1D se les adiciona un subíndice indicando el componente de análisis (T o L). En general, éstos corresponden a un sistema plano. Los del tipo 2D corresponden a procesos en los que se consideran movimientos en ambos componentes, mientras que los modelo 3D son aquellos en los que adicionalmente se considera el componente correspondiente a la torsión.
- En los caracteres siguientes, se identifica el tipo de movimiento que se pretende representar con el modelo, de acuerdo con las siglas que se describen en la tabla 3.1.
- En algunos casos, al final se utiliza el subíndice F seguido por dos valores entre paréntesis, por medio de lo cual se indica que las señales de respuesta utilizadas en el proceso de identificación han sido filtradas, y los valores encerrados en el paréntesis indican las frecuencias mínima y máxima utilizadas en el filtrado.

**Tabla 3.1 - Nomenclatura de los movimientos que puede representar un modelo**

Sigla	Descripción
SIST	En un modelo de este tipo, se buscan identificar las propiedades del sistema completo, es decir, el conjunto que conforman suelo y estructura.
EST	Este tipo de modelos representan el movimiento de la estructura, en el caso hipotético en el que esta se considera como si se encontrara empotrada en la base.
CAB	Los modelos que reciben esta sigla, son aquellos en los que interesa caracterizar las propiedades del componente de movimiento debido al cabeceo en la base.

Por último, antes de proceder a la descripción de cada modelo en específico, es preciso anotar que para el cálculo de las excitaciones y respuestas consideradas en algunos ellos, se recurrió a la descomposición y posterior manipulación de las señales, de la misma manera en que se describió en el caso del análisis en el tiempo (expresiones 3.49 a 3.63).

### 3.2.2 Modelo para la estimación de las propiedades del sistema

En estudios similares sobre edificios instrumentados en la ciudad de México (Toro, 1997; Zapata, 2001), las propiedades del sistema se identificaron haciendo uso de modelos en los que se tomaban como excitaciones los registros del terreno o el sótano, y como respuesta, únicamente los registros relativos de la azotea. Se encontró que el hecho de no considerar las respuestas de los niveles intermedios en los que se contaba con

instrumentación, no afectaba la estimación adecuada de las frecuencias asociadas con los modos superiores, y que el simple uso de las respuestas en azotea permitía llegar a resultados bastante coherentes.

De manera complementaria, el trabajo de Zapata (2001) permitió observar que, cuando los efectos ISE intervienen de manera relevante en el comportamiento dinámico del sistema, los modelos trabajados con excitaciones de los registros en sótano, no estimaban adecuadamente las propiedades, como si era posible hacerlo con los modelos de excitación en el terreno, a pesar de que ellos implicaban un mayor tiempo de procesamiento.

En ambos casos se propuso abordar el problema tridimensional haciendo uso de dos modelos. En el primero se consideraba un solo componente de movimiento en traslación, mientras que en el segundo se incluían el componente restante y el efecto de torsión. Esto implicaba que sólo era posible identificar las características de acoplamiento entre la torsión y uno de los componentes de traslación. La posibilidad de utilizar un único modelo en el que se incluyeran directamente las tres componentes de movimiento, hacía difícil el procesamiento debido a las limitaciones de cómputo.

En un trabajo posterior (Palacios, 2003), en el que se estudiaron las propiedades dinámicas de otro edificio en la ciudad de México, y para el cual dichas limitaciones fueron superadas, se incluyeron entonces los tres componentes de movimiento (T, L y torsión) en un solo modelo. Gracias a ello fue posible observar que, analizar el problema haciendo uso de dos modelos separados, no estimaba óptimamente los efectos de acoplamiento.

Siendo así, para el presente trabajo, considerando que se ha observado que el edificio presenta efectos de interacción, y ante la necesidad de conocer los posibles acoplamientos entre las diferentes componentes de movimiento, se optó por estudiar el problema idealizándolo como se muestra en la fig 3.3. A este modelo, conforme al arreglo de nomenclatura descrito, se le asignó el nombre 3D-SIST.

Las señales de excitación (E) y de respuesta (R) utilizadas en el modelo, y la forma en que se determinaron, se describe en la tabla 3.2.

### 3.2.3 Modelos para la estimación de los efectos de interacción suelo-estructura

Aunque en un principio, el programa MIMO no fue diseñado pensando en las posibilidades que este proporcionaría para el estudio de los efectos ISE, ya son varios los trabajos en los que ha sido usado para tal fin. En lo referente a la identificación de las frecuencias de cabeceo en la base se pueden citar los trabajos de Durrani *et al.* (1994) o Li y Mau (1997). A partir de estos, no sólo en lo que corresponde al cabeceo, sino también en lo que respecta a la estimación de la frecuencia fundamental de la estructura, se puede hablar sobre el estudio realizado por Zapata (2002).

Los modelos que aquí se presentan para la caracterización de estos efectos, corresponden en buena parte a los propuestos por el último de los trabajos citados. En ambos casos, traslación de la estructura y cabeceo de la base, se proponen nuevas variantes, que no habían sido consideradas anteriormente, con el fin de complementar y mejorar la comprensión del problema. Tal es el caso de la estimación de las frecuencias de la estructura, en el que se consideran, no únicamente los modelos planos propuestos por Zapata (2002), sino también nuevos modelos con dos y tres componentes de movimiento. De igual forma, en el estudio del cabeceo, se incursiona con modelos de tipo 2D, para la valoración de la presencia de acoplamiento entre las dos direcciones, y adicionalmente se propone trabajar con señales de respuesta filtradas, de manera que sea posible ampliar el conocimiento sobre la existencia de componentes que resultan opacadas por la fuerte contribución de otros movimientos.

Al igual que en el caso anterior, las señales de excitación y de respuesta se seleccionaron con base en las señales que se relacionan en los procedimientos no paramétricos. Según sea el caso, se comentan y presentan

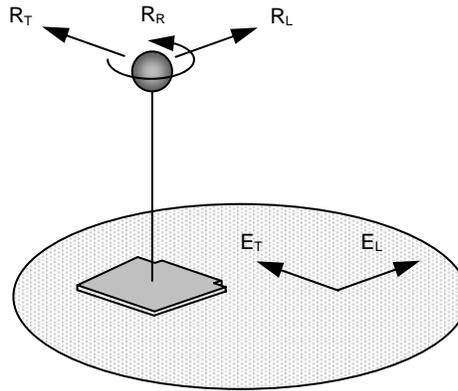


Fig 3.3 - Modelo 3D-SIST

Tabla 3.2 - Señales correspondientes al modelo 3D-SIST

Sigla	Descripción	Expresión
$E_L$	Es la excitación correspondiente a la señal de aceleración registrada en JN en L.	$\ddot{x}_s$
$E_T$	Es la excitación correspondiente a la señal de aceleración registrada en JN en T.	$\ddot{y}_s$
$R_L$	Es la respuesta correspondiente a la señal de aceleración relativa con respecto al terreno, registrada en AZ-CEN en el componente L.	$\ddot{x}_T^{AZ-CEN} - \ddot{x}_s$
$R_T$	Es la respuesta correspondiente a la señal de aceleración relativa con respecto al terreno, registrada en AZ-CEN en el componente T.	$\ddot{y}_T^{AZ-CEN} - \ddot{y}_s$
$R_R$	Es la respuesta de torsión en azotea, correspondiente a la diferencia entre las señales en T, de los puntos AZ-LAT y AZ-CEN.	$\ddot{y}_T^{AZ-LAT} - \ddot{y}_T^{AZ-CEN}$

las expresiones a partir de las cuales se determinaron los registros con los cuales se trabajó. Adicionalmente, es importante anotar que, debido a la débil participación en los efectos ISE del componente de movimiento por traslación relativa de la base, no fue posible realizar un trabajo similar en este aspecto.

Para el caso de la estimación de las frecuencias asociadas con la estructura, se trabajaron cuatro modelos en total (figs 3.4 y 3.5). En los dos primeros ( $1D_L$ -EST y  $1D_T$ -EST) se analiza el problema en cada una de los componentes de movimiento T y L, por separado. En estos modelos, las señales de excitación corresponden a la suma de los efectos de traslación absoluta y cabeceo en la base, de forma que las respuestas en azotea son tomadas como relativas a las anteriores, resultando entonces en historias de aceleraciones que caracterizan el movimiento de la estructura en sí.

Para el tercer modelo se unieron los dos primeros, de forma que se pudiera analizar el grado de acoplamiento entre los componentes de traslación en la estructura, y buscando que sirviera como paso intermedio para la formulación del cuarto de los modelos propuestos. En este último se introdujo la respuesta en el componente de torsión (R), el cual fue determinado de manera tal que representase únicamente la torsión que se presenta en la estructura, por lo que se le debió restar el aporte en torsión producido en la base.

Para los cuatro casos, las señales de excitación (E) y de respuesta (R) utilizadas, corresponden a las que se describen en la tabla 3.3.

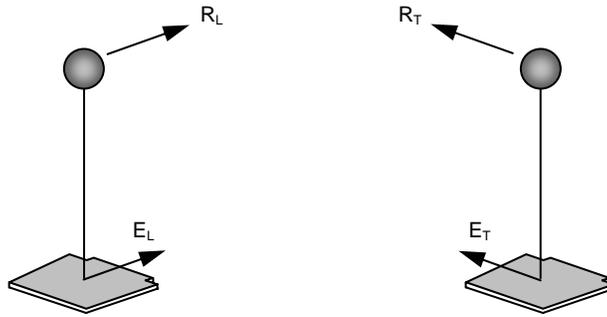


Fig 3.4 - Modelos 1D<sub>L</sub>-EST y 1D<sub>T</sub>-EST

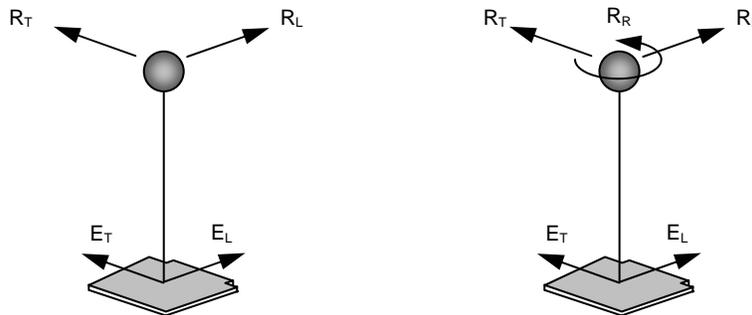


Fig 3.5 - Modelos 2D-EST y 3D-EST

Tabla 3.3 - Señales correspondientes a los modelos de estructura

Sigla	Descripción	Expresión
E <sub>L</sub>	Es la excitación, correspondiente a la suma de la señal de aceleración en el componente L en sótano y el componente de cabeceo en la azotea en la misma dirección.	$\ddot{x}_T^{SO-CEN} + \frac{\ddot{z}_T^{SO-SUR} - \ddot{z}_T^{SO-NOR}}{L_x} H$
E <sub>T</sub>	Es la excitación, correspondiente a la suma de la señal de aceleración en el componente T en sótano y el componente de cabeceo en la azotea en la misma dirección.	$\ddot{y}_T^{SO-CEN} + \frac{\ddot{z}_T^{SO-EST} - \ddot{z}_T^{SO-OES}}{L_y} H$
R <sub>L</sub>	Es la respuesta en azotea correspondiente a la estructura, obtenida como la diferencia entre la señal de aceleración absoluta registrada y la suma de traslación en la base y cabeceo, en el componente L.	$\ddot{x}_T^{AZ-CEN} - \left( \ddot{x}_T^{SO-CEN} + \frac{\ddot{z}_T^{SO-SUR} - \ddot{z}_T^{SO-NOR}}{L_x} H \right)$
R <sub>T</sub>	Es la respuesta en azotea correspondiente a la estructura, obtenida como la diferencia entre la señal de aceleración absoluta registrada y la suma de traslación en la base y cabeceo, en el componente T.	$\ddot{y}_T^{AZ-CEN} - \left( \ddot{y}_T^{SO-CEN} + \frac{\ddot{z}_T^{SO-EST} - \ddot{z}_T^{SO-OES}}{L_y} H \right)$
R <sub>R</sub>	Es la respuesta correspondiente a la torsión de la estructura en la azotea, calculada como la diferencia entre las rotaciones en su plano de la azotea y el sótano, las cuales son obtenidas a su vez como la diferencia entre los movimientos en el componente T de los puntos LAT y CEN.	$\left( \ddot{y}_T^{AZ-LAT} - \ddot{y}_T^{AZ-CEN} \right) - \left( \ddot{y}_T^{SO-LAT} - \ddot{y}_T^{SO-CEN} \right)$

Por otra parte, en lo que respecta a los modelos utilizados para la estimación de las frecuencias debidas al cabeceo, se consideraron tres modelos en total. Los dos primeros corresponden a la caracterización del movimiento de cabeceo en las dos direcciones de traslación, el cual es evaluado para cada una de ellas como el movimiento relativo que existe en el componente vertical, entre una señal a uno de los costados del sótano sobre el eje de la dirección de análisis, y la señal al centro del sótano (modelos 1D<sub>L</sub>-CAB y 1D<sub>T</sub>-CAB).

El tercero de los modelos, no es otra cosa diferente que la conjunción de los dos anteriores, que además de permitir identificar las características de los movimientos en cada una de las direcciones, facilita la comprensión de los efectos de acoplamiento en el componente de cabeceo en ambas direcciones.

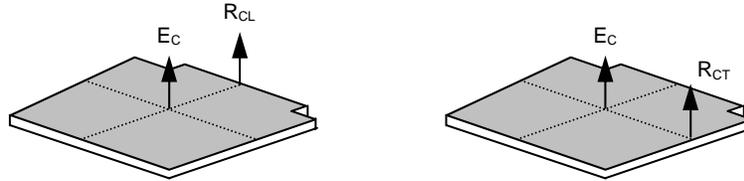


Fig 3.6 - Modelos 1D<sub>L</sub>-CAB y 1D<sub>T</sub>-CAB

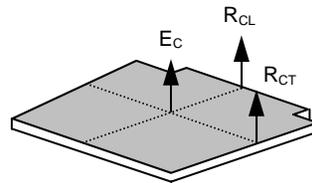


Fig 3.7 - Modelo 2D-CAB

En la tabla 3.4 se presenta la descripción y el modo en que se obtuvieron las señales de excitación (E) y de respuesta (R) consideradas en los modelos de cabeceo.

Tabla 3.4 - Señales correspondientes a los modelos de cabeceo

Sigla	Descripción	Expresión
E <sub>C</sub>	Es la excitación, correspondiente a la señal de aceleración absoluta en el centro del sótano, en el componente V.	$\ddot{z}_T^{SO-CEN}$
R <sub>CL</sub>	Es la respuesta asociada con el cabeceo en la dirección L, medida como la aceleración vertical relativa del extremo norte con respecto al centro del sótano.	$\ddot{z}_T^{SO-NOR} - \ddot{z}_T^{SO-CEN}$
R <sub>CT</sub>	Es la respuesta asociada con el cabeceo en la dirección T, medida como la aceleración vertical relativa del extremo este con respecto al centro del sótano.	$\ddot{z}_T^{SO-EST} - \ddot{z}_T^{SO-CEN}$

### 3.3 ESTIMACIÓN ANALÍTICA

Adicional a las técnicas de identificación que se han descrito, y conocidas las propiedades de la cimentación y del suelo sobre el cual ésta se encuentra, es posible hallar en la literatura una amplia selección de trabajos en

los cuales se proponen procedimientos analíticos con los que es posible determinar los coeficientes de rigidez equivalentes a los movimientos de traslación y cabeceo de la cimentación (Avilés, 1999; Dobry y Gazetas, 1986 y 1988; Gazetas, 1990; Gazetas, 1991; Gazetas *et al.*, 1991; Kaynia y Kausel, 1982; Kobori *et al.*, 1991; Mamoon *et al.*, 1990; Pender, 1993; Stewart *et al.*, 1999a; Veletsos y Wei, 1971; Veletsos y Damodaran, 1975).

Siendo así, en el presente trabajo se hizo uso de dos aplicaciones prácticas de trabajos como estos, que son: la propuesta que se incluye en la versión preliminar de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (NTCDS-RCDF, 2000), complementada con un trabajo de Gazetas (1990), y la aplicación del programa Dyna5 (Novak *et al.*, 1995).

### 3.3.1 Procedimiento de la versión preliminar de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo

Aun cuando el edificio en estudio se encuentra en Acapulco y las NTCDS-RCDF (2000) no aplican en su diseño, resulta interesante aplicar el procedimiento que estas indican para el caso de diseño considerando los efectos de interacción suelo-estructura, toda vez que seguramente se constituirán en un primer paso para futuras inclusiones de este tema en los reglamentos de construcción del resto de la República Mexicana.

Las NTCDS-RCDF (2000), en el numeral 1.2 sobre las condiciones de análisis y diseño, y en el numeral 2.2 sobre el análisis estático y dinámico señalan que, para estructuras ubicadas sobre suelos de la zona de transición y de lago de la ciudad de México, será factible aplicar el método de diseño del apéndice A, el cual en su alcance establece que será permisible tener en cuenta en el diseño, los efectos de sitio y de interacción suelo-estructura.

Guardando las proporciones, éste bien podría ser el caso del edificio SIS, ya que se encuentra en un suelo de tipo blando arenoso. De esta manera, se establece que los efectos de interacción suelo-estructura se tomarán en cuenta cuando se cumpla que

$$\frac{T_e H_s}{T_s H_e} < 2.5 \quad (3.85)$$

siendo

$$H_e = \frac{\sum W_i \phi_i h_i}{\sum W_i \phi_i} \quad (3.86)$$

donde

$T_e$	es el período fundamental de la estructura supuesta con base indeformable
$T_s$	es el período dominante más largo del terreno
$H_s$	es la profundidad de los depósitos firmes en el sitio de interés
$H_e$	es la altura efectiva de la estructura
$W_i$	es el peso de la $i$ -ésimo nivel
$\phi_i$	es la amplitud en el primer modo del $i$ -ésimo nivel con respecto a la base
$h_i$	es la altura del $i$ -ésimo nivel sobre la base.

Para el caso del edificio SIS, los valores correspondientes a la expresión 3.85 fluctúan entre 0.50 y 0.85, de forma que sí aplicarían las consideraciones sobre efectos ISE, cuyo empleo se limita al modo fundamental de la estructura.

Entonces, a partir del mismo concepto que se explicó anteriormente sobre la descomposición del movimiento del conjunto suelo-estructura, bajo el precepto de que es posible despreciar la masa de la fundación, el momento de rotación de la estructura y la contribución de los modos superiores (Luco, 1980), se propone que el período fundamental del sistema acoplado se determine mediante la siguiente expresión

$$\tilde{T}_e = \sqrt{T_e^2 + T_x^2 + T_r^2} \quad (3.87)$$

donde

$T_x$  es el período natural de la estructura si fuera infinitamente rígida y su base sólo pudiera trasladarse

$T_r$  es el período natural de la estructura si fuera infinitamente rígida y su base sólo pudiera girar.

Los cuales están determinados por

$$T_x = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{W_e}{K_x}} \quad (3.88)$$

$$T_r = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \sqrt{\frac{W_e (H_e + D)^2}{K_r}} \quad (3.89)$$

siendo

$$W_e = \frac{(\sum W_i \phi_i)^2}{\sum W_i \phi_i^2} \quad (3.90)$$

donde

$W_e$  es el peso efectivo de la estructura vibrando en su modo fundamental

$D$  es la profundidad de desplante de la cimentación

$K_x$  es la rigidez de la cimentación por traslación en la dirección de análisis

$K_r$  es la rigidez de la cimentación por rotación (cabeceo) en la dirección de análisis.

Nótese que las expresiones 3.87 a 3.89 equivalen a las vistas en el análisis no paramétrico en el dominio de la frecuencia (3.32 a 3.34), correspondientes al método simplificado propuesto por Luco (1980). De forma que para efectos prácticos, comparar las rigideces obtenidas por estos métodos será equivalente a la comparación de sus frecuencias (o períodos) asociadas.

Las rigideces  $K_x$  y  $K_r$ , representan resortes que se usan en sustitución del suelo, cuyas propiedades dependen del subsuelo, de las características de la cimentación y de la frecuencia fundamental de la excitación.

Para el caso de estructuras que se apoyan sobre un cajón que abarca toda el área de cimentación y posee la suficiente rigidez y resistencia para actuar como cuerpo rígido, las rigideces se obtienen considerando círculos equivalentes a la superficie de desplante, cuyos radios para los modos de traslación y cabeceo están dados por

$$R_x = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (3.91)$$

$$R_r = \sqrt[4]{\frac{4I}{\pi}} \quad (3.92)$$

donde

- $A$  es el área de la superficie del cajón  
 $I$  es el momento de inercia del cajón respecto al eje centroidal de rotación, perpendicular a la dirección en que se analiza la estructura.

Dado esto, las rigideces del cajón están determinadas por la siguiente expresión

$$K_m = K_m^0 (k_m - 2\xi\eta_m c_m) \quad (3.93)$$

en la cual  $m$  bien puede ser  $x$  o  $r$ , de tal manera que

- $K_m$  es la rigidez a traslación o cabeceo  
 $K_m^0$  es la rigidez estática de traslación o cabeceo  
 $k_m$  es un coeficiente de rigidez  
 $\xi$  es el amortiguamiento histerético del suelo  
 $\eta_m$  son parámetros que dependen de la frecuencia de la excitación  
 $c_m$  es el coeficiente de amortiguamiento.

De manera que, las rigideces estáticas de traslación y cabeceo, están dadas por

$$K_x^0 = \frac{8GR_x}{2-\nu} \left(1 + \frac{R_x}{2H_s}\right) \left(1 + \frac{2D}{3R_x}\right) \left(1 + \frac{5D}{4H_s}\right) \quad (3.94)$$

$$K_r^0 = \frac{8GR_r^3}{3(1-\nu)} \left(1 + \frac{R_r}{6H_s}\right) \left(1 + \frac{2D}{R_r}\right) \left(1 + 0.71 \frac{D}{H_s}\right) \quad (3.95)$$

donde

- $G$  es el módulo de rigidez medio del suelo de soporte  
 $\nu$  es el coeficiente de Poisson.

Mientras que los coeficientes de rigidez se definen como

$$k_x = 1 \quad (3.96)$$

$$k_r = 1 - 0.2\eta_r \quad (3.97)$$

Por su parte, los coeficientes de amortiguamiento están dados por

$$c_x = \begin{cases} \frac{0.65\xi\eta_{xs}}{1 - (1 - 2\xi)\eta_{xs}^2} & ; \eta_{xs} = \frac{\eta_x}{\eta_s} \leq 1 \\ 0.576 & ; \eta_{xs} = \frac{\eta_x}{\eta_s} > 1 \end{cases} \quad (3.98)$$

$$c_r = \begin{cases} \frac{0.5\xi\eta_{rp}}{1-(1-2\xi)\eta_{rp}^2} & ; \eta_{rp} = \frac{\eta_r}{\eta_p} \leq 1 \\ \frac{0.3\eta_r^2}{1+\eta_r^2} & ; \eta_{rp} = \frac{\eta_r}{\eta_p} > 1 \end{cases} \quad (3.99)$$

En cuanto a los diferentes parámetros de frecuencia, estos se definen a partir de

$$\eta_m = \omega \frac{R_m}{V_s} \quad (3.100)$$

y

$$\eta_s = \frac{\pi R_x}{2H_s} \quad (3.101)$$

$$\eta_p = \frac{\pi R_r}{2H_s} \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (3.102)$$

en los que

$\omega$  es la frecuencia circular  
 $V_s$  es la velocidad de ondas S característica del suelo.

Si a su vez la estructura está cimentada sobre pilas de fricción, como es el caso del edificio SIS, a los valores de rigidez determinados para el cajón con las expresiones anteriores, se sumaran los aportes en rigidez de cada una de las pilas, así

$$K_x = \sum K_{xi} \quad (3.103)$$

$$K_r = \sum x^2 K_{vi} \quad (3.104)$$

donde

$K_{xi}$  es la rigidez de la pila  $i$  en traslación horizontal  
 $K_{vi}$  es la rigidez de la pila  $i$  en traslación vertical  
 $x$  la distancia medida en la dirección de análisis, entre el centro de la pila y el eje centroidal de la cimentación.

De tal forma que la rigidez de la  $i$ -ésima pila, bien sea en traslación horizontal o vertical, esta dada por

$$K_{mi} = K_{mi}^0 k_{mi} \quad (3.105)$$

En el caso de traslación, se tiene que la rigidez estática y el coeficiente de rigidez se determinan como

$$K_x^0 = d E_s \left( \frac{E_p}{E_s} \right)^{0.21} \quad (3.106)$$

$$k_x = 1 \quad (3.107)$$

donde

$d$  es el diámetro de la pila  
 $E_s$  es el módulo de elasticidad del suelo  
 $E_p$  es el módulo de elasticidad de la pila.

Mientras que en el caso de la rigidez a la traslación vertical, a partir de la cual se determina el aporte de las pilas a la rigidez por cabeceo de la cimentación, su valor estático y coeficiente se calculan de acuerdo con

$$K_v^0 = 1.9 d E_s \left( \frac{L}{d} \right)^{0.67} \quad (3.108)$$

$$k_{vi} = \begin{cases} 1 & ; \quad \frac{L}{d} < 15 \\ \frac{\sqrt{\eta} \left( \frac{L}{d} - 15 \right) + 1}{35} & ; \quad 15 \leq \frac{L}{d} < 50 \\ 1 + \sqrt{\eta} & ; \quad \frac{L}{d} \geq 50 \end{cases} \quad (3.109)$$

siendo

$$\eta = \frac{\omega d}{V_s} \quad (3.110)$$

Por otra parte, en lo que se refiere al movimiento de torsión, las NTCDS-RCDF (2002) no contemplan modificaciones en el diseño para el caso en que los efectos ISE participan en este componente. Por lo tanto, para tener herramientas de comparación con los resultados obtenidos por el método simplificado de Luco, y con los que más adelante se ilustrarán en el caso del uso del programa Dyna5, se recurrió a las expresiones propuestas al respecto por Gazetas (1990).

En este caso, en lo que se refiere a la rigidez del cajón, esta es de nuevo considerada como la de una superficie circular equivalente, cuyo radio es obtenido a partir de la siguiente expresión.

$$R_t = \sqrt[4]{\frac{2J}{\pi}} \quad (3.111)$$

Siendo así, la rigidez por torsión que aporta el cajón al sistema de la cimentación se determina por

$$K_t = K_t^0 k_t \quad (3.112)$$

Expresión en la que, la rigidez estática y el coeficiente de rigidez, se determinan de acuerdo con las siguientes expresiones, respectivamente.

$$K_t^0 = \frac{16}{3} G R_t^3 \left( 1 + 0.10 \frac{R_t}{H_s} \right) \left( 1 + 2.67 \frac{D}{R_t} \right) \quad (3.113)$$

$$k_t = 1 - 0.14\eta_t \quad (3.114)$$

Por último está el aporte de las pilas al cálculo de la rigidez a torsión. En este caso, su aporte como conjunto puede expresarse aproximadamente en función del producto entre la rigidez de cada una de las pilas al movimiento por traslación y el brazo al cuadrado con respecto al centroide de la cimentación, así

$$K_t = \sum r_i^2 K_{xi} \quad (3.115)$$

Teniendo entonces de esta manera los coeficientes de rigidez correspondientes a los mismos grados de libertad que se definieron en los análisis anteriores, cuando se idealizo el problema de interacción como un subsistema de cinco grados de libertad, asociados con los movimientos de traslación, cabeceo y torsión en la base.

### 3.3.2 Modelos analizados con el programa Dyna5

Conociendo las características del sistema de fundación y el suelo en el que este se encuentra, el programa Dyna5 (Novak *et al.*, 1995) permite calcular la respuesta de fundaciones ante diferentes tipos de cargas dinámicas, para diferentes tipos de cimentaciones, tales como cajones rígidos o flexibles, superficiales o embebidos, o sistemas de pilas o pilotes de punta o fricción, bien sea que estos se encuentran en suelos considerados como un semiespacio homogéneo o como una configuración de estratos.

Como parte de la respuesta del análisis, el programa MIMO permite conocer las constantes de rigidez asociadas con los seis grados de libertad, aunque bien en lo que al presente trabajo respecta únicamente se han considerado cinco de ellos.

En lo que sigue se hace una breve descripción de los fundamentos bajo los cuales opera el programa Dyna5, en lo que se refiere a las fundaciones con cajón y pilas, tal como es el caso del edificio SIS. Es preciso anotar que estos se presentan únicamente con fines ilustrativos, pues no es del alcance de este trabajo evaluar la calidad de las técnicas bajo las cuales opera el programa.

En el caso de una estructura soportada por un grupo de pilas embebidas en un medio estratificado, que es el primer tipo de fundación considerado por el programa, estas pueden ser o no empotradas en su extremo superior a un elemento que bien puede considerarse rígido o flexible. El análisis de la fundación es resuelto en dos pasos. Primero se evalúan los factores de interacción pila-suelo-pila, para luego determinar la rigidez del grupo. En segundo lugar, se adiciona en forma separada el efecto de los estratos laterales.

El cálculo de la rigidez de una pila simple, paso preliminar para la determinación de la rigidez de todo el grupo, se realiza mediante la aproximación dada por Novak y Aboul-ella (1978), en el que las reacciones dinámicas del suelo frente al desplazamiento de la pila es calculado asumiendo que el suelo está compuesto por capas infinitamente delgadas que se extienden horizontalmente. De acuerdo con los autores del programa Dyna5, este método ha demostrado ser versátil frente a propuestas más rigurosas, aunque presenta inconvenientes ante bajas frecuencias.

Para atender esta falencia, frente a la cual la rigidez horizontal y vertical tiende a cero, la solución anterior es modificada por una más rigurosa al fijar una frecuencia de corte, por debajo de la cual la rigidez toma un valor constante. El ajuste de esta aproximación depende del cociente entre los módulos de elasticidad entre la pila y el suelo.

Como ya se dijo las pilas pueden considerarse de punta o de fricción. En lo que interesa para este trabajo, para la condición en las que éstas están trabajando por fricción, el programa calcula aproximadamente la frecuencia fundamental del depósito por debajo de la cual elimina el amortiguamiento por radiación, dejando únicamente el aporte de amortiguamiento del material, pero no afecta el cálculo de las rigideces.

En cuanto a los grupos de pilas, el programa permite considerar o no los efectos de grupo. Para el caso en que no se consideran, se asume que cada una de las pilas actúa independiente, de forma que la rigidez del grupo es calculada asumiendo que cada una de las pilas aporta su rigidez de manera adecuada al centro de gravedad.

Mientras que para el caso en que sí es considerado, como es adecuado para el caso en que las pilas están poco espaciadas, la rigidez del grupo es determinada de acuerdo con el método de superposición propuesto por Novak y Mitwally (1990), en el que la interacción entre dos pilas es usada para formular la rigidez del grupo, mientras que el efecto del grupo como tal es considerado de manera separada, con la relación dada por el cociente entre el desplazamiento dinámico en una pila debido a una carga unitaria en otra, entre la flexibilidad dinámica de la primera.

El programa incluye la variación de los factores de interacción con la frecuencia, basándose en la interpolación y extrapolación de valores a partir de las curvas clásicas propuestas por Kaynia y Kausel (1982), de manera que lo que hace el programa es interpolar y extrapolar entre los valores propuestos en dicha referencia.

Es preciso anotar que, conforme la variación de los factores, la rigidez del grupo puede variar drásticamente con respecto a la frecuencia, incluso tomando valores negativos. Aun así, para el intervalo de frecuencias en los que se analiza el caso del presente trabajo (0.70 a 1.30 Hz), las variaciones en frecuencia no es influyente.

Adicionalmente, es preciso señalar que el programa tiene como limitante el hecho de que no permite calcular la rigidez de un grupo de pilas cuyos radios sean variables entre si. El tipo de pila es único para el grupo.

Ahora bien, para el caso de una cimentación de cajón, esta puede considerarse en un semiespacio de suelo homogéneo o en un estrato. Si se encuentra en un suelo homogéneo, el programa calcula las constantes de rigidez de acuerdo con las expresiones propuestas por Veletsos *et al.* (1971, 1973 y 1974) y si a su vez el cajón se encuentra embebido, entonces se recurre a las expresiones descritas por Novak *et al.* (1972, 1973) y Beredugo y Novak (1972). Mientras que para el caso en que el cajón se encuentra sobre un estrato de suelo, las expresiones usadas corresponden a las propuestas por Kausel y Ushijima (1979).

Siendo entonces estos los conceptos con los que trabaja el programa, se elaboraron una serie de modelos fundamentales para ser analizados en él. En éstos se consideraron variantes como, calcular directamente la rigidez de todo el conjunto formado por pilas y cajón, considerar las pilas y el cajón de manera independiente, calcular el aporte de cada una de las pilas y luego agruparlas, considerar o no los efectos de grupo (con lo que se determinó su influencia por medio del cociente con respecto al caso en que no eran considerados), además de que todos los modelos se evaluaron para un suelo homogéneo o con estratos.

Es importante mencionar que para aquellos modelos en los que el suelo de cimentación se consideró como un semiespacio o un estrato homogéneo, la velocidad de ondas  $S$  promedio se obtuvo de acuerdo con el procedimiento descrito por Rosenblueth y Reséndiz (1988).

Adicionalmente, a partir de los modelos fundamentales, se elaboraron diferentes combinaciones, como la propuesta en Taborda *et al.* (2002), surgidas como modificaciones al modelo elaborado por Kobori *et al.* (1991). A continuación se detallan cada uno de los modelos fundamentales y de manera seguida, se describen las diferentes variantes surgidas a partir de la combinación de estos.

- Modelo CH: En este se considera el cajón embebido en un semiespacio homogéneo (fig 3.8). Las propiedades del suelo se definen como los valores promedio (Rosenblueth y Reséndiz, 1988) determinados a partir de la descripción hecha en el capítulo 1.
- Modelo CE: Consiste en el cajón embebido en un estrato de suelo homogéneo (fig 3.9).

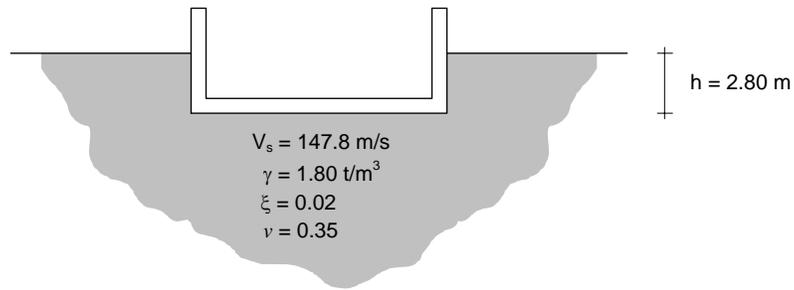


Fig 3.8 - Modelo CH

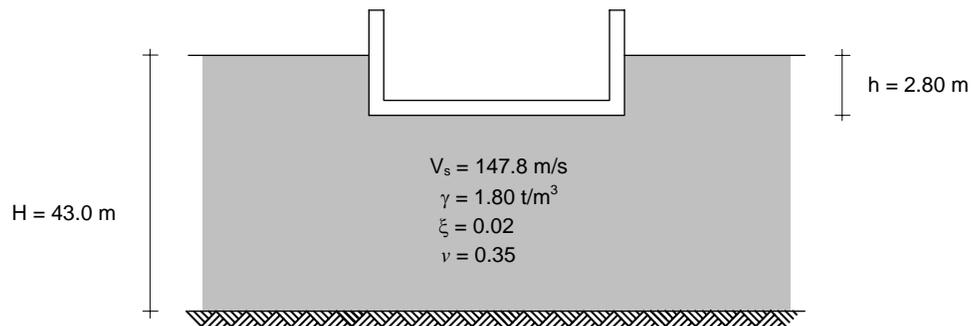


Fig 3.9 - Modelo CE

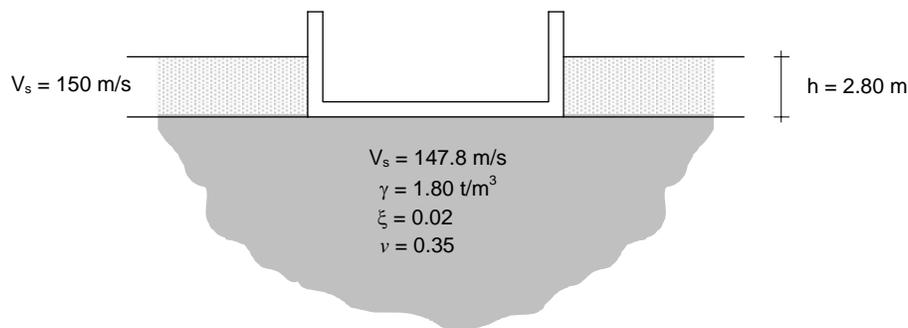


Fig 3.10 - Modelo CHe

- Modelo CHe: Este equivale al modelo CH, con la diferencia de que se considera que el suelo a los lados del cajón poseen una velocidad de ondas S diferente a la corresponde al estrato de suelo por debajo del mismo (fig 3.10).
- Modelo CEe: Este equivale al modelo CE, pero al igual que en el caso anterior, las propiedades del suelo que circunda el cajón difieren de las que posee el suelo por debajo del mismo (fig 3.11).
- Modelo PpH: En este se incluyen la pilas asumiendo que todas ellas poseen una misma sección promedio de diámetro igual a 1.2 m, que están perfectamente unidas al cajón y además se encuentran embebidas en un semiespacio de suelo homogéneo. No se consideran los efectos de grupo (fig 3.12).

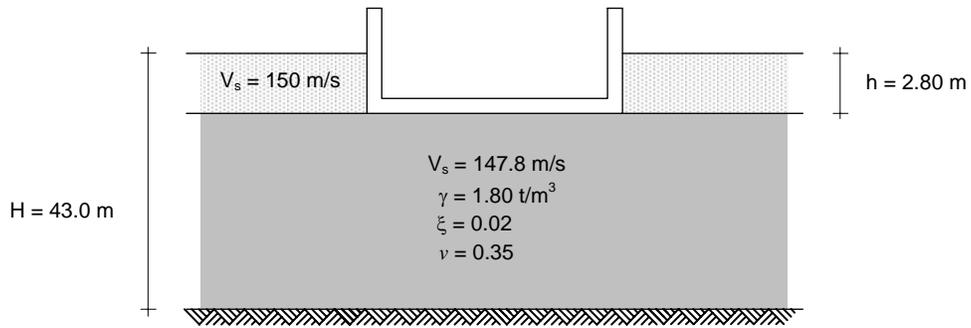


Fig 3.11 - Modelo CEe

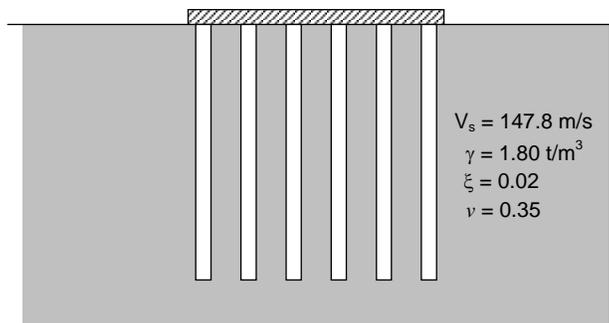


Fig 3.12 - Modelos PpH, PpH.G y PsH

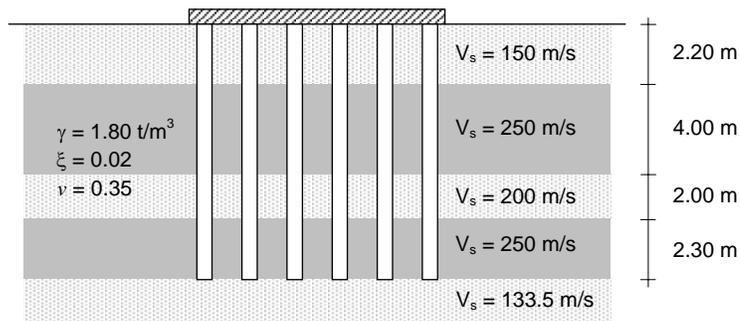


Fig 3.13 - Modelos PpE, PpE.G y PsE

- Modelo PpE: Es equivalente al modelo anterior, pero en este caso se consideran los estratos laterales a las pilas (fig 3.13), de acuerdo a como estos fueron definidos en la fig 1.8.
- Modelo PpH.G: Es igual al modelo PpH pero en esta ocasión se incluyen los efectos de grupo (fig 3.12).
- Modelo PpE.G: Equivale al modelo PpHe, con la diferencia de que ahora se toman en cuenta los efectos de grupo (fig 3.13).

A partir de los resultados obtenidos con los cuatro modelos anteriores, se determinó el valor de los efectos de grupo para las pilas consideradas en un semiespacio homogéneo ( $EG_H$ ) y en un perfil de estratos ( $EG_E$ ) de acuerdo con las siguientes expresiones.

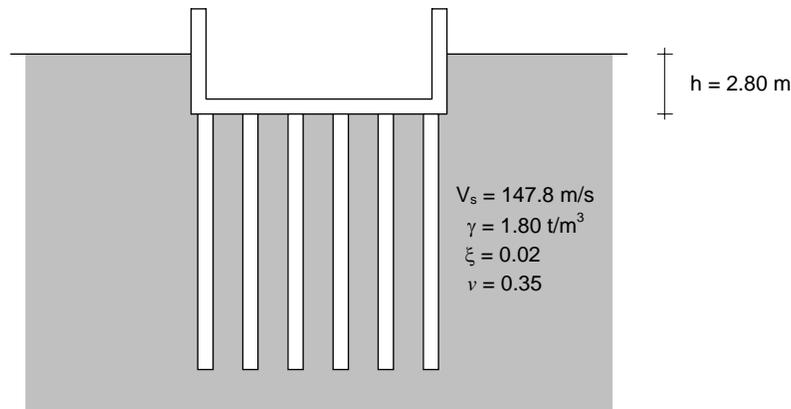
$$EG_H = \frac{PpH.G}{PpH} \quad (3.116)$$

$$EG_E = \frac{PpE.G}{PpE} \quad (3.117)$$

- Modelo PsH: En este caso, para evitar tener que hacer uso de un valor de diámetro promedio, se optó por calcular la contribución de cada una de las pilas evaluada independientemente y se obtuvo la suma total del conjunto. Se consideró que todas ellas se encontraban embebidas en un semiespacio de suelo homogéneo (fig 3.12).
- Modelo PsE: Equivale al anterior, aunque en éste cada uno de los tipos de pilas fue evaluado para el caso en que el suelo se como un perfil de estratos (fig 3.13).

Entre sus múltiples opciones, a pesar de que no se hace una mención específica al respecto sobre el modo en que es evaluado, el programa Dyna5 incluye la posibilidad de considerar en un solo modelo el cajón y las pilas. Aun cuando al respecto no se conoce el procedimiento interno que sigue el programa, se elaboraron los siguientes dos modelos, para luego compararlos con los modelos básicos que se han descrito hasta el momento y las combinaciones que de ellos se proponen más adelante.

- Modelo CyPpH: Incluye en un solo modelo el cajón y el grupo de todas las pilas con un diámetro promedio de 1.2 m. Todo el conjunto se considera embebido en un semiespacio de suelo homogéneo (fig 3.14).
- Modelo CyPpE: Es el mismo anterior, pero en esta ocasión se considera que el conjunto se encuentra embebido en un perfil de estratos (fig 3.15).
- Modelo CyPpH.G: Se trata del modelo CyPpH con los efectos de grupo (fig 3.14).
- Modelo CyPpE.G: Se refiere al mismo modelo CyPpE pero considerando ahora los efectos de grupo (fig 3.15).



**Fig 3.14 - Modelo CyPpH y CyPpH.G**

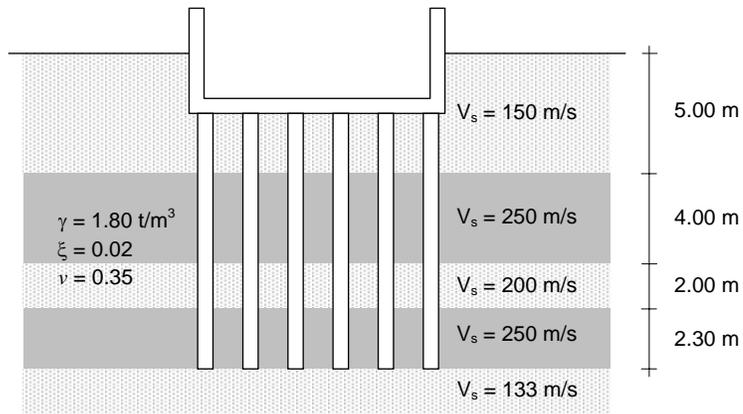


Fig 3.15 - Modelo CyPpE y CyPpE.G

Ante la incertidumbre sobre la manera en que el programa calculaba las rigideces asociadas a los dos modelos anteriores, y con la intención de considerar no sólo los efectos de interacción entre las pilas, sino también el existente entre éstas, el suelo y el cajón, se recurrió a la propuesta de Kobori *et al.* (1991).

Esta propuesta consiste en tener en cuenta los efectos pilas-suelo-cajón, por medio de una suma de los efectos de las pilas y el cajón, evaluadas cada uno por separado, menos la contribución la rigidez de las columnas de suelo que ocupan las pilas. Esta propuesta se modificó levemente considerando el cajón embebido (fig 3.16).

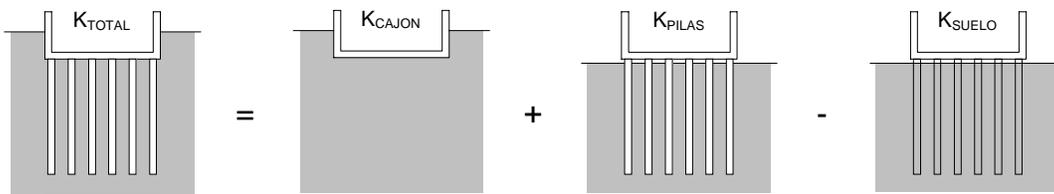


Fig 3.16 - Modelo de Kobori modificado

Siendo así, es preciso incluir los siguientes modelos auxiliares, para poder luego aplicar la metodología propuesta por Kobori *et al.* (1991) con los demás modelos considerados.

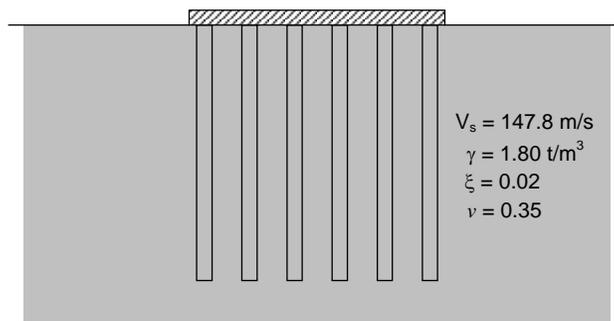
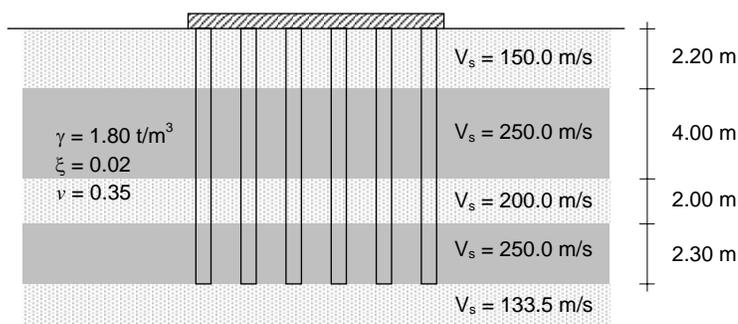


Fig 3.17 - Modelos auxiliares SpH y SsH



**Fig 3.18 - Modelos auxiliares SpE y SsE**

- Modelo auxiliar SpH: Considera las pilas de suelo con una sección promedio embebidas en un semiespacio homogéneo (fig 3.17).
- Modelo auxiliar SpE: Corresponde al caso anterior, pero en el caso en que el suelo se asume como un perfil de estratos (fig 3.18).
- Modelo auxiliar SsH: Este modelo equivale a la suma del aporte de cada una de las pilas de suelo evaluadas independientemente en un semiespacio de suelo homogéneo (fig 3.17).
- Modelo auxiliar SsE: Es el mismo caso anterior, pero aquí se considera el perfil de estratos (fig 3.18).

De acuerdo con los planteamientos de las NTCDS-RCDF (2000) y la propuesta de Kobori *et al.* (1991) es válido expresar las rigideces del sistema de cimentación como la suma de los efectos aislados de cada uno de sus componentes. Dado esto, se optó por generar una serie de alternativas a partir de los modelos básicos ya vistos. Es así como se proponen las combinaciones que se presentan en las tablas 3.5 y 3.6.

**Tabla 3.5 - Modelos combinados a partir de los resultados del programa (Opciones en las que no se consideran los estratos)**

Nombre	Combinación	Clasificación
H1	CH+PpH	Modelos que combinan el cajón y las pilas de sección promedio cuando se consideran en un semiespacio homogéneo.
H2	CH+PpH.G	
H3	CH+PpH-SpH	
H4	CH+PpH.G-SpH	
H5	CH+PsH	Modelos que combinan el cajón y la suma de las pilas analizadas independientemente cuando se consideran en un semiespacio homogéneo.
H6	CH+PsH-SsH	
H7	CH+PsH×EG <sub>H</sub>	
H8	CH+(PsH-SsH)×EG <sub>H</sub>	
H9	CE+PpH	Modelos que combinan el cajón en estrato con las pilas de sección promedio en un semiespacio homogéneo.
H10	CE+PpH.G	
H11	CE+PpH-SpH	
H12	CE+PpH.G-SpH	
H13	CE+PsH	Modelos que combinan el cajón en estrato con la suma de las pilas analizadas independientemente en un semiespacio homogéneo.
H14	CE+PsH-SsH	
H15	CE+PsH×EG <sub>H</sub>	
H16	CE+(PsH-SsH)×EG <sub>H</sub>	

**Tabla 3.6 - Modelos combinados a partir de los resultados del programa  
(Opciones en las que si se consideran los estratos)**

Nombre	Combinación	Clasificación
E1	CHe+PpE	Modelos que combinan el cajón y las pilas de sección promedio cuando se consideran en el perfil de estratos del sitio.
E2	CHe+PpE.G	
E3	CHe+PpE-SpE	
E4	CHe+PpE.G-SpE	
E5	CHe+PsE	Modelos que combinan el cajón y la suma de las pilas analizadas independientemente cuando se consideran en el perfil de estratos del sitio.
E6	CHe+PsE-SsE	
E7	CHe+PsE×EG <sub>H</sub>	
E8	CHe+(PsE-SsE)×EG <sub>H</sub>	
E9	CEe+PpE	Modelos que combinan el cajón en estrato y las pilas de sección promedio en el perfil de estratos del sitio.
E10	CEe+PpE.G	
E11	CEe+PpE-SpE	
E12	CEe+PpE.G-SpE	
E13	CEe+PsE	Modelos que combinan el cajón en estrato y la suma de las pilas analizadas independientemente en el perfil de estratos del sitio.
E14	CEe+PsE-SsE	
E15	CEe+PsE×EG <sub>H</sub>	
E16	CEe+(PsE-SsE)×EG <sub>H</sub>	

## CAPÍTULO 4

### ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL SISTEMA

Se estiman las propiedades dinámicas del sistema por el cual está compuesto el edificio SIS mediante el uso de las técnicas de identificación paramétricas y no paramétricas que se expusieron en la sección anterior.

En una primera parte, cada uno de los ocho eventos seleccionados y los registros de las dos pruebas de vibración ambiental que se poseen, fueron sometidos a un análisis espectral a través del cual se obtuvieron las frecuencias modales, los porcentajes de amortiguamiento crítico y las formas características de vibrar. Luego se seleccionan dos de los eventos sísmicos, para los cuales se realizaron análisis de tipo no paramétrico, espectral por tramos consecutivos (ventanas) y de cruces por cero. Complementariamente, a éstos mismos eventos se les aplicó la técnica de identificación paramétrica modal.

#### 4.1 ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES COMPLETAS

De acuerdo con el procedimiento descrito para identificar las frecuencias de vibración del sistema, se calcularon diferentes funciones de transferencia entre las transformadas de Fourier de señales registradas en el edificio y el terreno.

Para caracterizar los movimientos de traslación en cada uno de los componentes T y L, se identificaron aquellas frecuencias asociadas con las máximas amplitudes observadas en los cocientes AZ-CEN/JN (figs 4.1 y 4.2). Dichos valores fueron corroborados con los identificados en los cocientes obtenidos entre las señales al centro de cada uno de los pisos intermedios y la señal en JN. En lo que corresponde a la identificación de las frecuencias asociadas con el movimiento debido a la torsión del sistema, se utilizaron los cocientes en cada uno de los niveles instrumentados entre las señales al costado norte en T y las señales al centro en el mismo componente. En la fig 4.3 se muestran las funciones de transferencia de AZ-LAT/AZ-CEN.

Adicionalmente, para cada par de registros, se calcularon las funciones de coherencia (figs 4.4 a 4.6) y los ángulos de fase. Justamente a partir de estos últimos y al evaluar la amplitud de la función de transferencia de cada uno de los niveles instrumentados con respecto a JN, se determinaron las formas modales de vibrar que se muestran en las figs 4.7 a 4.9.

Es preciso mencionar que ante la presencia de complicaciones fruto del trabajo con registros de baja calidad, o por las dificultades que puedan surgir en el proceso de identificación debido a efectos de acoplamiento entre los componentes de movimiento, o por no linealidades en el sistema, resulta de gran utilidad recurrir al cálculo de los espectros cruzados.

En la tabla 4.1 se muestran los valores de frecuencia asociados con cada uno de los modos identificados. Para todos los eventos fue posible identificar con certeza las cuatro primeras formas de vibrar en el componente T y las tres primeras en L y torsión. En algunos eventos fue posible identificar también las cuartas frecuencias en L y torsión, pero no así sus formas modales, por lo que se prefirió no incluirlas en el presente trabajo.

En algunos casos no fue posible fijar claramente un valor único de frecuencia, bien fuera porque en los diferentes cocientes se observaba una cresta robusta o una meseta que delimitaba dicho intervalo, o porque se presentaban múltiples amplificaciones consecutivas, cada una de ellas bien definida. Por lo tanto se señala entonces un intervalo de valores. En general, la presencia de estos intervalos es interpretada como la presencia de un comportamiento no lineal en el sistema o como el resultado de una deficiencia en las

**Tabla 4.1 - Frecuencias de vibración del sistema identificadas mediante el análisis espectral de las señales completas**

Evento	Modo	Frecuencias		
		T	L	R
VA-011	1	0.879	1.123	1.416
	2	2.930	4.102	4.443
	3	5.176	8.447	6.787
	4	7.422 - 7.861		
SI-011	1	0.784	0.989 - 1.010	1.279 - 1.315
	2	2.588 - 2.777	3.745	3.928 - 4.117
	3	4.602 - 4.849	7.864 - 8.142	6.128 - 6.659
	4	6.940		
SI-012	1	0.818	1.038	1.373
	2	2.740 - 2.759	3.760 - 3.778	4.041 - 4.163
	3	4.749 - 4.871	7.990 - 8.075	6.354 - 6.592
	4	6.958 - 7.080		
SI-013	1	0.842	1.099	1.440
	2	2.844	3.882 - 3.943	4.236
	3	4.956	7.324 - 8.191	6.384
	4	7.288 - 7.483		
SI-014	1	0.806	1.050	1.367
	2	2.673	3.809	4.138
	3	4.810 - 4.834	7.483 - 7.507	6.543 - 6.616
	4	6.873 - 6.790		
SI-021	1	0.806	1.019	1.349
	2	2.618	3.668	3.955 - 4.236
	3	4.706	7.678 - 7.764	5.811 - 5.847
	4	7.196		
SI-022	1	0.824	1.038	1.361
	2	2.673	3.668	4.047
	3	4.712	7.727	6.384 - 6.476
	4	7.422		
SI-023	1	0.824	1.050	1.361
	2	2.716	3.638 - 3.894	4.041
	3	4.828	7.813 - 8.099	6.342 - 6.458
	4	7.269		
SI-024	1	0.824	1.062	1.379
	2	2.753	3.802	4.022 - 4.175
	3	4.974	7.715 - 7.922	6.580 - 6.818
	4	7.117		
VA-021	1	0.854	1.074	1.440
	2	2.832	3.979	4.150 - 4.272
	3	4.956 - 5.078	8.057 - 8.325	6.714
	4	7.153 - 7.861		

amplitudes asociadas con el respectivo componente de movimiento en la señal, por lo que se ve afectado el cociente espectral. También puede ser resultado de las propiedades mismas de un trabajo espectral o de las propiedades típicas de una estructura a base de muros y marcos de concreto reforzado.

Si se comparan las frecuencias fundamentales identificadas en las dos pruebas de vibración ambiental, es posible concluir que el sistema no ha sufrido ningún cambio considerable luego del paso de los eventos sísmicos seleccionados. En los componentes T y L se aprecian reducciones de 3 y 4 %, respectivamente. Mientras que en torsión (R) los resultados parecieran indicar que el sistema hubiese ganado un poco de rigidez (2 %), lo cual se cree poco probable. Se considera entonces que esto se debe un efecto numérico ocasionado por las diferencias de resolución en frecuencia entre los procesos espectrales realizados a cada una de las dos pruebas de vibración ambiental.

Ahora bien, si se comparan las frecuencias superiores se encuentran diferencias que varían de 3 a 7 %, siendo las más pronunciadas las observadas en el segundo y tercer modo de vibrar del componente T.

**Tabla 4.2 - Amortiguamientos del sistema estimados por el método de amplificación dinámica y por el ajuste lineal**

Evento	Modo	Amortiguamientos (%)			
		Amplificación Dinámica		Ajuste lineal	
		T	L	T	L
VA-011	1	0.87	2.12	1.23	2.19
	2			1.09	1.77
	3			1.02	2.19
	4			4.79	
SI-011	1	1.33	2.31	1.66	1.55
	2			2.44	1.12
	3			2.66	4.40
	4			4.75	
SI-012	1	1.04	1.23	1.19	1.30
	2			1.36	2.25
	3			2.84	2.92
	4			3.47	
SI-013	1	1.64	1.19	1.21	1.15
	2			1.92	2.59
	3			3.15	2.19
	4			5.20	
SI-014	1	1.51	1.22	2.86	1.00
	2			2.18	0.96
	3			1.59	4.40
	4			1.75	
SI-021	1	1.38	1.49	1.83	1.79
	2			1.31	1.30
	3			1.43	1.95
	4			4.56	
SI-022	1	1.37	1.37	0.71	1.49
	2			1.09	4.20
	3			1.43	4.35
	4			3.00	
SI-023	1	1.03	1.25	1.46	1.43
	2			1.64	3.36
	3			1.78	2.91
	4			2.34	
SI-024	1	0.92	1.22	1.19	1.34
	2			0.65	1.35
	3			0.57	3.51
	4			2.10	
VA-021	1	0.89	0.94	1.28	1.32
	2			2.18	3.74
	3			2.38	8.00
	4			4.55	

Casi en forma general, las mayores reducciones en frecuencia, para todos los modos de vibrar en cada una de los tres componentes, se registraron en el evento SI-011, que es por demás, el más intenso de todos. Estas reducciones, para las frecuencias fundamentales con respecto a la primera prueba de vibración ambiental, fueron de 11 % para T y L, y de 8 % para R. A la llegada del evento SI-013, los valores de estas frecuencias se recuperaron en su totalidad en R, y en un 96 y 98 % en los componentes T y L, respectivamente.

Posteriormente, para el evento SI-021 se detecta una nueva reducción del orden de 8, 9 y 5 % para T, L y R, tras el cual la estructura se ha recuperado paulatinamente, ya que en los siguientes tres eventos cada vez se acercan más a los valores que se identifican para la segunda prueba de vibración ambiental.

En general se puede señalar entonces que, con base en la los valores de frecuencia identificados mediante el proceso espectral, tanto en los componentes de traslación como en el de torsión, y de igual manera para los modos fundamentales como para los modos superiores, el sistema no ha revelado ningún deterioro resaltable.

Las diferencias observadas en cada uno de los componentes de movimiento pueden aceptarse como típicas de los primeros reajustes naturales de los materiales y del sistema estructural y de cimentación.

En las figs 4.7 a 4.9 se muestran las formas modales correspondientes a cada una de las frecuencias identificadas para todos los eventos, normalizadas con respecto a la amplitud registrada en la azotea. En línea continua delgada se trazan las formas modales de la primera vibración ambiental, mientras que en línea discontinua se muestra la configuración propia de la segunda vibración ambiental. La línea gruesa corresponde a las formas asociadas con el evento SI-011. En estas gráficas se observa que los cambios más pronunciados se encuentran en los modos superiores.

En la tabla 4.2 se muestran los porcentajes de amortiguamiento crítico estimados aproximadamente por el método de amplificación dinámica, para el primer modo de vibrar, y por el ajuste lineal de varios grados de libertad que se describe en el apéndice D (Taborda y Ordaz, 2003), en los componentes de traslación.

Aplicando el método de amplificación dinámica, los amortiguamientos asociados con el modo fundamental de movimiento varían entre 0.87 y 1.64 % en la dirección T, y entre 0.94 y 2.31 en la dirección L, con desviaciones estándar de 0.28 y 0.44 %, respectivamente. Mientras que haciendo uso del ajuste lineal, estos valores varían entre 0.71 y 2.86, y entre 1.00 y 2.19 %, con desviaciones estándar de 0.58 y 0.34 % en los componentes longitudinal y transversal, respectivamente.

Al comparar ambos métodos pueden encontrarse diferencias que varían entre 3 y 92 %. En el evento SI-022, por ejemplo, el amortiguamiento estimado en el componente T con el ajuste lineal es prácticamente la mitad de aquel que se obtiene con el método de amplificación dinámica. Pero, en el caso contrario, para el mismo evento en el componente L, los valores estimados son bastante similares.

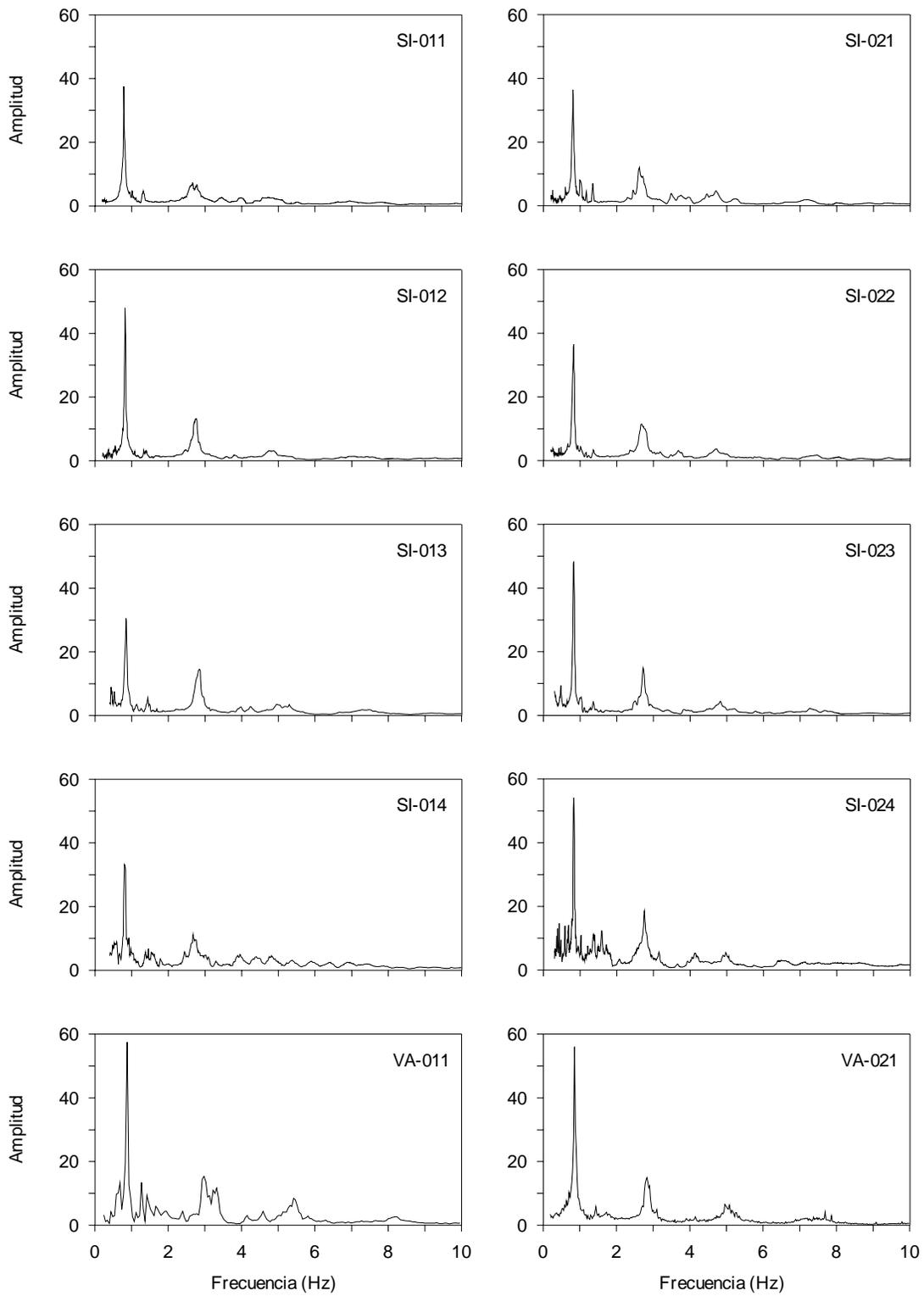
Ya que ambos procedimientos se basan en las amplitudes de la función de transferencia asociadas con las frecuencias identificadas, es importante mencionar que el de amplificación dinámica es un método que omite la influencia de los modos superiores, y por lo tanto es válido pensar que el nuevo procedimiento que se presenta puede conducir a valores más adecuados. A pesar de lo cual, no se puede olvidar el hecho de que ambos métodos poseen un nivel de duda similar, toda vez que están sujetos a los efectos de incertidumbre que introducen aspectos como la resolución en frecuencia o los procedimientos de suavizado de los espectros.

Precisamente para aminorar los efectos de suavizado en los modos superiores durante la aplicación del método del ajuste lineal, se usó el procedimiento de promedios móviles pesados de la expresión 3.12 (Trifunac, 1972). En la fig 4.10 se presenta, para los eventos SI-011, SI-021 y VA-021, el ajuste de la función de transferencia teórica obtenida con los valores de amortiguamiento calculados con el método de ajuste lineal con respecto a la experimental. El ajuste se considera adecuado, aun para el evento más intenso.

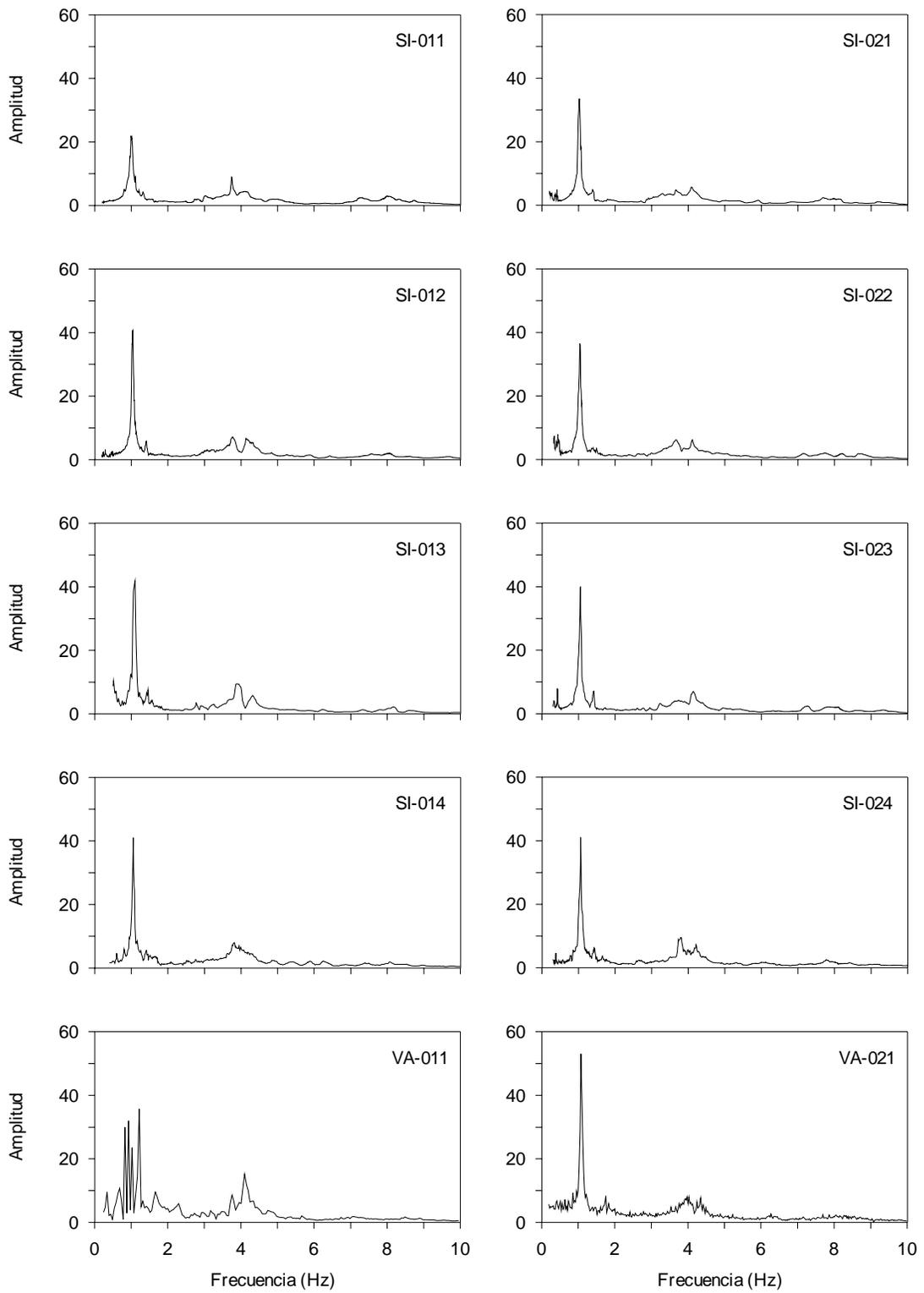
Más allá de la comparación de los resultados obtenidos con los dos métodos utilizados, llama la atención que los valores de amortiguamiento obtenidos, en especial para el primer modo de vibrar, sean en general menores al 1.5 %. Aunque en el alcance de este estudio no se contempla el análisis de las características de las ondas de excitación, es importante mencionar que, dada la cercanía de la estructura con la fuente de origen de los eventos sísmicos, y la participación implícita de los efectos de interacción cinemática, no debe descartarse que estos valores sean fruto de una reducción ocasionada por el ángulo de incidencia y la naturaleza de las ondas. Avilés *et al.* (2002) contemplan ampliamente los efectos del paso de ondas inhomogéneas en las propiedades dinámicas de las estructuras, en especial, como eventualmente pudiera ser el caso del edificio en estudio, en lo que se refiere a la reducción en los valores del amortiguamiento.

## 4.2 ANÁLISIS ESPECTRAL DE SEÑALES POR VENTANAS

Para poder observar el cambio en las propiedades dinámicas del sistema durante un mismo sismo, conviene fraccionar la señal en tramos de igual dimensión y realizar a cada uno de estos segmentos un análisis



**Fig 4.1 - Funciones de transferencia entre los puntos AZ-CEN y JN, en dirección T**



**Fig 4.2 - Funciones de transferencia entre los puntos AZ-CEN y JN, en dirección L**

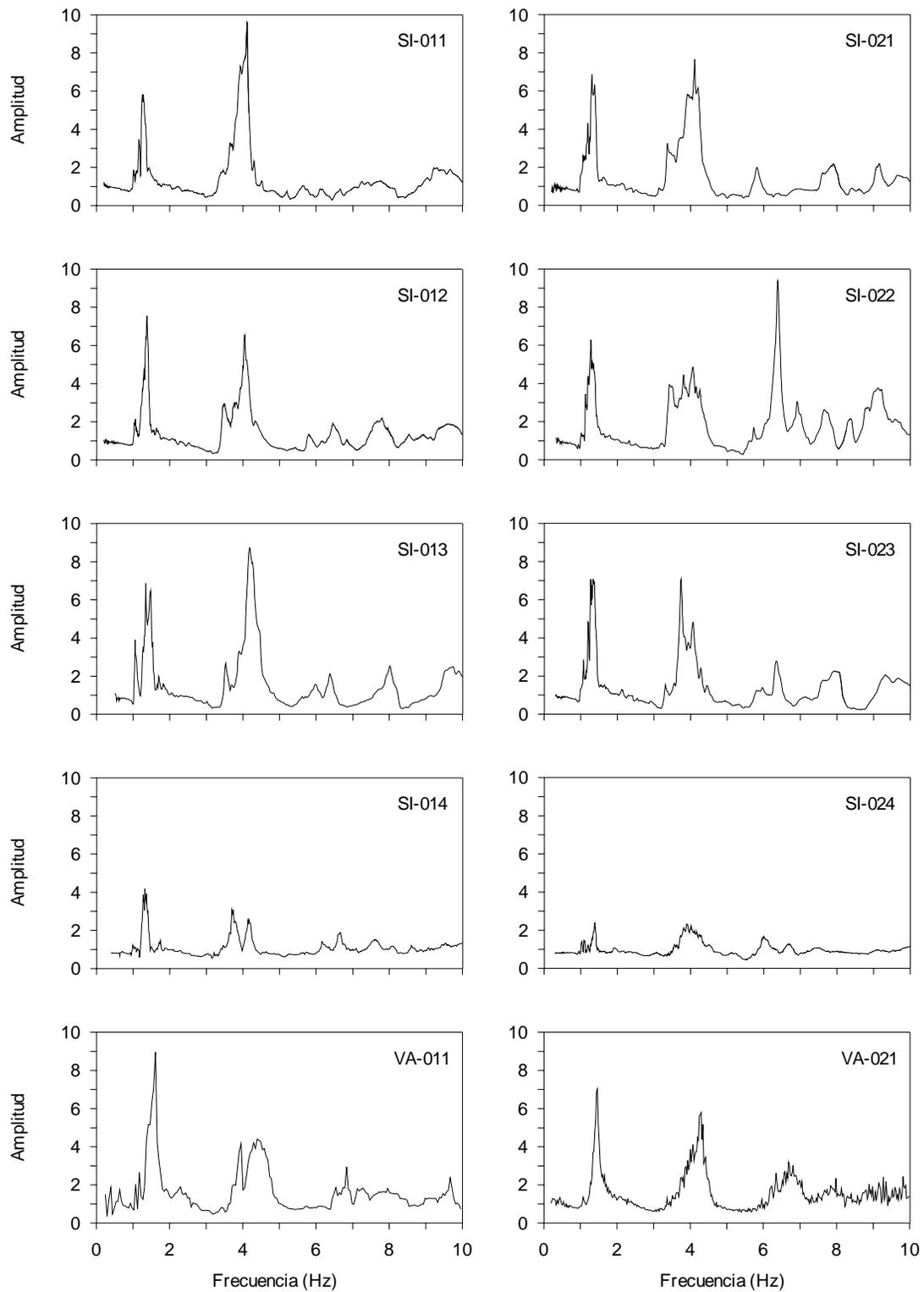
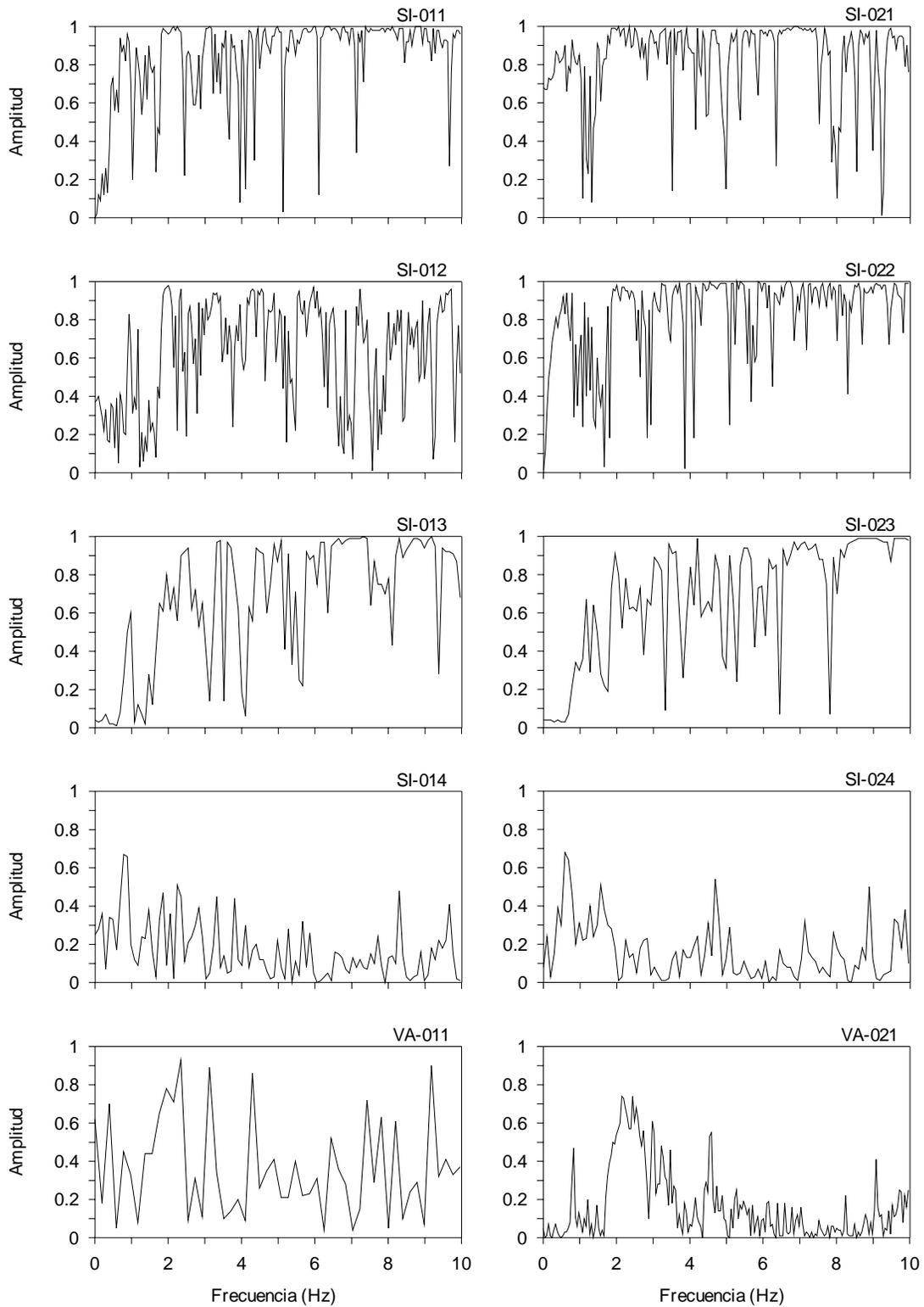
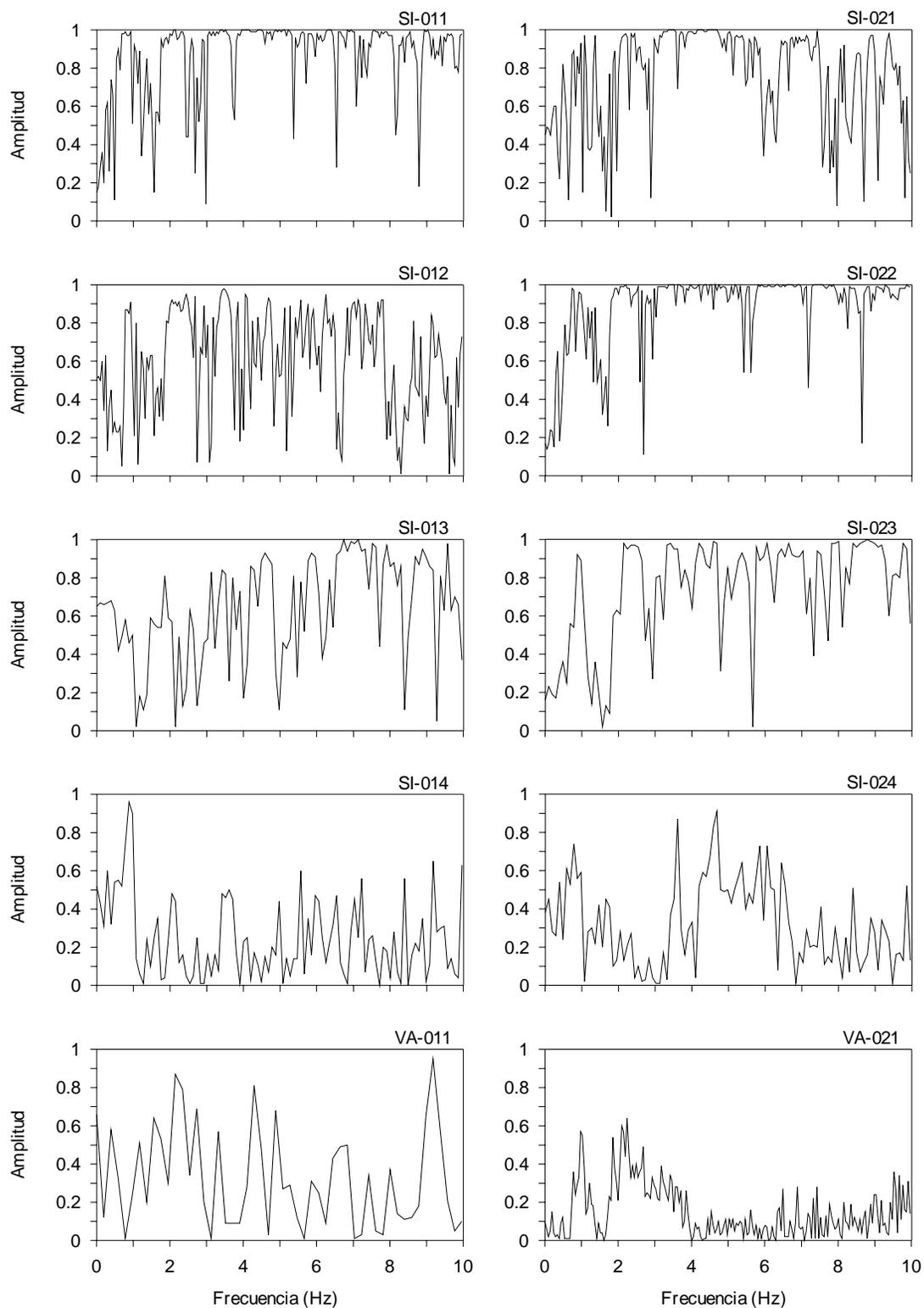


Fig 4.3 - Funciones de transferencia entre los puntos AZ-LAT y AZ-CEN, en dirección T (torsión)



**Fig 4.4 - Funciones de coherencia entre los puntos AZ-CEN y JN, en dirección T**



**Fig 4.5 - Funciones de coherencia entre los puntos AZ-CEN y JN, en dirección L**

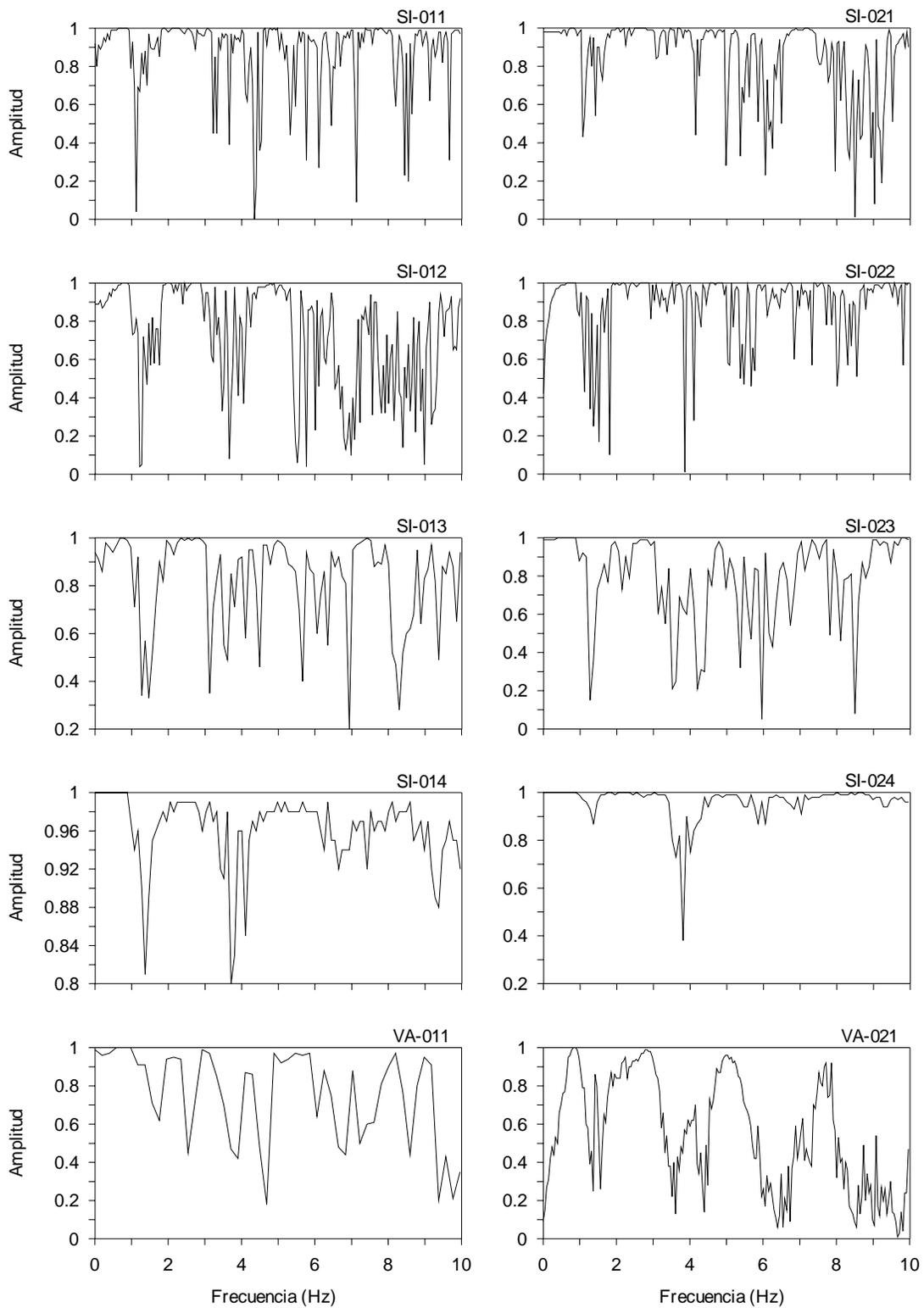
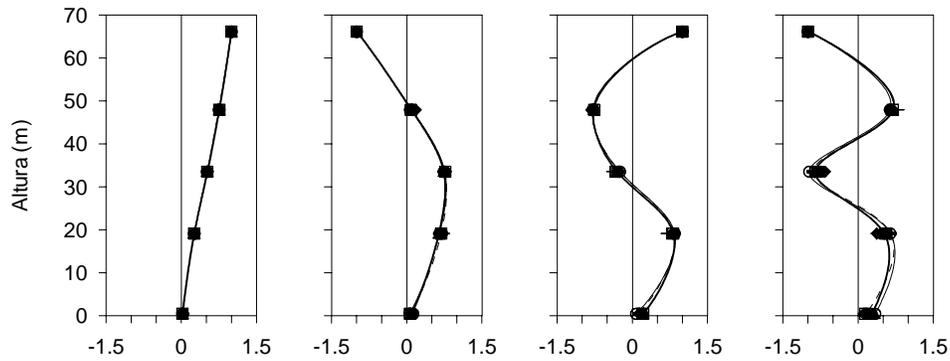
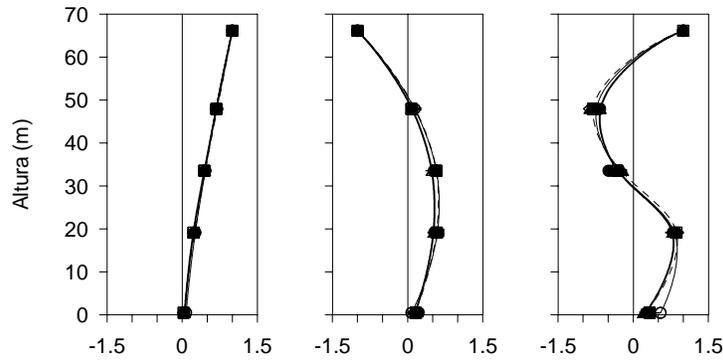


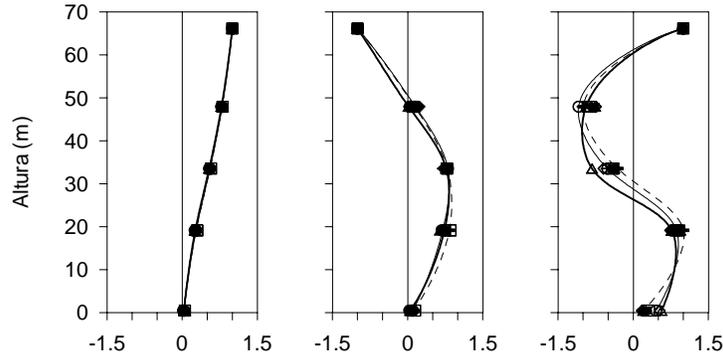
Fig 4.6 - Funciones de coherencia entre los puntos AZ-LAT y AZ-CEN, en dirección T (torsión)



**Fig 4.7 - Formas modales de traslación en T**



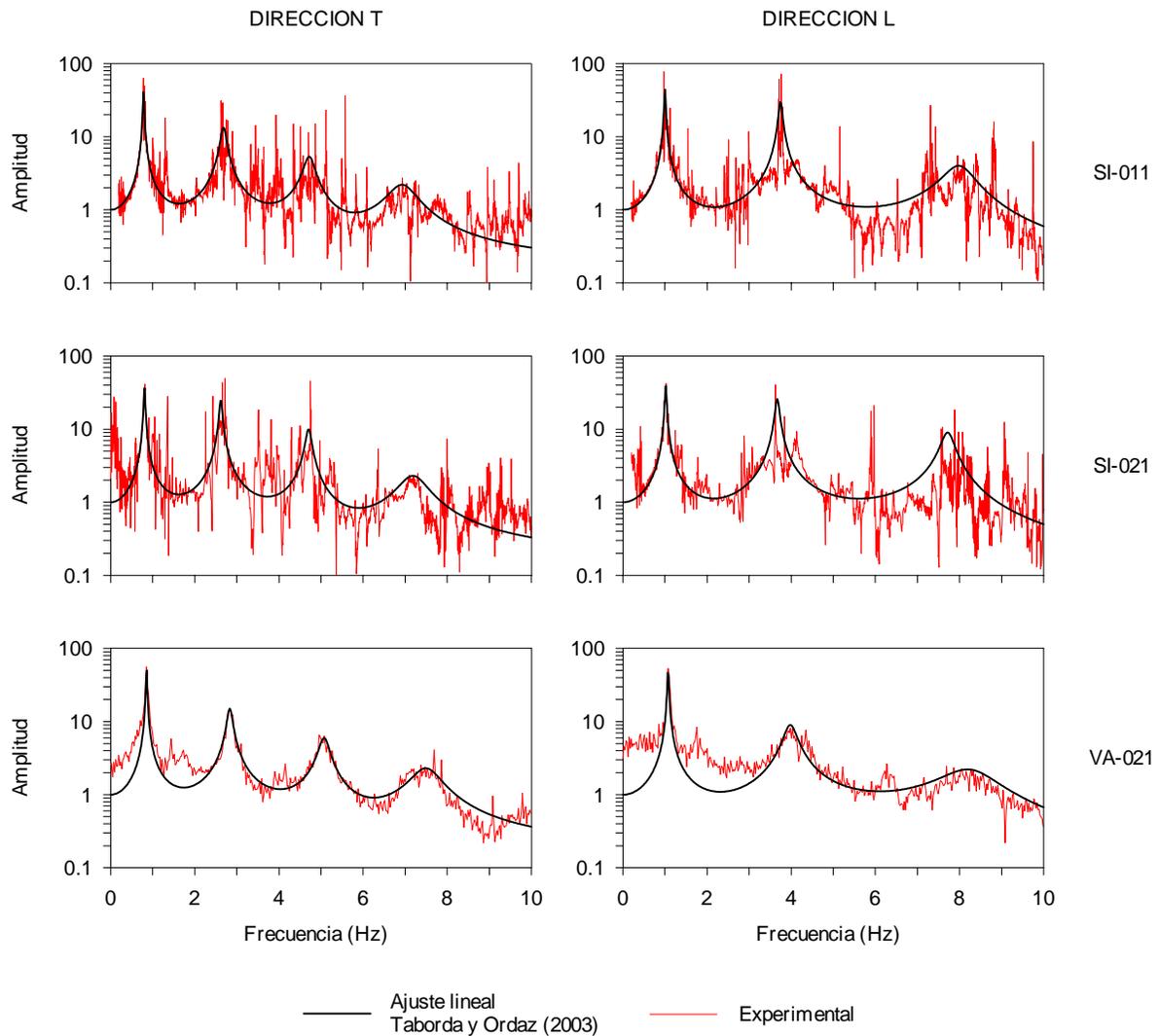
**Fig 4.8 - Formas modales de traslación en L**



**Fig 4.9 - Formas modales de torsión**

espectral. Para este procedimiento se seleccionaron los dos sismos con las mayores reducciones en frecuencia, es decir, los que alcanzaron los menores valores para los tres componentes de movimiento, que fueron los eventos SI-011 y SI-021.

Las señales de cada uno de ellos fueron analizadas para ventanas de 20 s con traslapes de 10 s entre ventana y ventana. El procesamiento consistió en calcular la transformada rápida de Fourier con análisis de 4096 puntos aplicando un suavizado de acuerdo con la expresión 3.12. En las figs 4.11 y 4.12 se presenta la evolución de

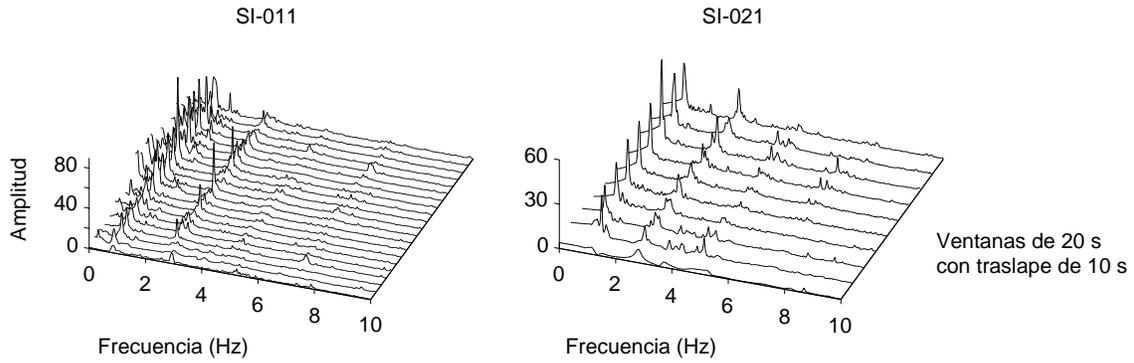


**Fig 4.10 - Ajuste de las funciones de transferencia calculadas a partir de las propiedades identificadas y los valores de amortiguamiento estimados para SI-011, SI-021 y VA021**

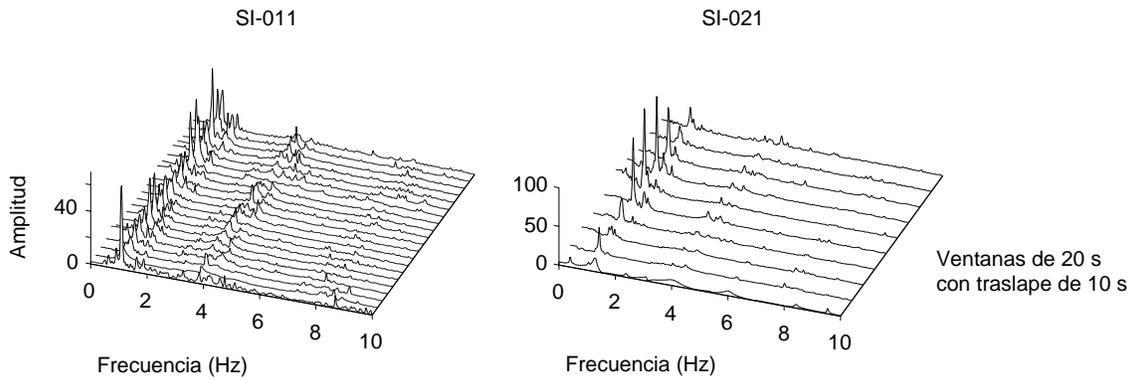
las funciones de transferencia entre los puntos AZ-CEN y JN para los componentes T y L, respectivamente, y en la fig 4.13 se enseñan las funciones de transferencia correspondientes al movimiento por torsión, es decir, los cocientes entre los puntos AZ-LAT y AZ-CEN.

Para cada ventana se identificaron las frecuencias de vibración del sistema, al igual que se hizo para el análisis de las señales completas. En el componente T fue posible identificar los cuatro primeros modos de vibrar, mientras que en la dirección L y en el componente de movimiento por torsión, únicamente se detectaron los tres primeros modos.

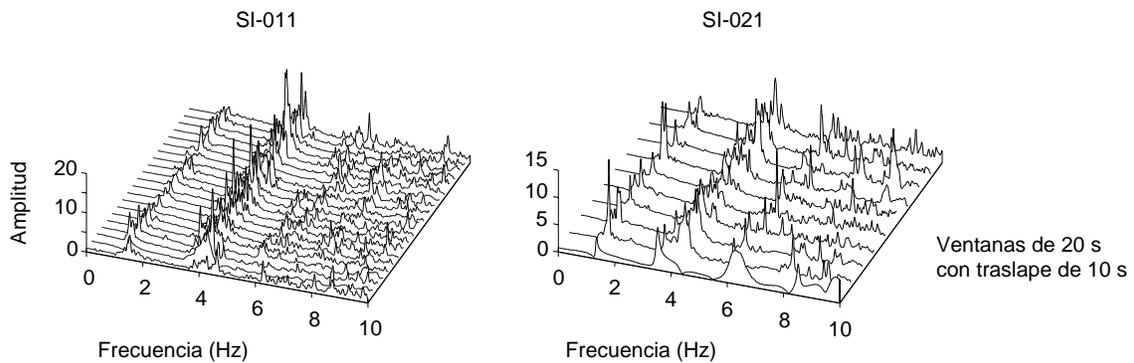
Por facilidad, y considerando que principalmente interesa comprender el comportamiento durante la fase intensa del movimiento, para el sismo SI-011 únicamente se identificaron las frecuencias de las primeras catorce ventanas. Por su parte, el evento SI-021 si fue analizado en su totalidad, con el objetivo de conocer el estado final del sistema una vez transcurrido el movimiento sísmico.



**Fig 4.11 - Funciones de transferencia entre los puntos AZ-CEN y JN en dirección T para los eventos SI-011 y SI-021**



**Fig 4.12 - Funciones de transferencia entre los puntos AZ-CEN y JN en dirección L para los eventos SI-021 y SI-021**



**Fig 4.13 - Funciones de transferencia entre los puntos AZ-LAT y AZ-CEN en dirección T (torsión) para los eventos SI-011 y SI-021**

**Tabla 4.3 - Frecuencias de vibración del sistema identificadas mediante el análisis espectral de las señales por ventanas para los eventos SI-011 y SI-021**

Evento	Modo	Frecuencias (Hz)											
		Dirección T				Dirección L				Torsión			
		$f_{\min}$	$f_{\max}$	$f_P$	$f_{DE}$	$f_{\min}$	$f_{\max}$	$f_P$	$f_{DE}$	$f_{\min}$	$f_{\max}$	$f_P$	$f_{DE}$
SI-011	1	0.732	0.854	0.781	0.035	0.977	1.099	1.015	0.033	1.270	1.538	1.343	0.062
	2	2.563	2.954	2.703	0.107	3.589	3.857	3.700	0.068	3.760	4.272	3.983	0.157
	3	4.541	5.249	4.814	0.195	7.495	8.691	8.017	0.322	5.830	6.540	6.229	0.177
	4	6.982	7.886	7.165	0.228								
SI-021	1	0.781	0.854	0.811	0.020	1.025	1.074	1.042	0.017	1.294	1.416	1.353	0.045
	2	2.588	2.783	2.672	0.077	3.638	4.028	3.768	0.121	3.833	4.199	4.065	0.093
	3	4.492	4.858	4.704	0.133	7.422	8.423	7.766	0.299	5.835	6.298	6.025	0.161
	4	6.738	7.300	7.039	0.182								

Los valores de cada ventana correspondientes a las figs 4.13 a 4.15 se encuentra en las tablas B.1 y B.2.

$f_P$ : Frecuencia promedio.

$f_{DE}$ : Desviación estándar de los valores de frecuencia.

Los valores de frecuencia identificados para cada evento se presentan en las figs 4.14 a 4.16, para los componentes T, L y R, respectivamente. Tales valores se muestran en detalle en el apéndice B, en las tablas B.1 y B.2, que por comodidad se presentan aquí de manera resumida en la tabla 4.3, en la cual se incluyen las frecuencias mínimas y máximas que se observaron a lo largo de la señal, así como el valor promedio y la desviación estándar de la muestra.

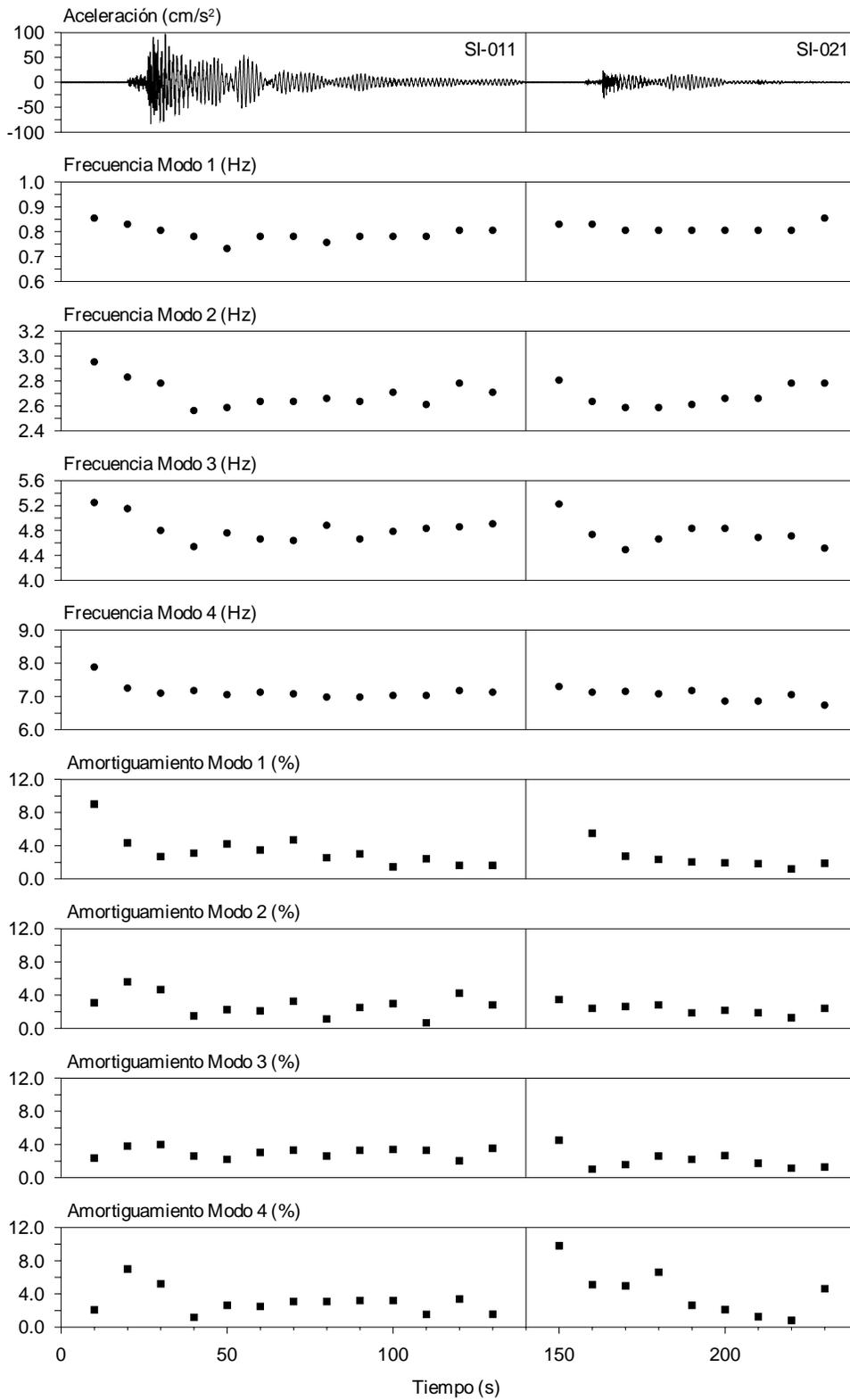
En la fig 4.14, que ilustra el comportamiento del sistema en el componente T, se observa que los valores de las frecuencias de los diferentes modos al inicio del evento SI-011 son del orden de aquellas correspondientes a la identificación por el análisis espectral de la primera vibración ambiental. Conforme el sismo avanza las frecuencias disminuyen hasta alcanzar sus valores mínimos en la ventana delimitada entre 40 y 60 s, pasada la cual las frecuencias asociadas con los tres primeros modos de vibración comienzan a mostrar una tendencia de recuperación, alcanzando en general un valor cercano al 90 % de la frecuencia original. Sólo la frecuencia asociada con el cuarto modo se estabiliza luego de los primeros 30 s sin recobrar sus valores iniciales.

Para la llegada del evento SI-021 las frecuencias se encuentran levemente por encima de los valores finales de la fase intensa del primero de los sismos. La frecuencia fundamental sufre leves variaciones y se encuentra aun más recuperada que al inicio, alcanzando un 90 % de la frecuencia identificada al inicio del sismo SI-011. En el segundo modo se mantiene la tendencia de alcanzar los valores más bajos en la fase más intensa del evento, mientras que el tercer modo, tras una primera recuperación pasados los 50 s iniciales, disminuye nuevamente, terminando en un 90 % del valor inicial. Por su parte, el cuarto modo parece mantenerse alrededor del valor final del primer evento, con una ligera tendencia a la baja.

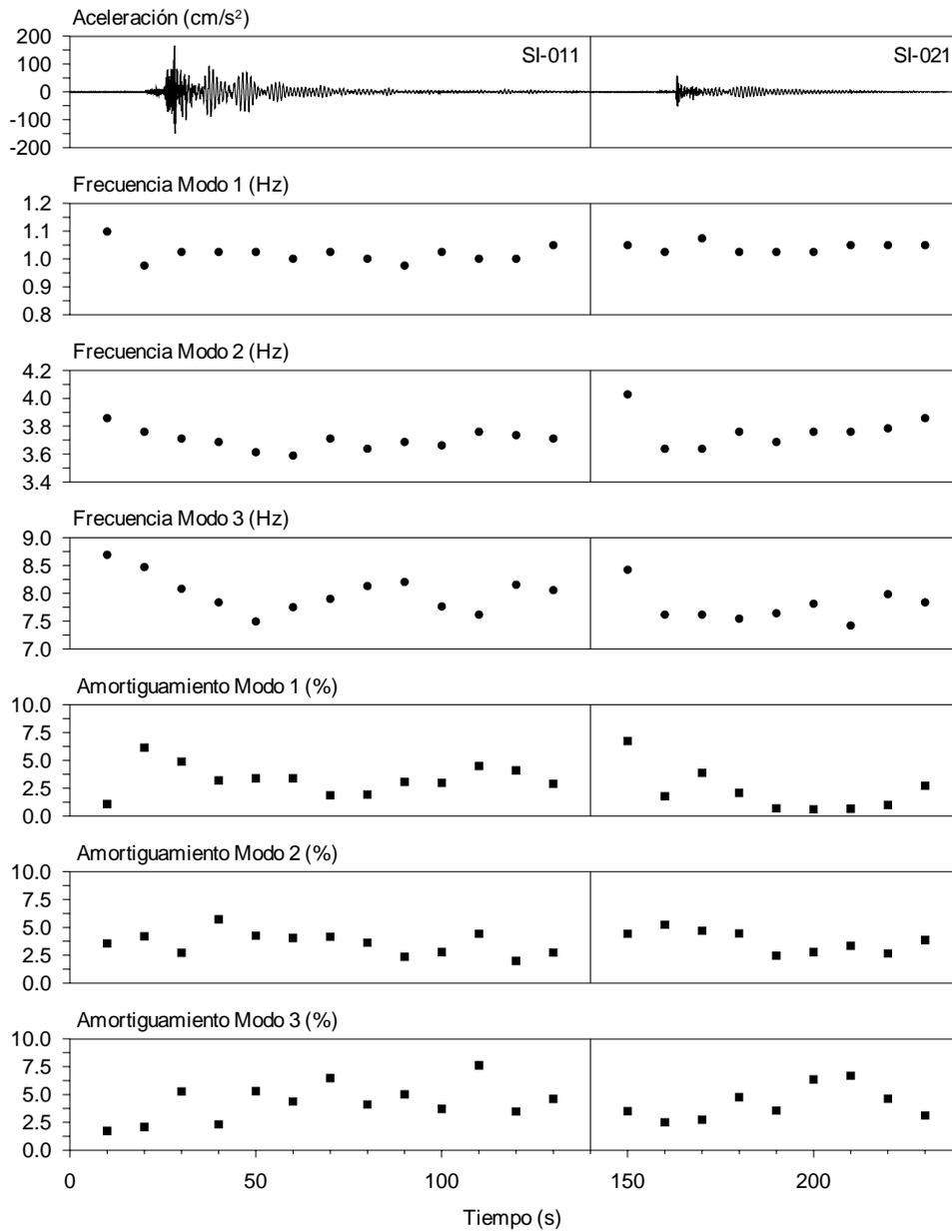
En lo que respecta al comportamiento de las frecuencias asociadas con los modos del componente L, en la fig 4.15 se puede observar que la frecuencia fundamental apenas presenta ligeras variaciones, alcanzando los valores mínimos en la segunda y octava ventana para el evento SI-011 y en los tramos dos y cuatro a seis, para el sismo SI-021. Para los segundos modos los valores mínimos se encontraron en el tramo comprendido entre 40 y 60 s en el primer evento, y en el delimitado entre 20 y 30 s en el segundo, observándose luego una tendencia a la recuperación, mientras que en el tercer modo, en el cual las mínimas frecuencias se encuentran alrededor de las mismas ventanas de análisis, no se puede decir lo mismo.

En cuanto a las frecuencias respectivas al movimiento por torsión (fig 4.16) para el modo fundamental se observa claramente, en ambos eventos, que los valores mínimos se encuentran asociados con las máximas amplitudes de la aceleración. Un patrón similar pudiera señalarse para el tercer modo de vibración, sin embargo, en lo que respecta al segundo modo, esto no es posible y más bien se observa que en algunos casos ocurren cambios abruptos que no se relacionan con la evolución de la señal.

En general, se puede indicar entonces que las frecuencias fundamentales en los tres componentes sufrieron pocas variaciones durante los eventos, alcanzando los valores mínimos en los momentos de mayor amplitud



**Fig 4.14 - Frecuencias y amortiguamientos identificados en el análisis espectral por ventanas en dirección T para los eventos SI-011 y SI-021**

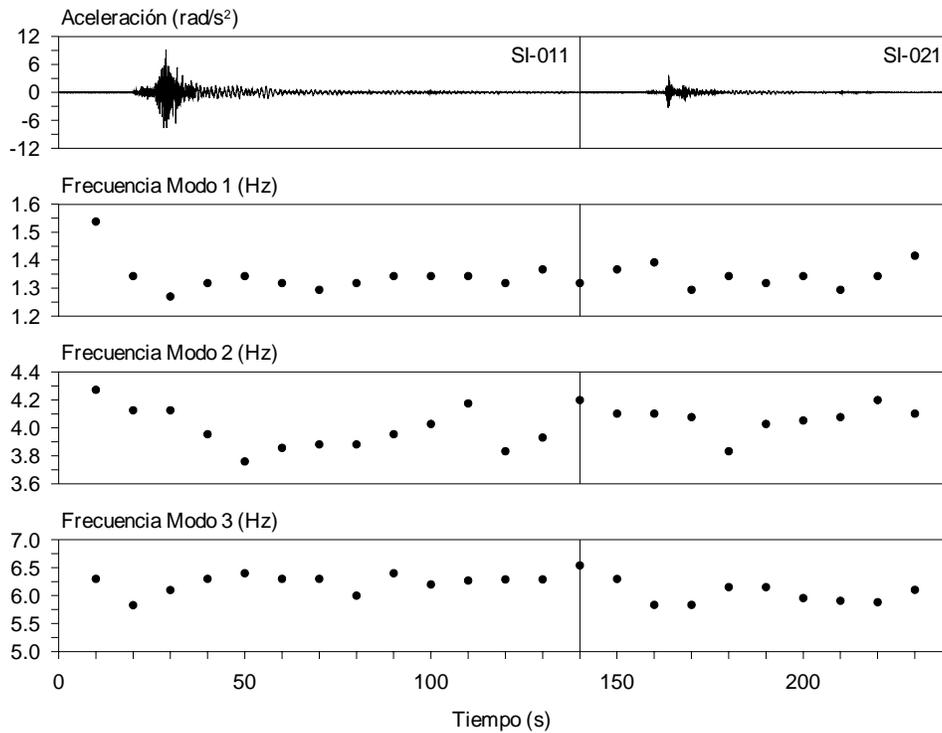


**Fig 4.15 - Frecuencias y amortiguamientos identificados en el análisis espectral por ventanas en dirección L para los eventos SI-011 y SI-021**

en la señal, y recuperando en todos los casos al menos un 90 % del valor inicial. Esto mismo puede deducirse del hecho de que para dichas frecuencias se observan los menores valores de desviación estándar (tabla 4.3).

Adicionalmente al proceso de identificación, de acuerdo con el planteamiento de ajuste lineal descrito en el apéndice D se estimaron los valores de porcentaje de amortiguamiento crítico asociados a cada una de las frecuencias identificadas en las diferentes ventanas de ambos eventos, en los componentes T y L.

Un resumen de estos valores de amortiguamiento se muestra en la tabla 4.4, y los correspondientes a cada una de las ventanas de análisis se discriminan en las tablas B.1 y B.2 para ambos eventos (SI-011 y SI-021,



**Fig 4.16 - Frecuencias identificadas en el análisis espectral por ventanas para el movimiento en torsión de los eventos SI-011 y SI-021**

respectivamente). Estos se enseñan en las figs 4.14 y 4.15 para las direcciones T y L, de forma tal que puede observarse de manera más clara su cambio en el tiempo conforme avanza el movimiento.

Al parecer, el método utilizado tiende a sobreestimar los amortiguamientos en las ventanas iniciales, tras las cuales, pudiera señalarse que en general hay una tendencia a que los valores de amortiguamiento se concentren entre 2 y 6 %, sin que se observe un patrón de comportamiento con las amplitudes de la señal.

Se observa que para el evento SI-011, en la mayoría de los casos, el valor estimado en el componente L fue mayor al determinado para el componente T, mientras que en el evento SI-021 ocurrió lo contrario. Por otra

**Tabla 4.4 - Amortiguamientos del sistema identificados en el análisis espectral por ventanas para los eventos SI-011 y SI-021**

Evento	Modo	Amortiguamientos (%)							
		Dirección T				Dirección L			
		$\xi_{min}$	$\xi_{max}$	$\xi_P$	$\xi_{DE}$	$\xi_{min}$	$\xi_{max}$	$\xi_P$	$\xi_{DE}$
SI-011	1	0.83	9.00	3.22	2.02	1.08	6.15	3.35	1.30
	2	0.65	5.60	2.67	1.47	1.98	5.73	3.63	1.01
	3	2.05	4.00	2.98	0.64	1.74	7.62	4.42	1.68
	4	1.17	7.00	3.04	1.52				
SI-021	1	1.22	5.50	2.40	1.23	0.61	6.74	2.25	1.90
	2	1.26	2.81	2.09	0.53	2.46	5.24	3.70	0.97
	3	1.04	2.66	1.84	0.63	2.52	10.50	4.84	2.45
	4	0.81	6.60	3.58	1.97				

Los valores de cada ventana correspondientes a las figs 4.13 y 4.14 se encuentra en las tablas B.1 y B.2.

$\xi_P$ : Amortiguamiento promedio.

$\xi_{DE}$ : Desviación estándar de los valores de amortiguamiento.

parte, en T se encuentra que los amortiguamientos de modos superiores fueron, en su mayoría, inferiores al amortiguamiento del modo fundamental. Cosa contraria sucede en L, donde el valor asociado con el modo fundamental es menor que el de los modos superiores. Eventualmente, este comportamiento pudiera asociarse con los grados de contribución de los modos identificados en la respuesta total, puesto que a mayor amortiguamiento se espera una menor contribución en la respuesta. Además, no está de sobra mencionar que aquí también pudieran estar interviniendo los efectos mencionados anteriormente respecto a la influencia de las ondas incidentes (Aviles *et al.*, 2002). Sin embargo, dado el alcance de este trabajo y ante las bajas amplitudes en algunos de los sismos que aquí se incluyen, estos aspectos se mencionan únicamente como campos de interés para futuras profundizaciones en el estudio del comportamiento del edificio.

### 4.3 MÉTODO DE CRUCES POR CERO

Haciendo uso de esta metodología se procedió a la estimación de las frecuencias fundamentales de los mismos eventos que fueron analizados mediante el procedimiento espectral por ventanas. En una primera parte se procesaron las señales originales de AZ-CEN en los componentes T y L, y la respuesta de torsión interpretada como la diferencia entre las señales en AZ-LAT y AZ-CEN en el componente T.

Al observar que los resultados obtenidos tenían un alto nivel de dispersión, fruto de la influencia de los modos superiores, se procedió a optimizar la información mediante la aplicación de procesos de filtrado paso-banda (ec 3.68). Los límites de filtrado  $f_{\min}$  y  $f_{\max}$  se fijaron de acuerdo a las variaciones observadas para cada uno de los dos eventos en el análisis espectral por ventanas. De esta manera, las señales del sistema en el componente T se filtraron entre 0.6 y 1.0 Hz, las del componente L entre 0.8 y 1.2 Hz y las de torsión entre 1.2 y 1.5 Hz.

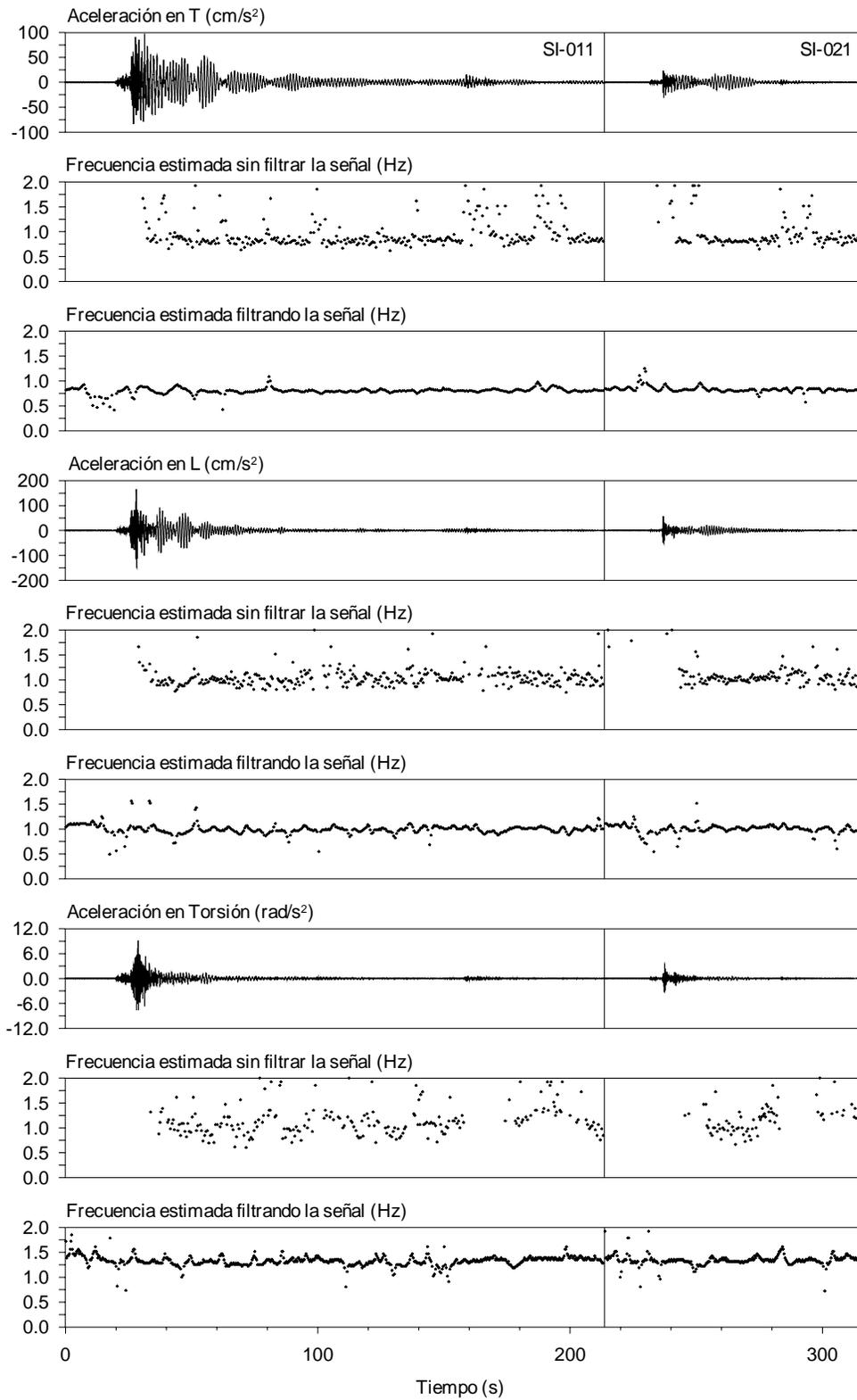
En la figura 4.17 se presentan los resultados obtenidos en los tres componentes de movimiento, tanto para las señales sin filtrar como para las filtradas. Es notoria la forma en que los resultados obtenidos a partir de este procedimiento dependen de manera importante del filtrado que sea aplicado a la señal. En especial en aquellos intervalos de tiempo en los que la respuesta del sistema se caracteriza por contener una importante participación de componentes de alta frecuencia, como los son los tramos iniciales de la señal.

En la tabla 4.5 se presenta un resumen de las frecuencias obtenidas en cada uno de los tres componentes. Resalta el hecho de que los valores mínimos y máximos de la muestra de frecuencias identificadas, se encuentran considerablemente distantes del valor medio. A pesar de ello puede decirse que el valor de la desviación estándar es bajo, lo que valida el resultado de la frecuencia promedio y nos indica que los valores extremos representan instantes en los que no es adecuado aplicar el método, por lo que se incurre en errores numéricos fruto de las limitaciones del procedimiento.

Si se desea optimizar la estimación, puede procederse seleccionando manualmente aquellos tramos en los que se observe una adecuada periodicidad de crestas y amplitudes, tal como se señala en Trifunac *et al.* (2001b). Sin embargo, se puede concluir que gracias a la facilidad de aplicación, este método se constituye con una manera rápida y útil de obtener una primera aproximación sobre la variación y el valor medio de la frecuencia del sistema, no solo para los componentes de traslación, sino incluso para el caso de la torsión.

**Tabla 4.5 - Frecuencia fundamental del sistema identificada mediante el método de cruces por cero para los eventos SI-011 y SI-021**

Evento	Frecuencias (Hz)											
	Dirección T				Dirección L				Torsión			
	$f_{\min}$	$f_{\max}$	$f_P$	$f_{DE}$	$f_{\min}$	$f_{\max}$	$f_P$	$f_{DE}$	$f_{\min}$	$f_{\max}$	$f_P$	$f_{DE}$
SI-011	0.416	1.087	0.804	0.067	0.495	1.562	0.998	0.100	0.735	1.852	1.329	0.103
SI-021	0.575	1.250	0.839	0.067	0.543	1.515	1.005	0.095	0.725	1.923	1.344	0.114



**Fig 4.17 - Frecuencias fundamentales en las componentes de traslación y torsión identificadas con el método de cruces por cero para los eventos SI-011 y SI-021**

#### 4.4 ANÁLISIS PARAMÉTRICO MODAL

Para complementar el trabajo de identificación realizado con los anteriores procedimientos y con el objetivo de corroborar algunas de las observaciones realizadas, se recurrió al trabajo realizado por Correa (2003), en el cual se analizaron los eventos SI-011 y SI-021 siguiendo el procedimiento paramétrico modal.

Por medio de este método se ajustó, en un análisis por ventanas de 10 s en el dominio del tiempo, la respuesta de un modelo con el que fue posible estimar para cada uno de los componentes de movimiento, las frecuencias modales y los porcentajes de amortiguamiento crítico, así como los errores relativos de cada una de las respuestas consideradas y el error total en el ajuste.

Como se mencionó anteriormente, trabajos previos sobre edificios en la ciudad de México han mostrado que el uso de modelos simplificados en los que se idealiza el problema tridimensional del sistema a través de un modelo en el que se utilizan como excitaciones las señales ortogonales del terreno, y como respuestas los registros relativos en la azotea, han mostrado buenos resultados, incluso en la identificación de las propiedades de modos superiores (Zapata, 2001 y Palacios, 2003).

Siendo así, para el presente trabajo se seleccionó el modelo 3D-SIST que se muestra en la fig 3.3 y cuyas señales de entrada y salida se pueden ver en la tabla 3.2. Los resultados obtenidos para la estimación de las frecuencias y porcentajes de amortiguamiento crítico se resumen en las tablas 4.6 y 4.7, respectivamente. Tanto los valores de frecuencia como los de amortiguamiento, además de los factores de participación de cada uno de los modos en el respectivo componente, los errores relativos observados para las respuestas del modelo, y el valor de error total en el ajuste del modelo, pueden observarse con detalle para cada una de las ventanas de análisis en las tablas B.3 a B.6. Todos estos resultados se presentan gráficamente en las figs 4.18 a 4.20 para los componentes T, L y torsión, respectivamente.

**Tabla 4.6 - Frecuencias de vibración estimadas con el modelo 3D-SIST para los eventos SI-011 y SI-021**

Evento	Modo	Frecuencias (Hz)											
		Dirección T				Dirección L				Torsión			
		$f_{min}$	$f_{max}$	$f_P$	$f_{DE}$	$f_{min}$	$f_{max}$	$f_P$	$f_{DE}$	$f_{min}$	$f_{max}$	$f_P$	$f_{DE}$
SI-011	1	0.785	0.878	0.802	0.025	0.986	1.113	1.016	0.033	1.284	1.525	1.337	0.059
	2	2.605	2.961	2.681	0.095	3.533	4.017	3.730	0.110	3.980	4.449	4.109	0.114
	3	4.733	5.013	4.817	0.081	7.619	8.589	8.047	0.288	6.260	7.053	6.638	0.291
	4	7.061	7.475	7.236	0.133	11.73	13.81	12.58	0.595	9.285	10.38	9.617	0.283
SI-021	1	0.795	0.839	0.816	0.015	1.015	1.088	1.042	0.025	1.313	1.486	1.370	0.048
	2	2.584	2.754	2.672	0.054	3.627	3.879	3.741	0.089	3.977	4.268	4.111	0.090
	3	4.624	4.984	4.801	0.122	7.584	8.655	8.059	0.405	6.311	6.986	6.611	0.257
	4	6.953	7.467	7.280	0.156	11.14	12.45	11.89	0.487	9.033	10.07	9.405	0.360

Los valores de cada ventana correspondientes a las figs 4.18 a 4.20 que aquí se resumen, se encuentran en las tablas B.3 a B.6.

**Tabla 4.7 - Amortiguamientos estimados con el modelo 3D-SIST para los eventos SI-011 y SI-021**

Evento	Modo	Amortiguamientos (%)											
		Dirección T				Dirección L				Torsión			
		$\xi_{min}$	$\xi_{max}$	$\xi_P$	$\xi_{DE}$	$\xi_{min}$	$\xi_{max}$	$\xi_P$	$\xi_{DE}$	$\xi_{min}$	$\xi_{max}$	$\xi_P$	$\xi_{DE}$
SI-011	1	0.12	2.53	1.54	0.61	0.58	2.91	1.50	0.74	0.96	2.79	1.60	0.65
	2	0.19	3.83	1.83	1.00	0.50	4.44	2.54	1.05	1.02	4.79	2.18	1.18
	3	0.00	3.44	2.29	0.99	0.00	7.84	5.23	2.02	0.00	8.00	4.65	2.71
	4	0.10	6.62	3.94	1.91	1.37	9.26	4.70	2.63	0.11	5.06	3.31	1.38
SI-021	1	0.39	2.87	1.29	0.74	0.54	1.78	1.26	0.39	0.10	6.14	2.13	1.88
	2	0.54	4.61	1.98	1.40	1.00	5.63	2.40	1.68	0.13	3.08	1.64	1.03
	3	0.97	4.00	1.71	1.24	1.00	7.47	3.89	2.44	1.00	8.59	3.54	2.31
	4	1.00	5.01	2.50	1.15	1.00	7.00	3.64	2.01	1.00	7.22	2.67	1.91

Los valores de cada ventana correspondientes a las figs 4.18 a 4.20 que aquí se resumen, se encuentran en las tablas B.3 a B.6.

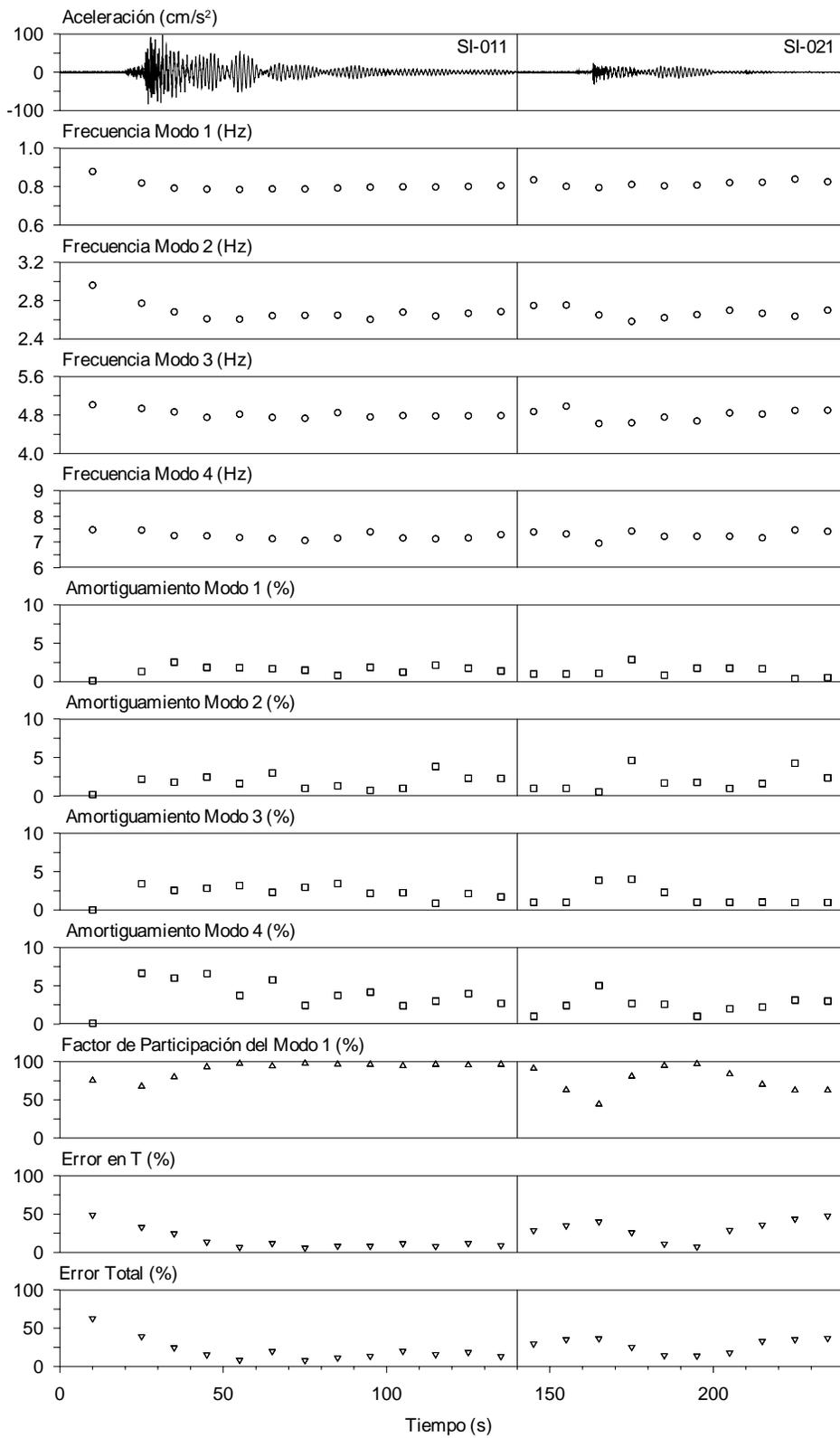


Fig 4.18 - Parámetros estimados con el modelo 3D-SIST en la componente T

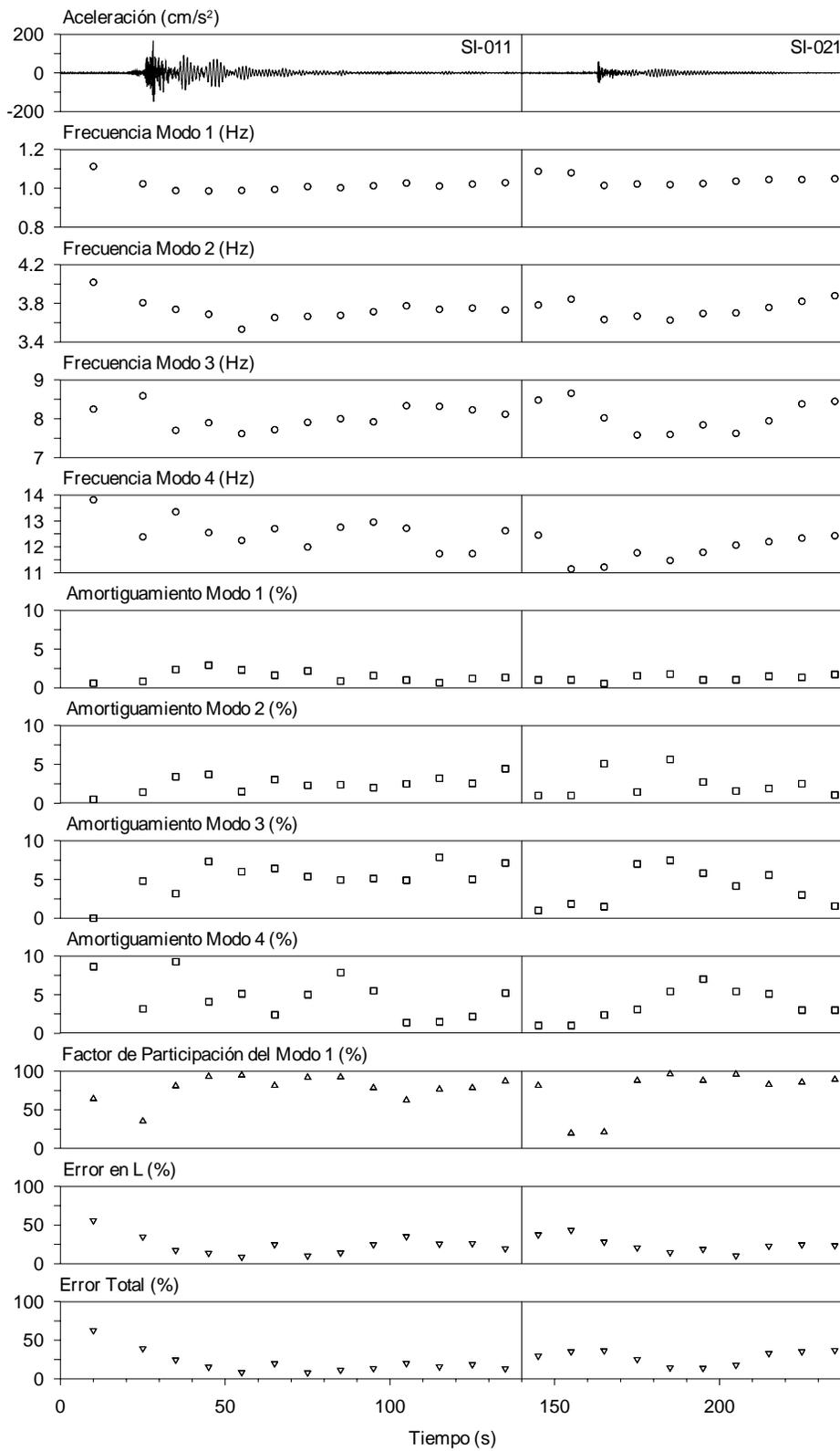
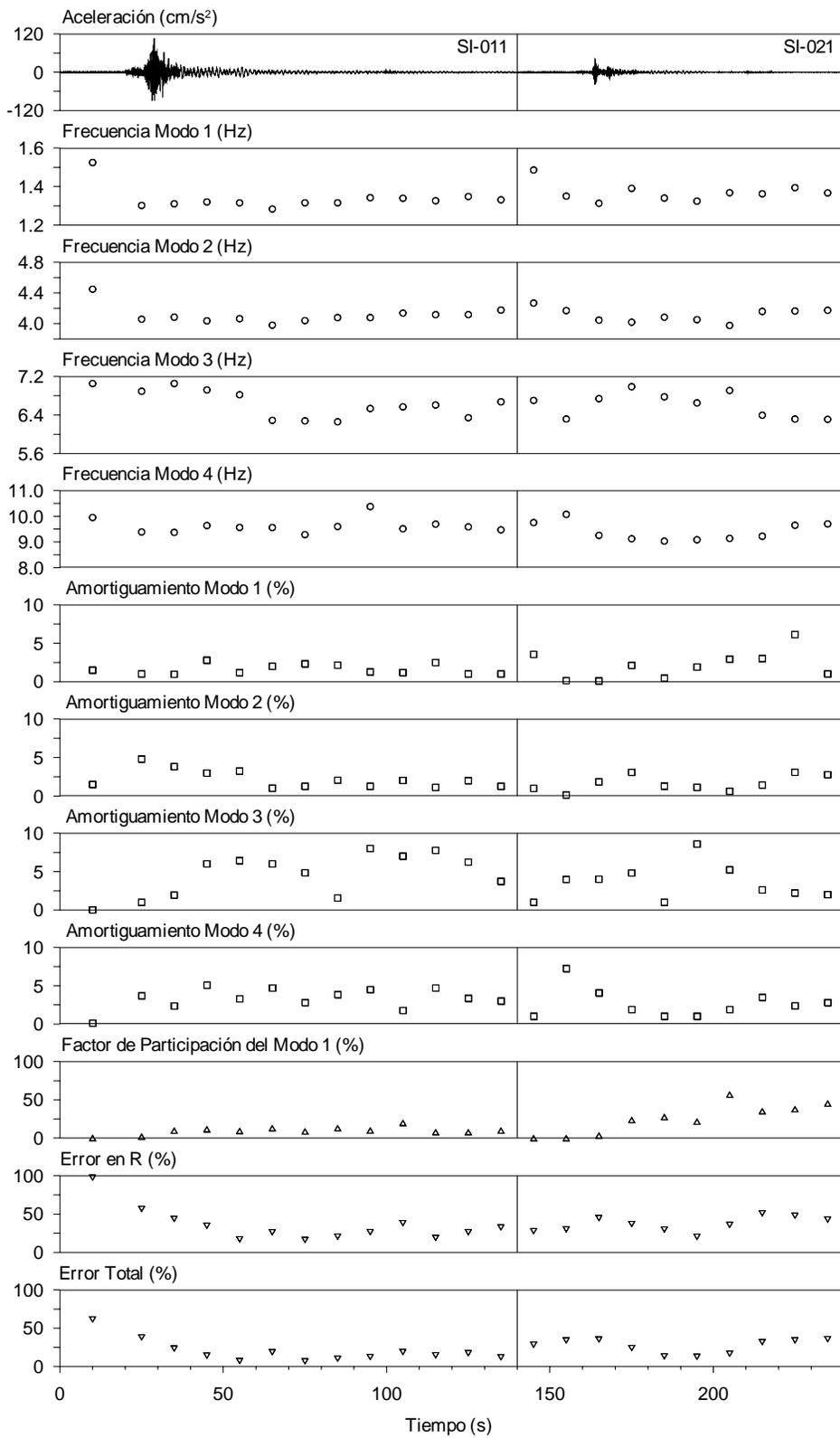


Fig 4.19 - Parámetros estimados con el modelo 3D-SIST en la componente L



**Fig 4.20 - Parámetros estimados con el modelo 3D-SIST en torsión**

En la fig 4.18 se puede observar como los valores de la frecuencia fundamental de T disminuyen conforme se entra en la fase intensa del evento SI-011 y que hacia el final del sismo hay una ligera tendencia a recuperar los valores iniciales, tal como se observó anteriormente en el análisis espectral por ventanas. Por su parte, en el segundo evento existe una menor variación y a medida que se avanza en el tiempo se observa más claramente la tendencia de recuperación. Si se compara la frecuencia en la primera ventana del evento SI-011 con la de la última ventana del evento SI-021 se detecta una reducción final de 6 %. Dado lo anterior y de acuerdo con el estrecho intervalo que definen los valores mínimos y máximos de ambos eventos, así como con el bajo valor que se obtiene para la desviación estándar (tabla 4.6), se puede concluir que las variaciones en la frecuencia fundamental son despreciables.

En el caso del componente L y de torsión (figs 4.19 y 4.20), puede verse de manera más pronunciada la tendencia de la frecuencia a disminuir en cuanto los eventos alcanzan sus mayores amplitudes en aceleración, que luego propenden por recuperarse en cuanto los sismos alcanzan a su etapa final. En estos casos, al comparar los valores de las frecuencias fundamentales en la ventana final del evento SI-021 con las identificadas en la primera ventana del evento SI-011, se encuentran reducciones finales de 6 y 13 % en L y R, respectivamente.

Al realizar similar comparación, pero en este caso con respecto a las frecuencias identificadas en el análisis espectral para la primera de las pruebas de vibración ambiental realizadas, se observa que la reducción al final del evento SI-021 es de 6, 7 y 3 % para T, L y R, respectivamente. Si por otra parte, se comparan los valores mínimos alcanzados en el evento SI-011 con los de la misma prueba de vibración ambiental, se obtiene que las reducciones máximas llegaron a ser de 11, 12 y 9 % para los mismos componentes.

Respecto a los modos superiores, se puede señalar que en ellos se observa una mayor variación que en el caso de la frecuencia fundamental. Fruto de ello son los mayores valores de la desviación estándar de las frecuencias, en especial en los modos tres y cuatro de los tres componentes.

Llama especialmente la atención las fuertes variaciones que sufren las frecuencias de los modos superiores en los componentes L y R durante los primeros 50 s del evento SI-011, y el grado de dispersión que se observa en la frecuencia del tercer modo en torsión y el cuarto en L, aspecto que puede verse también reflejado en la gran riqueza de crestas que se identificaron en el análisis espectral por ventanas (fig 4.13), lo cual inevitablemente se manifestó en una mayor dificultad a la hora de hacer la identificación con el programa MIMO.

En cuanto a los valores de porcentaje de amortiguamiento crítico (tablas 4.7, B.3 y B.5, y figs 4.18 a 4.20) se puede señalar que para los dos primeros modos de vibrar en los tres componentes, estos se encuentran entre 1 y 5 %, mientras para los modos tres y cuatro, estos logran alcanzar valores hasta de 9 %. Al igual que en el caso del análisis espectral resulta difícil sugerir algún patrón de comportamiento en el tiempo.

Por lo tanto, se puede señalar que en forma general, y conforme a los resultados promedio (tabla 4.7), se observa que para ambos eventos y en los tres componentes, los amortiguamientos de modos superiores son mayores que el amortiguamiento del modo fundamental. Es valioso también señalar que, para ambos eventos, los amortiguamientos de los modos superiores en el componente L son mayores que los del componente T, mientras que en lo que corresponde al modo fundamental, esta relación se da de manera inversa.

Adicionalmente, en las figs 4.18 a 4.20, se incluyen los factores de participación de los modos fundamentales, los cuales se encuentran pormenorizados en las tablas B.4 y B.6. Sobre ellos puede comentarse que son, en la mayoría de los casos, superiores a los valores de participación de sus correspondientes modos superiores, además de que guardan una relación inversa con los índices de error que se incluyen en las mismas figuras.

En estas puede verse que los menores valores en el factor de participación del modo fundamental se presentan en las primeras ventanas (entre 0 y 20 s) o durante la fase intensa de los eventos (entre 20 y 50 s), ocasionando que en estos intervalos se presenten los mayores índices de error en el ajuste. En el caso de las

dos primeras ventanas este comportamiento se debe a que, durante los primeros 20 s del registro, el sistema se encuentra en un estado de vibración ambiental, por lo cual el ajuste se dificulta debido a las bajas amplitudes de la señal, mientras que en el caso de los siguientes 30 s, se debe a la gran riqueza de frecuencias contenida en la fase intensa de los eventos, donde tienen una mayor participación los modos superiores, lo que redundo en una mayor dificultad en el proceso de identificación con el programa MIMO, a pesar de lo cual los valores de frecuencia identificados no dejan de ser coherentes.

En lo que resta de las señales, los errores son menores al 40 %, valor que como se mencionó en el capítulo anterior, ha mostrado llevar a resultados aceptables. Esto puede verse más claramente en el apéndice C, en el cual se ha incluido una comparación de las señales calculadas con respecto a las obtenidas experimentalmente para cada uno de los componentes de movimiento de ambos eventos (figs C.1 a C.6). En estas se incluyen dos ventanas características de las señales y los espectros de ambas respuestas. Se observa que el ajuste es satisfactorio.

#### 4.5 COMPARACIONES Y COMENTARIOS

En las tablas 4.8 a 4.10 se presenta un resumen de las frecuencias identificadas con cada uno de los procedimientos de identificación utilizados para los componentes de movimiento en T, L y torsión, respectivamente. Las tablas 4.11 y 4.12 resumen los valores de porcentaje de amortiguamiento crítico estimados con el planteamiento del factor de amplificación dinámica (AD), con el ajuste lineal de varios grados de libertad (Taborda y Ordaz, 2003) para la señal completa y por ventanas, además del procedimiento paramétrico modal. Para estos dos últimos se comparan los valores promedio y las desviaciones estándar.

**Tabla 4.8 - Comparación de las frecuencias estimadas promedio en la dirección T con cada una de las técnicas utilizadas para los eventos SI-011 y SI-021**

Evento	Modo	Frecuencias - Dirección T (Hz)			
		Espectral		Cruces por cero	Paramétrico Modal
		Señal Completa	Señal por Ventanas		
SI-011	1	0.784	0.781	0.804	0.802
	2	2.683	2.703		2.681
	3	4.723	4.814		4.817
	4	6.490	7.165		7.236
SI-021	1	0.806	0.811	0.839	0.816
	2	2.618	2.672		2.672
	3	4.706	4.704		4.801
	4	7.196	7.039		7.280

**Tabla 4.9 - Comparación de las frecuencias estimadas promedio en la dirección L con cada una de las técnicas utilizadas para los eventos SI-011 y SI-021**

Evento	Modo	Frecuencias - Dirección L (Hz)			
		Espectral		Cruces por cero	Paramétrico Modal
		Señal Completa	Señal por Ventanas		
SI-011	1	0.999	1.015	0.998	1.016
	2	3.745	3.700		3.730
	3	8.003	8.017		8.047
SI-021	1	1.019	1.042	1.005	1.042
	2	3.668	3.768		3.741
	3	7.721	7.766		8.059

En las figs 4.21 a 4.23 se comparan los resultados obtenidos para frecuencias y amortiguamientos críticos, estimados con los diferentes métodos utilizados. En éstas se presentan en círculos y cuadros rellenos los valores de frecuencia identificados en el análisis espectral y amortiguamientos estimados con el ajuste lineal por ventanas. En líneas discontinuas se enseñan estas mismas propiedades pero para el caso del análisis espectral para las señales completas. Los círculos y cuadros vacíos corresponden a los resultados del análisis paramétrico modal, mientras que para la frecuencia fundamental la dispersión de puntos es la identificada con el método de cruces por cero, y en el recuadro del amortiguamiento del primer modo se presenta en línea continua el valor estimado con el método de amplificación dinámica.

**Tabla 4.10 - Comparación de las frecuencias estimadas promedio en torsión con cada una de las técnicas utilizadas para los eventos SI-011 y SI-021**

Evento	Modo	Frecuencias - Torsión (Hz)			
		Espectral		Cruces por cero	Paramétrico Modal
		Señal Completa	Señal por Ventanas		
SI-011	1	1.297	1.343	1.329	1.337
	2	4.023	3.983		4.109
	3	6.394	6.229		6.638
SI-021	1	1.349	1.353	1.344	1.370
	2	4.096	4.065		4.111
	3	5.829	6.025		6.611

**Tabla 4.11 - Comparación de los amortiguamientos estimados en la dirección T con cada una de las técnicas utilizadas para los eventos SI-011 y SI-021**

Evento	Modo	Amortiguamientos - Dirección T (%)						
		AD Señal Completa $\xi$	Espectral				Paramétrico Modal $\xi_P$ $\xi_{DE}$	
			Ajuste Lineal					
			Señal Completa $\xi$	Señal por Ventanas $\xi_P$ $\xi_{DE}$				
SI-011	1	1.33	1.66	3.22	2.02	1.54	0.61	
	2		2.44	2.67	1.47	1.83	1.00	
	3		2.66	2.98	0.64	2.29	0.99	
	4		4.75	3.04	1.52	3.94	1.91	
SI-021	1	1.38	1.83	2.40	1.23	1.29	0.74	
	2		1.31	2.09	0.53	1.98	1.40	
	3		1.43	1.84	0.63	1.71	1.24	
	4		4.56	3.58	1.97	2.50	1.15	

AD: Amplificación dinámica.

**Tabla 4.12 - Comparación de los amortiguamientos estimados en la dirección L con cada una de las técnicas utilizadas para los eventos SI-011 y SI-021**

Evento	Modo	Amortiguamientos - Dirección L (%)						
		AD Señal Completa $\xi$	Espectral				Paramétrico Modal $\xi_P$ $\xi_{DE}$	
			Ajuste Lineal					
			Señal Completa $\xi$	Señal por Ventanas $\xi_P$ $\xi_{DE}$				
SI-011	1	2.31	1.55	3.35	1.30	1.50	0.74	
	2		1.12	3.63	1.01	2.54	1.05	
	3		4.40	4.42	1.68	5.23	2.02	
SI-021	1	1.49	1.79	2.25	1.90	1.26	0.39	
	2		1.30	3.70	0.97	2.40	1.68	
	3		1.95	4.84	2.45	3.89	2.44	

AD: Amplificación dinámica.

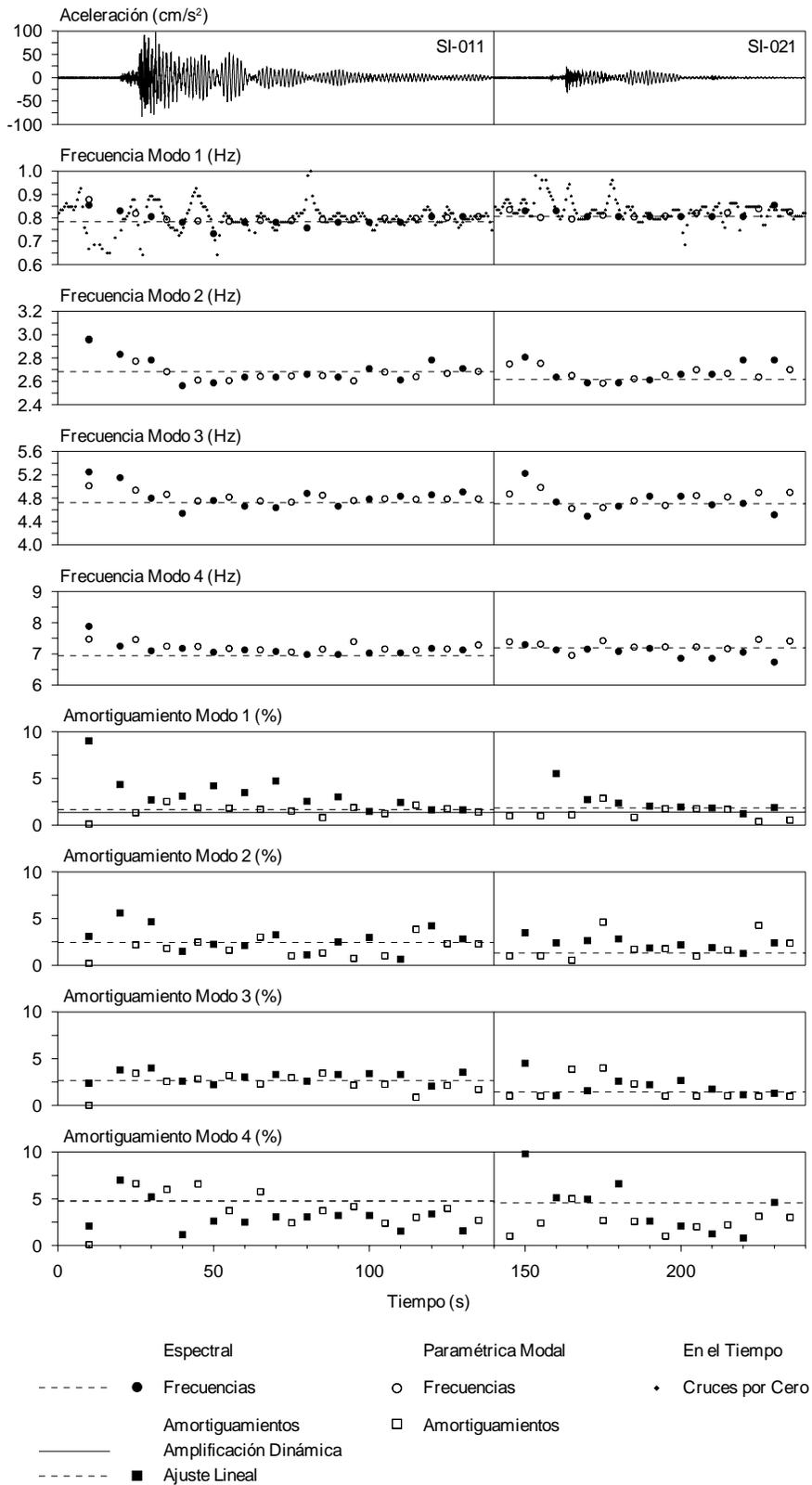
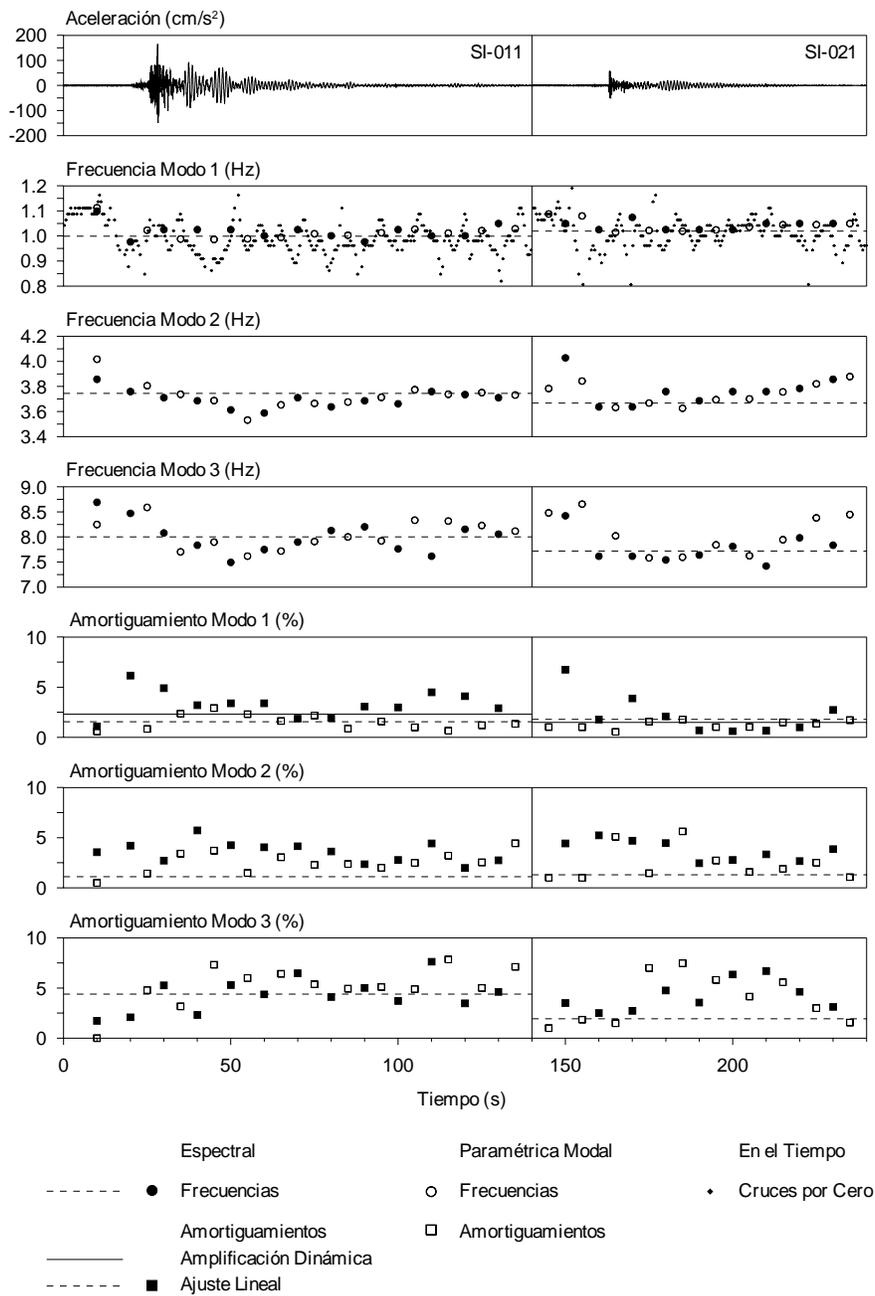


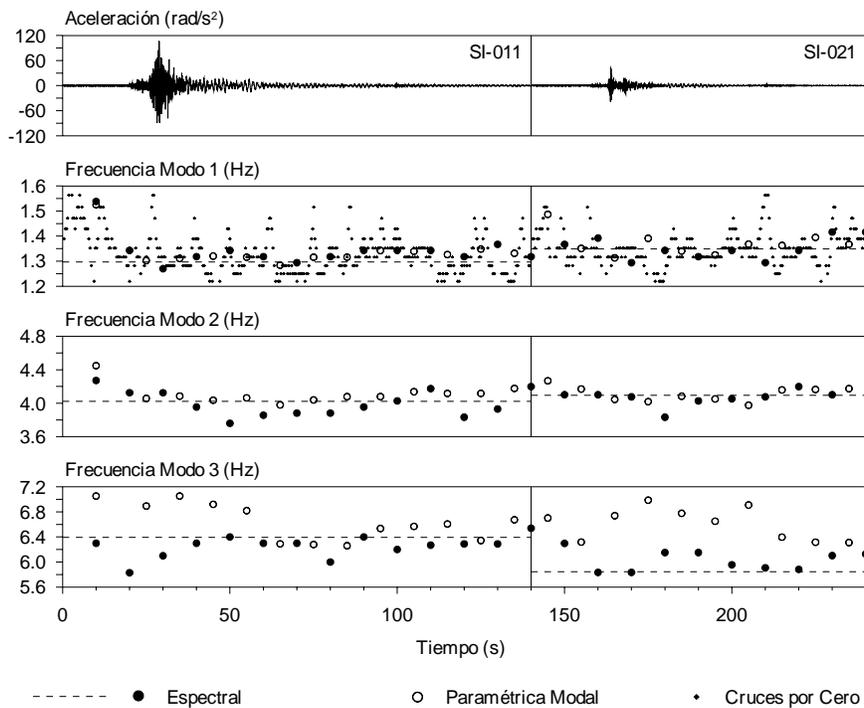
Fig 4.21 - Comparación de los parámetros en la dirección T con las diferentes técnicas utilizadas



**Fig 4.22 - Comparación de los parámetros en la dirección L con las diferentes técnicas utilizadas**

En general puede comentarse que los valores de frecuencia obtenidos por los cuatro métodos utilizados guardan una buena relación entre sí, tanto al comparar los valores promedio (tablas 4.8 a 4.10), como al comparar su evolución en el tiempo. De hecho, en lo que se refiere a los valores promedio, en algunos casos se llega a estimar prácticamente la misma frecuencia, incluso en modos superiores. Se puede resaltar que en ningún caso la diferencia entre uno y otro método, sin importar cual sea el valor de referencia, excede de 4 %.

Se observa que, a excepción del tercer modo en torsión, el método paramétrico modal y el análisis espectral por ventanas llevan a valores similares de frecuencia, permitiendo identificar adecuadamente su variación en



**Fig 4.23 - Comparación de los parámetros en torsión con las diferentes técnicas utilizadas**

el tiempo. Una vez superada la fase intensa de los eventos, los valores estimados por ambos métodos se concentran alrededor de las frecuencias identificadas en el análisis espectral de señales completas. Las diferencias señaladas en la estimación del tercer modo de torsión pueden relacionarse con la dispersión de crestas que se observó anteriormente en el análisis espectral por ventanas y sobre el cual se comentó en el análisis para métrico modal.

En cuanto a la variación misma de la frecuencia en el tiempo, tal como ya se discutió en el análisis espectral por ventanas y en el paramétrico modal, este parece obedecer a efectos no lineales que pueden estar asociados a reajustes en la estructura y a los efectos de interacción.

Respecto al método de cruces por cero para la estimación de las frecuencias fundamentales, se observa que esta opción constituye una interesante alternativa, que si bien muestra un alto grado de dispersión en los resultados, puede ser bastante útil como una primera aproximación en el estudio del cambio de la frecuencia durante los eventos, siempre que se tenga un conocimiento previo de las propiedades, de tal forma que se puedan fijar adecuadamente los límites de filtrado. Adicionalmente, si se desea mejorar la estimación por este procedimiento, es recomendable hacer una selección manual como lo señala Trifunac *et al.* (2001b).

Para finalizar la comparación de los métodos utilizados en lo que corresponde a la estimación de la frecuencia del sistema, es conveniente señalar que el uso de cualquiera de ellos es aceptable siempre que se tengan presentes las limitaciones de cada uno, toda vez que un descuido al respecto puede conducir a errores importantes (Zapata *et al.*, 1999). Los métodos espectrales dependen tanto de la calidad de la señal como de la resolución con que esta sea procesada y los factores de suavizado que son utilizados. El método de cruces por cero depende igualmente de la calidad de la señal y del uso adecuado de filtrados. Mientras que en un análisis paramétrico modal como el utilizado, depende de una adecuada selección del tamaño de las ventanas.

Ahora bien, para el caso de los amortiguamientos (tablas 4.11 y 4.12) las discrepancias entre uno y otro procedimiento son más notables que en el caso de la frecuencia, alcanzando en algunos casos diferencias

hasta de un 100 %. Tanto para el ajuste lineal por ventanas como para el análisis paramétrico modal, puede notarse que los valores de la desviación estándar son altos. Estas variaciones bien pueden deberse, en primer lugar, a la calidad de las señales y las bajas amplitudes en algunas de ellas, o bien, en una segunda instancia, a la inestabilidad de esta propiedad en los procesos de identificación (Li y Mau, 1997) o a la posible influencia de efectos como los que se mencionaron anteriormente sobre el paso de ondas inhomogéneas (Avilés *et al.*, 2002).

Dado lo anterior y de acuerdo con los alcances de este estudio, conviene entonces que las comparaciones se establezcan en términos de cómo evolucionan los valores en el tiempo (figs 4.21 y 4.22).

Se observa que en general los valores estimados para ambos componentes (T y L), bien sean con el método paramétrico modal o con el ajuste lineal (Taborda y Ordaz, 2003), oscilan principalmente entre 1 y 6 %, concentrándose alrededor de los valores estimados con este último método para el análisis de la señal completa o, en el caso de los modos fundamentales, con el planteamiento de amplificación dinámica.

En el caso del modo fundamental del componente T en ambos eventos, del cuarto modo del evento SI-021 en el mismo componente y del primer modo de los dos sismos en L, se observa que el ajuste lineal tiende a sobreestimar el valor del amortiguamiento en las primeras ventanas. Este resultado se relaciona con la dependencia de esta propuesta con el proceso espectral de la señal, el cual puede presentar limitaciones numéricas por las bajas amplitudes que se registran en las primeras ventanas.

A pesar de que es sabido que, en comparación con los procedimientos basados en análisis espectrales, los métodos paramétricos conducen a resultados que se ajustan de mejor manera al comportamiento real de un sistema, se encontró que el ajuste lineal propuesto conduce a resultados bastante coherentes con los obtenidos en el análisis paramétrico modal, a excepción hecha de las ventanas iniciales, es decir, de los tramos con muy bajas amplitudes (vibración ambiental), en los cuales tiende a sobrestimar el valor del amortiguamiento, contando además con el aliciente de que es un procedimiento sencillo que requiere de un menor tiempo de cálculo.

Finalmente, en lo que se refiere a la variación de los amortiguamientos a lo largo de los eventos, los resultados obtenidos no permiten comentar sobre la existencia de un patrón de comportamiento con respecto a las amplitudes en aceleración tal como si se comentó en el caso de la frecuencia. A pesar de ello debe señalarse que para futuros eventos de mayor intensidad ha de esperarse que los máximos valores se presenten en las fases intensas (Zapata, 2001).

## CAPÍTULO 5

### ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Dado que el edificio SIS se encuentra en una zona de suelo blando, es importante conocer las características del comportamiento de interacción entre el suelo y la estructura para poder estimar la influencia de éstas en la respuesta dinámica del edificio. Para ello, en esta sección se estiman las propiedades dinámicas de los efectos ISE mediante el uso de las técnicas de identificación y los procedimientos analíticos que se expusieron en el tercer capítulo.

En una primera parte se abarca el estudio de dichos efectos mediante la identificación y el análisis de las frecuencias características de los componentes de movimiento del sistema, es decir, de las frecuencias de la estructura con base empotrada, las del movimiento debido al cabeceo de la base y las de traslación y torsión de la misma. Luego, se procede a la estimación de las rigideces de los subsistemas representativos de dichos movimientos a partir de los resultados experimentales y por medio de métodos normativos y analíticos.

Para ambos casos, frecuencias y rigideces, en el análisis de señales completas se toman en cuenta todos los eventos seleccionados, mientras que en los procesos por ventanas, se recurre únicamente a tres de estos sismos, para los cuales se realizan análisis y comparaciones entre los resultados obtenidos por cada uno de los diferentes procedimientos utilizados, de tal manera que, al final de cada una de las dos partes, se incluyen comentarios sobre las diferencias y semejanzas encontradas, y sobre la influencia misma de los efectos ISE en la respuesta total de la estructura.

#### 5.1 ESTIMACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE ESTRUCTURA, TRASLACIÓN, TORSIÓN Y CABECEO

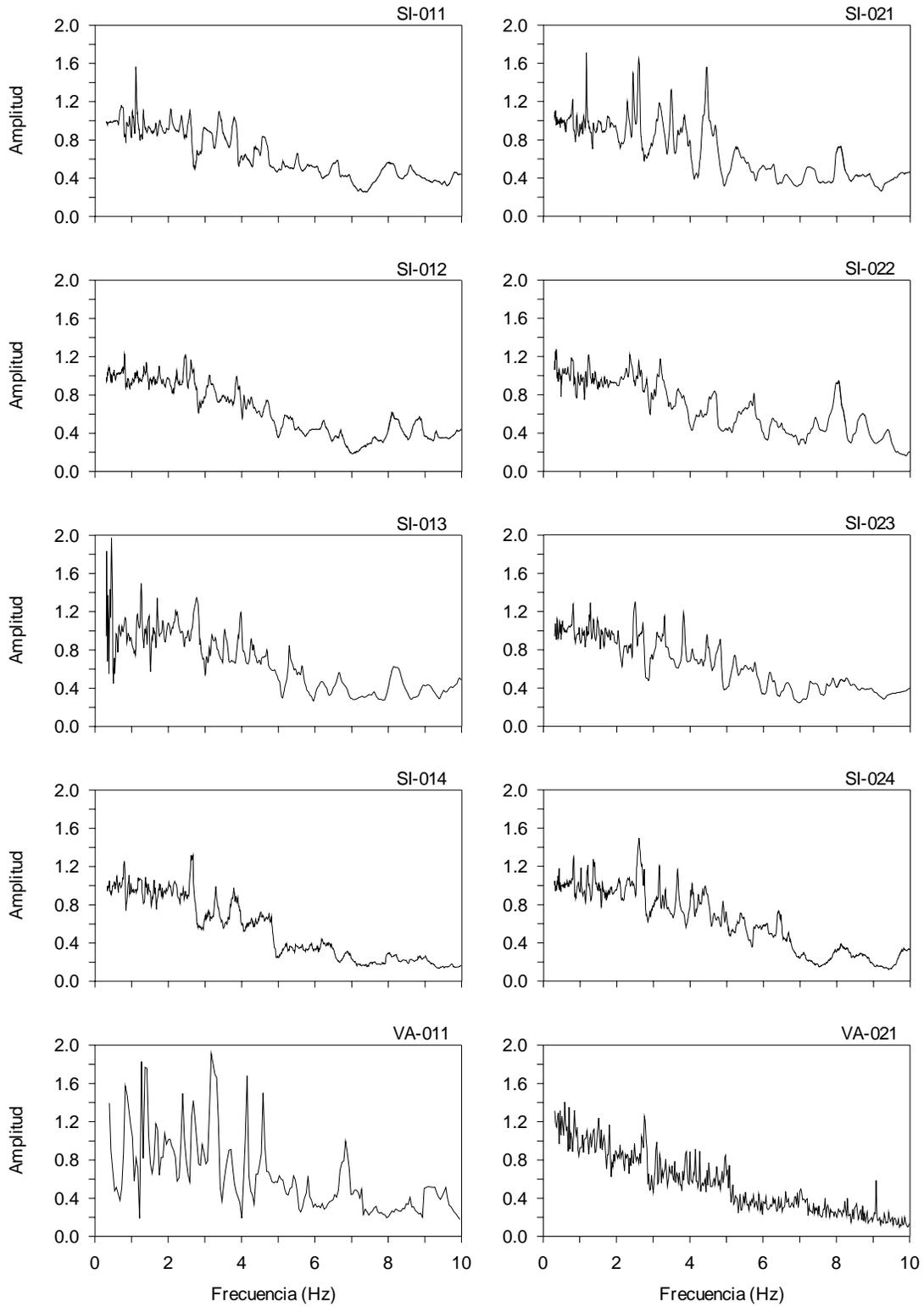
##### 5.1.1 Análisis espectral de señales completas

Un primer paso que conviene seguir para estimar aproximadamente la presencia de los efectos ISE consiste en calcular los cocientes espectrales para las tres componentes ortogonales de movimiento entre los registros obtenidos en el sótano del edificio (SO-CEN) y los capturados en la estación de campo (JN). Estos cocientes, conocidas también como funciones de transferencia de piso, permiten observar el movimiento efectivo de la base de la cimentación con respecto al ocurrido en el terreno.

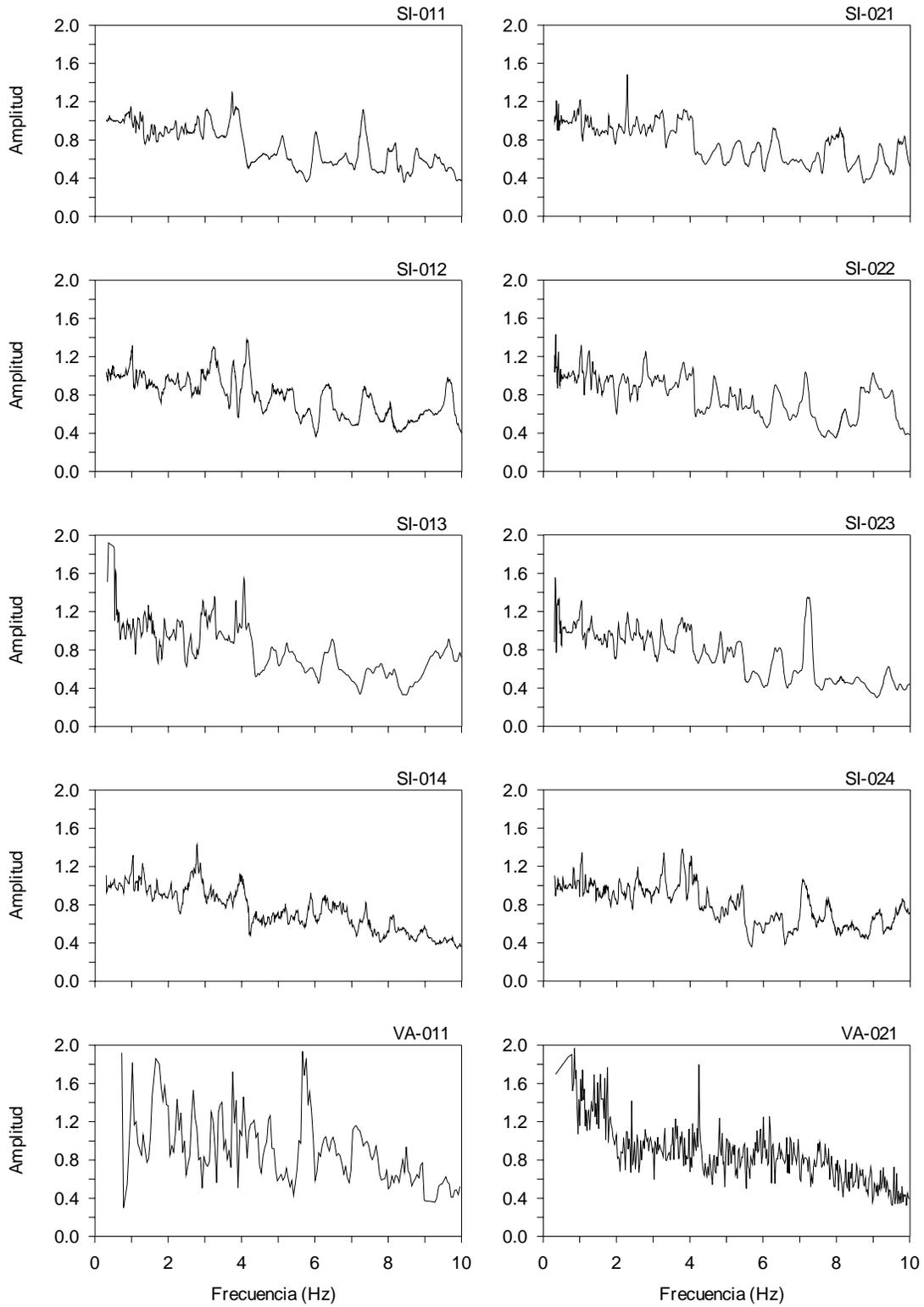
Anteriormente en las figs 2.16 a 2.18 se mostraron los espectros de amplitudes de Fourier de los movimientos en los puntos SO-CEN y JN. Ahora, en las figs 5.1 a 5.3 se incluyen las funciones de transferencia definidas por los cocientes SO-CEN/JN en cada uno de los componentes T, L y V, respectivamente. Acerca de estas es importante resaltar algunas observaciones.

Nótese como en general las funciones oscilan alrededor de uno entre 0 y 3 Hz, mientras que pasado este último valor, los cocientes oscilan más bruscamente y posteriormente reflejan un abatimiento significativo en sus amplitudes.

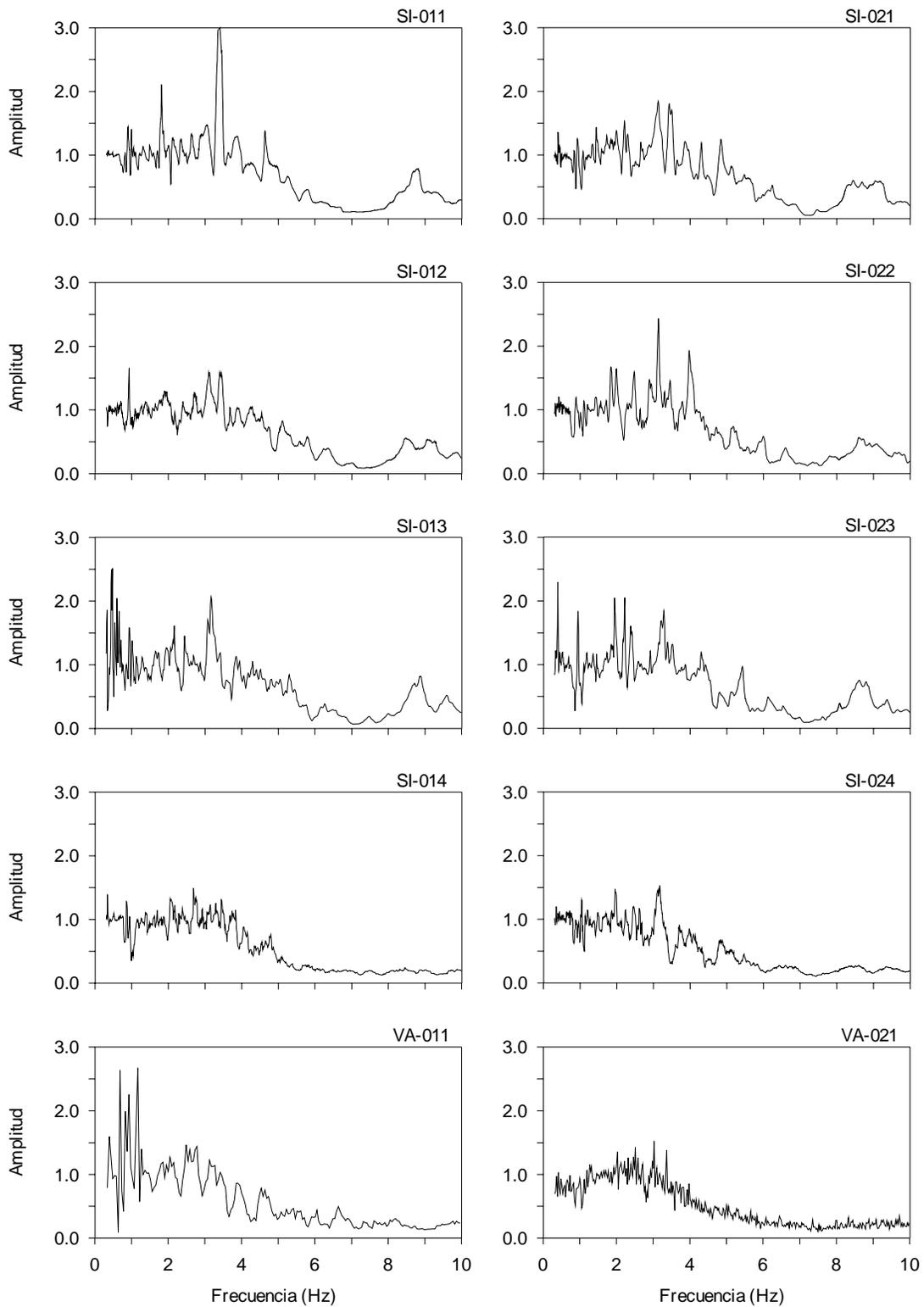
Este comportamiento es típico de la influencia de la interacción cinemática entre el suelo y la estructura. La manera en que mejor puede comprenderse este fenómeno es si se interpreta que, por la presencia misma de la cimentación, las ondas de la excitación son filtradas de forma tal que aquellas ondas de baja longitud (alta frecuencia) no logran superar la presencia de la cimentación, mientras que por el contrario aquellas ondas



**Fig 5.1 - Funciones de transferencia entre los puntos SO-CEN y JN en dirección T**



**Fig 5.2 - Funciones de transferencia entre los puntos SO-CEN y JN en dirección L**



**Fig 5.3 - Funciones de transferencia entre los puntos SO-CEN y JN en dirección V**

cuya longitud supera la dimensión de la cimentación en la dirección de incidencia (bajas frecuencias), logran superar este filtro físico que representa la cimentación misma.

Lo anterior se convierte entonces en una muestra de que, en el caso del edificio SIS, la influencia de la interacción cinemática en el comportamiento del sistema, sólo cobra relevancia para valores de frecuencia superiores a 3 Hz. Dado lo cual, y sumado al hecho de que las frecuencias fundamentales de movimiento del sistema se encuentran entre 0.75 y 1.4 Hz, se reafirma el planteamiento hecho en el alcance del presente trabajo, en el cual se comentó sobre el interés de concentrarse principalmente en las características de la interacción inercial. Apoyado esto también, en trabajos anteriores en los cuales se comenta que la influencia de los efectos ISE se concentra con mayor relevancia en las respuestas asociadas con el modo fundamental de la estructura (Meli *et al.*, 1998).

A pesar de esto se debe observar que en las frecuencias inferiores a 4 Hz existe una variedad de crestas cuyas amplitudes alcanzan valores de 1.5, es decir, que el movimiento en la base de la cimentación es de una y media veces la amplitud de la excitación en dicho valor de frecuencia. Puede verse como algunas de estas amplificaciones corresponden justamente a los valores de frecuencia identificados para el primer modo de vibrar del sistema en el respectivo componente de movimiento. Sin embargo, debido a la abundancia de amplificaciones, no es posible realizar un trabajo de identificación que permita categorizar valores de frecuencia estrictamente asociados con el movimiento de traslación relativa de la base, tal como pudo hacerse en el caso del sistema.

Dado lo anterior, interesa entonces poder identificar las frecuencias asociadas al movimiento propio de la estructura con base empotrada y al cabeceo de la base.

Para la primera de estas, en los dos componentes de movimiento en traslación se calculó la función de transferencia  $FT_e$  planteada en la ec 3.30 (Paolucci, 1993; Meli *et al.*, 1998). Los correspondientes resultados se muestran en las figs 5.4 y 5.5, en donde se comparan con los cocientes del sistema (AZ-CEN/JN), de forma tal que se puedan resaltar las diferencias entre estas frecuencias para los eventos analizados.

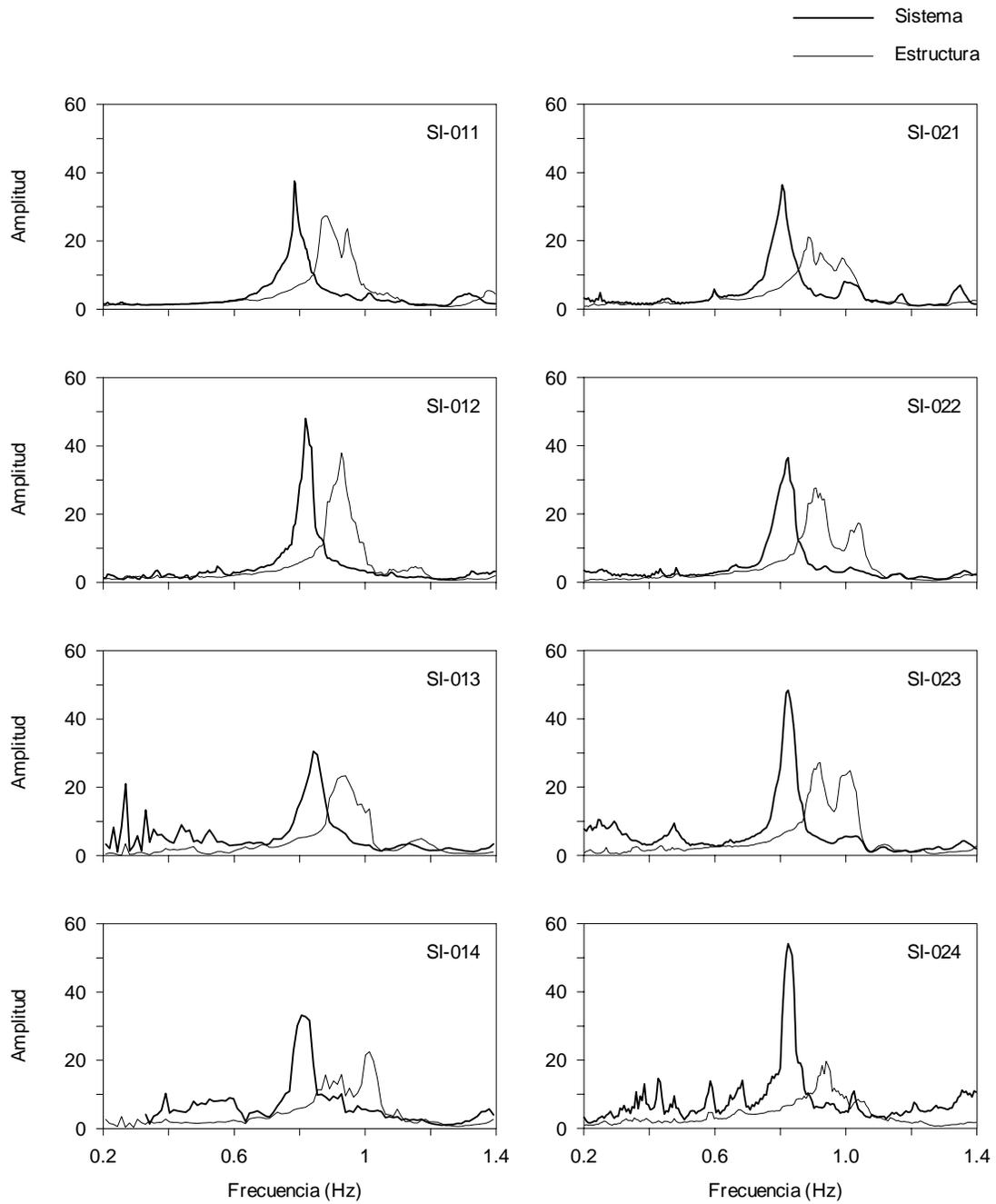
De igual manera a como se realizó en la identificación de las frecuencias del sistema, para las funciones de transferencia de la estructura ( $FT_e$ ) se ubicaron las ordenadas máximas y las frecuencias a las cuales se asocian. En la tabla 5.1 se presentan dichos resultados acompañados de los que se identificaron para el sistema. Adicionalmente se incluye el cociente entre ambas frecuencias, como una medida de los efectos ISE.

Como es de esperarse, las frecuencias halladas para la estructura con base empotrada ( $FT_e$ ) resultan mayores a las que se identificaron para el conjunto suelo-estructura. Se observa que en promedio las de la estructura equivalen a 1.12 y 1.15 veces la frecuencia del sistema en T y L, respectivamente. En cuanto a la variación de las frecuencias de la estructura entre evento y evento puede decirse que en general las disminuciones están

**Tabla 5.1 - Frecuencias fundamentales identificadas para el sistema y la estructura**

Evento	Dirección T			Dirección L		
	$\bar{f}_1$ (Hz)	$f_1$ (Hz)	$\frac{f_1}{\bar{f}_1}$	$\bar{f}_1$ (Hz)	$f_1$ (Hz)	$\frac{f_1}{\bar{f}_1}$
SI-011	0.784	0.879	1.12	0.989 - 1.010	1.166	1.15 - 1.18
SI-012	0.818	0.928	1.13	1.038	1.196	1.15
SI-013	0.842	0.940	1.12	1.099	1.270	1.16
SI-014	0.806	0.879 - 0.928	1.09 - 1.15	1.050	1.160 - 1.196	1.10 - 1.14
SI-021	0.806	0.885	1.10	1.019	1.141 - 1.190	1.12 - 1.17
SI-022	0.824	0.909	1.10	1.038	1.190	1.15
SI-023	0.824	0.922	1.12	1.050	1.196	1.14
SI-024	0.824	0.928 - 0.940	1.13 - 1.14	1.062	1.202	1.13

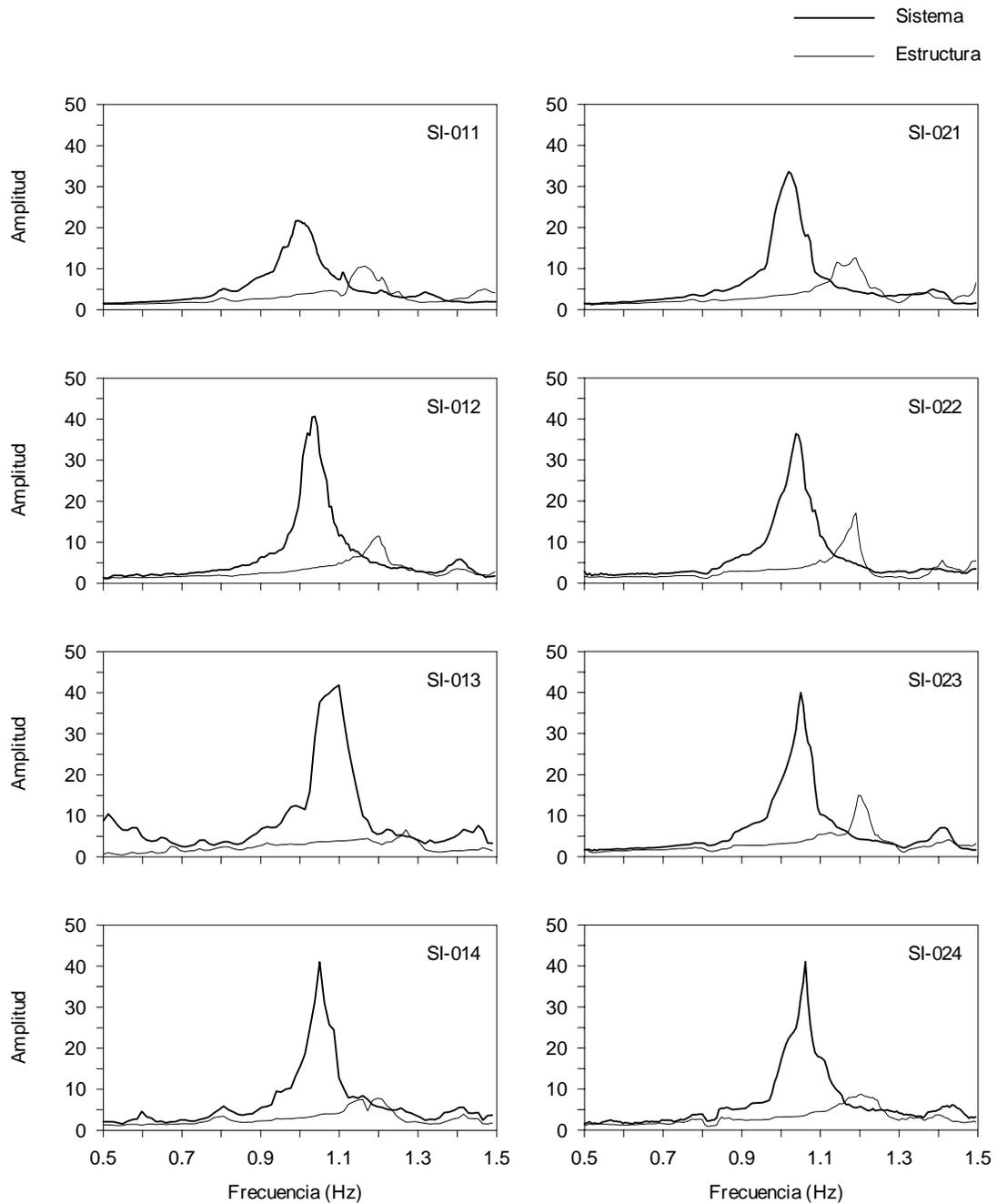
La frecuencia del sistema es la identificada en la función de transferencia AZ-CEN/JN.  
La frecuencia de la estructura es la identificada en la función de transferencia  $FT_e$ , definida por la ec 3.30.



**Fig 5.4 - Funciones de transferencia del sistema y la estructura ( $FT_e$ ) para la dirección T**

asociadas con la intensidad del sismo, manteniendo para ambos componentes una relación estable con respecto a las reducciones observadas en las frecuencias del sistema (capítulo 4).

En algunos de los eventos, la identificación de la frecuencia de la estructura se dificulta debido a la aparición de varias ordenadas significativas dentro de un intervalo de frecuencias. En el capítulo anterior, para el caso de la identificación de las frecuencias del sistema se comentó que la aparición de estos intervalos no definidos



**Fig 5.5 - Funciones de transferencia del sistema y la estructura ( $FT_e$ ) para la dirección L**

se asocia generalmente con comportamientos no lineales, con la pobreza de amplitudes en las señales o con características propias del sistema estructural. Esta situación, que para el caso de la estructura se presenta con mayor claridad en T para los eventos SI-014 y SI-024, y en L para los eventos SI-014 y SI-021, parece estar más ligada con el segundo de los casos, ya que justamente se trata de eventos de muy baja intensidad.

Adicionalmente, en el componente transversal de algunos de los eventos, especialmente notable en los sismos SI-022 y SI-023, se da una situación diferente, donde lo que ocurre es la aparición de dos crestas claramente

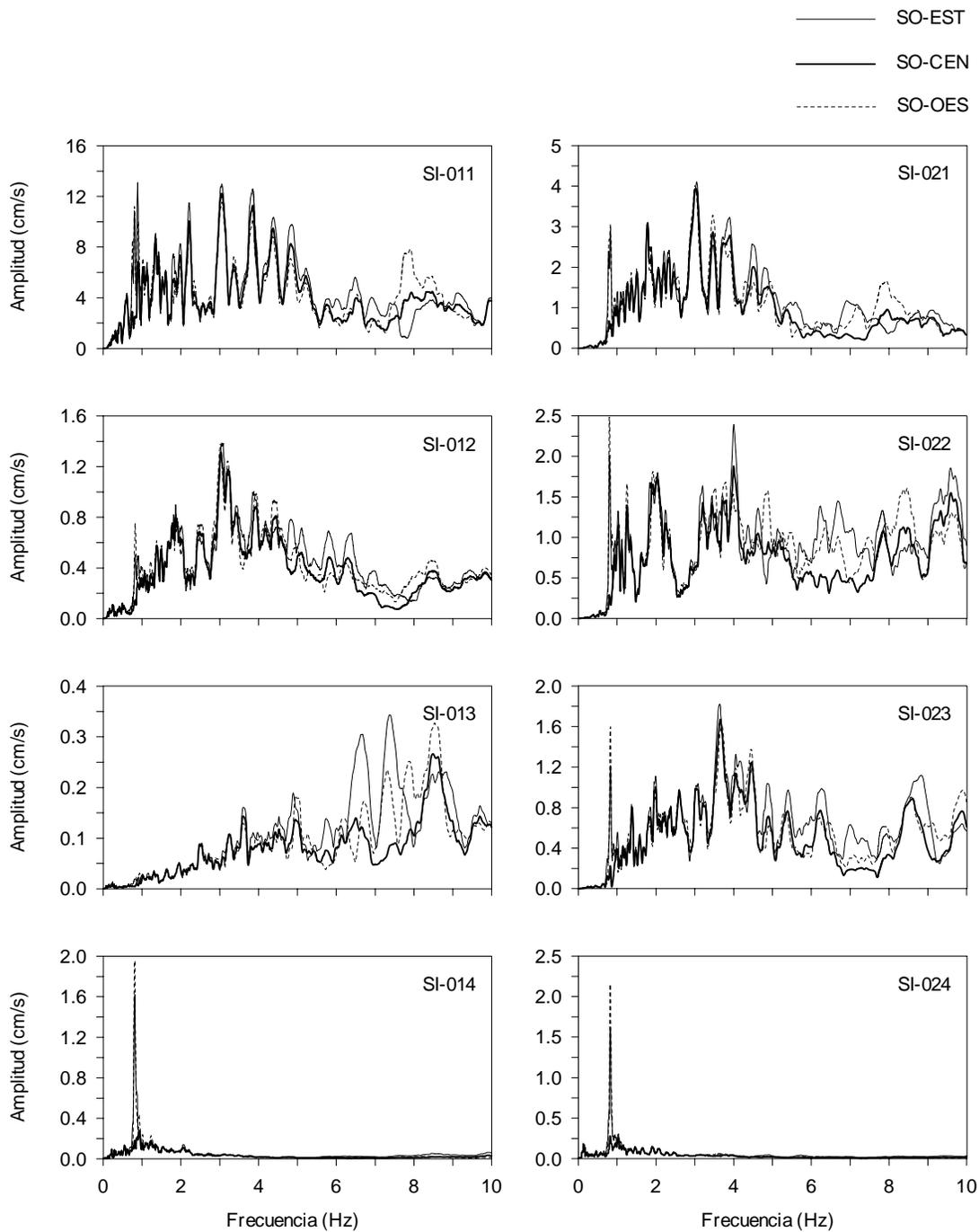
diferenciadas una de otra. En este caso la frecuencia seleccionada corresponde a la menor de las dos, ya que la segunda parece tratarse de la frecuencia fundamental del sistema en el componente L. Esto ocurre debido a que la función de transferencia propuesta, aun cuando permite aislar el movimiento de la estructura en la dirección de análisis, no logra eliminar el acoplamiento existente entre ambas direcciones. El hecho de que igual fenómeno no se dé en el componente L no es de extrañar, toda vez que es justamente en T en donde los efectos de interacción son menos importantes, cosa que puede deducirse a partir de los cocientes entre las frecuencias fundamentales del sistema y la estructura.

Para el caso de la identificación de las frecuencias asociadas con el movimiento debido al cabeceo de la base se optó en primer lugar por estimar los cocientes espectrales entre las señales verticales registradas en los costados del sótano con respecto al centro del mismo. En las figs 5.6 se muestran los espectros de amplitudes de Fourier de los puntos SO-EST y SO-OES comparados con el del centro del sótano, los cuales son representativos del movimiento de cabeceo en la dirección T, y sus respectivos cocientes se enseñan en la fig 5.8. Mientras que en las figs 5.7 y 5.9 se presentan aquellos relacionados con el cabeceo en L, es decir, los espectros y las funciones de transferencia de los puntos SO-SUR y SO-NOR con respecto a SO-CEN.

En la tabla 5.2 se incluyen hasta cuatro intervalos de frecuencia en los cuales se identificaron amplificaciones en las funciones de transferencia entre las señales verticales para cada uno de los dos pares representativos del movimiento de cabeceo en cada uno de los dos componentes (figs 5.8 y 5.9). En estos puede notarse claramente que para los cuatro casos mostrados, en todos los eventos, el primero de los intervalos

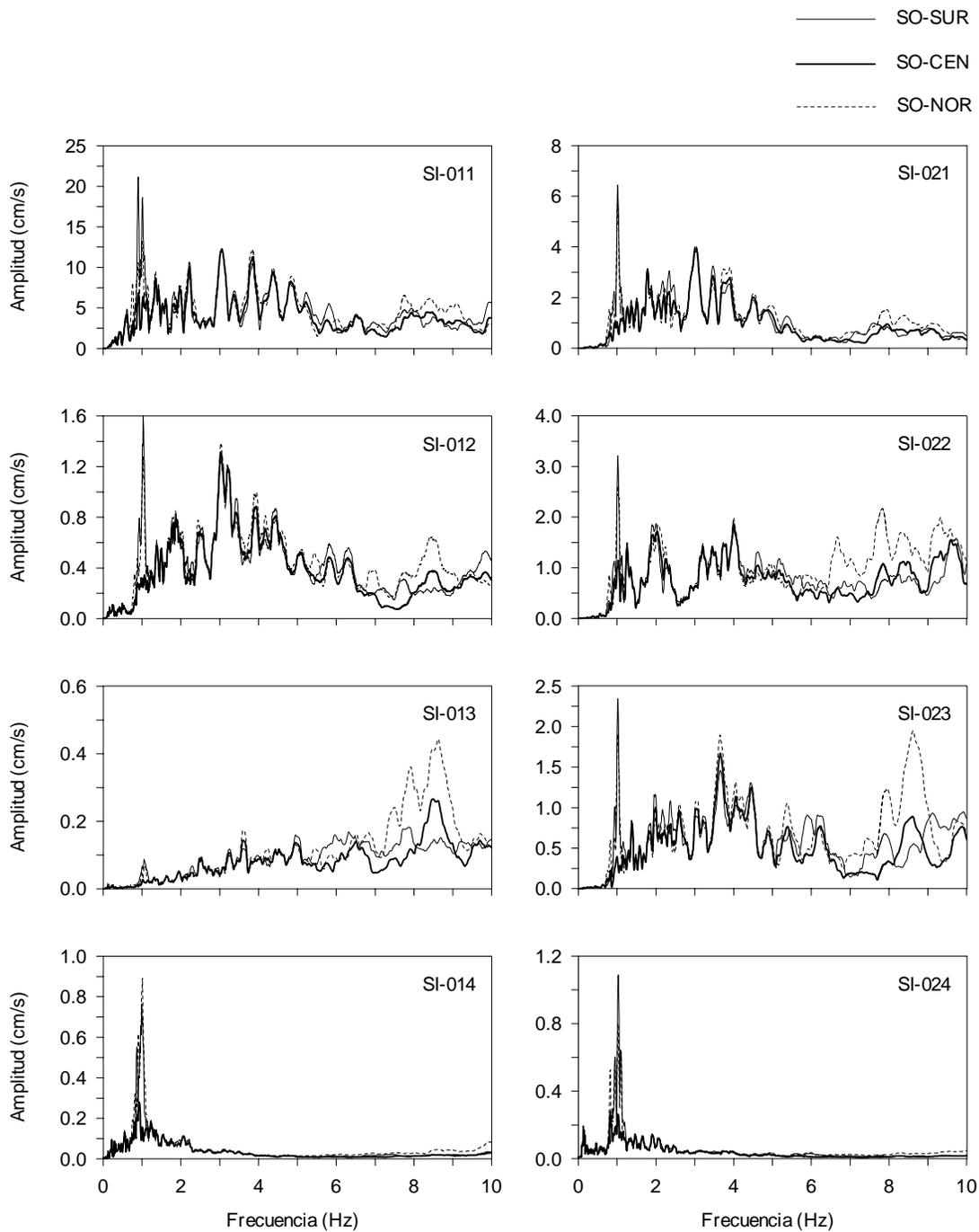
**Tabla 5.2 - Intervalos de frecuencias de cabeceo identificados en las funciones de transferencia entre señales verticales**

Evento	Intervalos de Frecuencias (Hz)			
	Dirección T		Dirección L	
	SO-EST/SO-CEN	SO-OES/SO-CEN	SO-SUR/SO-CEN	SO-NOR/SO-CEN
SI-011	0.74 - 0.88	0.73 - 0.94	0.79 - 1.09	0.66 - 1.03
	1.75 - 2.28	6.17 - 6.73	1.79 - 2.30	2.03 - 2.10
	5.91 - 6.52	7.41 - 8.29	5.20 - 5.99	5.56 - 6.31
	6.81 - 7.48		6.76 - 8.10	7.02 - 9.36
SI-012	0.72 - 0.92	0.74 - 0.92	0.86 - 1.10	0.73 - 1.12
	4.73 - 5.05	7.03 - 8.23	2.10 - 3.35	5.20 - 5.60
	6.78 - 7.85		5.53 - 6.78	6.78 - 9.16
			7.03 - 7.91	
SI-013	0.75 - 0.96	0.75 - 0.98	0.87 - 1.16	0.90 - 1.12
	4.68 - 4.93	4.90 - 5.44	5.51 - 6.43	5.32 - 5.61
	5.49 - 6.14	6.06 - 6.32	6.73 - 8.03	5.78 - 6.00
	6.29 - 7.88	6.61 - 8.77	9.13 - 9.49	6.70 - 9.50
SI-014	0.74 - 0.89	0.78 - 0.88	0.94 - 1.07	0.84 - 1.09
	5.56 - 9.07	5.50 - 6.67	5.77 - 7.78	5.76 - 8.23
		7.62 - 8.51		
SI-021	0.75 - 0.88	0.76 - 0.88	0.84 - 1.08	0.76 - 1.07
	5.45 - 6.04	5.74 - 8.55	2.09 - 2.52	4.91 - 5.23
	6.25 - 6.53		5.21 - 6.77	5.62 - 5.87
	6.66 - 6.69		7.01 - 7.77	6.79 - 9.59
SI-022	0.72 - 0.87	0.75 - 0.89	0.69 - 1.13	0.69 - 1.19
	5.59 - 7.62	4.74 - 4.98	5.49 - 5.79	2.12 - 2.27
		5.39 - 6.90	6.10 - 6.48	5.74 - 6.21
		7.11 - 7.63	6.78 - 7.40	6.42 - 9.49
SI-023	0.71 - 0.91	0.77 - 0.92	0.84 - 1.18	0.73 - 1.09
	4.62 - 6.41	6.41 - 8.17	5.07 - 6.87	5.26 - 6.11
	6.77 - 8.12	8.91 - 9.68	7.32 - 8.11	6.63 - 9.37
	8.72 - 9.17		8.91 - 9.77	
SI-024	0.71 - 0.94	0.71 - 0.89	0.87 - 1.20	0.90 - 1.13
	3.58 - 3.71	3.40 - 3.88	5.84 - 6.44	4.36 - 4.86
	4.12 - 5.10	4.36 - 4.76	6.73 - 7.66	5.81 - 8.11
	5.32 - 9.70	5.72 - 6.97		



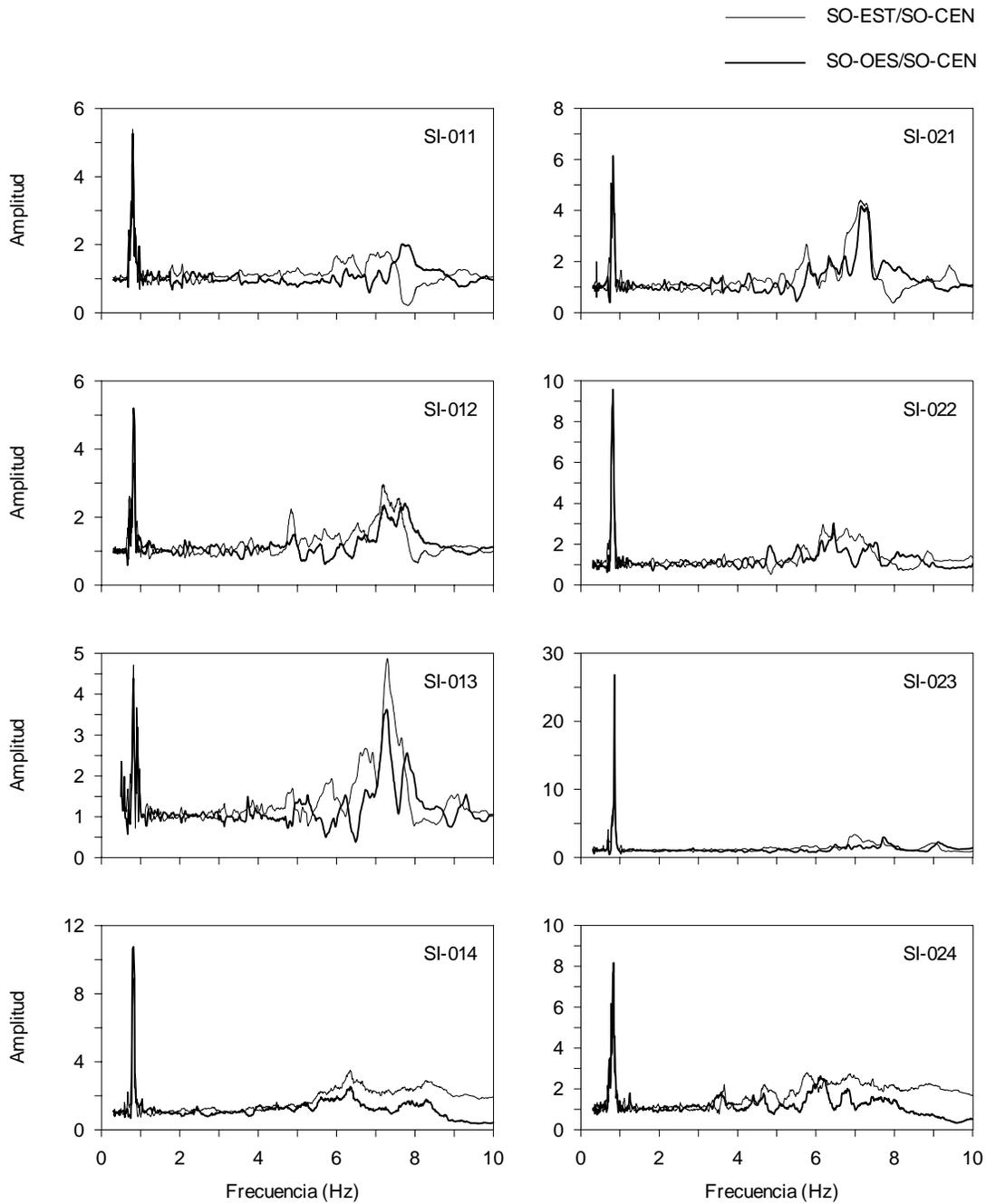
**Fig 5.6 - Espectros de amplitudes de Fourier para SO-EST, SO-CEN y SO-OES en dirección V**

identificados, que se encuentra entre 0.7 y 0.9 para el componente T y entre 0.8 y 1.1 Hz para el componente L, resulta ser el de mayor amplificación. Sin embargo, sabemos por el proceso de identificación del sistema, que éstos intervalos corresponden justamente a las frecuencias fundamentales del conjunto suelo-estructura en cada uno de los dos componentes.



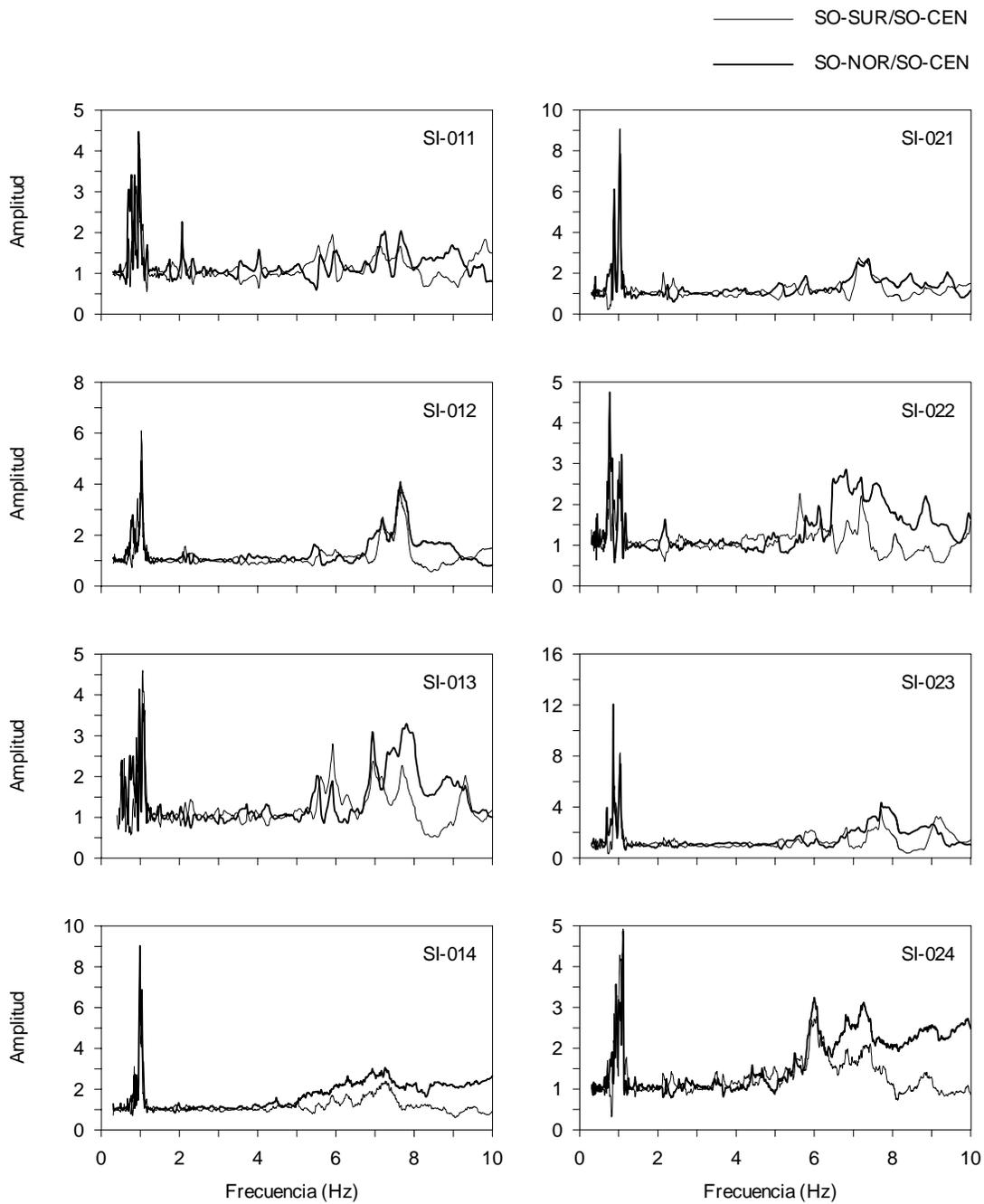
**Fig 5.7 - Espectros de amplitudes de Fourier para SO-SUR, SO-CEN y SO-NOR en dirección V**

Posteriormente, para la dirección T se dan diferentes amplificaciones que se pueden agrupar en un amplio intervalo entre 5.0 y 9.0 Hz, en el cual en algunos casos se alcanzan amplificaciones de importante orden, que incluso en un evento como el SI-013, del cual se comentó su gran contenido de energía en altas frecuencias, alcanza valores de amplificación de igual importancia que los asociados con el modo fundamental. Mientras



**Fig 5.8 - Funciones de transferencia SO-EST/SO-CEN y SO-OES/SO-CEN en dirección V**

que por su parte, en el componente L si pueden observarse dos intervalos de frecuencias en los cuales se dan amplificaciones que se pueden asociar con el movimiento de cabeceo. El primero de ellos, pero quizá no menos importante, se identifica entre 1.5 y 3.0 Hz, mientras que el segundo, que es bastante más amplio y de mayores ordenadas, se encuentra de 5.2 Hz en adelante.



**Fig 5.9 - Funciones de transferencia SO-SUR/SO-CEN y SO-NOR/SO-CEN en dirección V**

Por los valores identificados, se encontró que el análisis de estas funciones de transferencia puede conducir a errores de interpretación toda vez que los movimientos analizados poseen intrínsecamente el componente de traslación del sistema, motivo por el cual se observa que las mayores amplificaciones se dan justamente en las frecuencias asociadas a los modos fundamentales de vibrar del conjunto suelo-estructura y quizá los intervalos superiores, puedan verse influenciados, bien por los modos superiores del sistema o por los efectos sobre las señales verticales de la interacción cinemática.

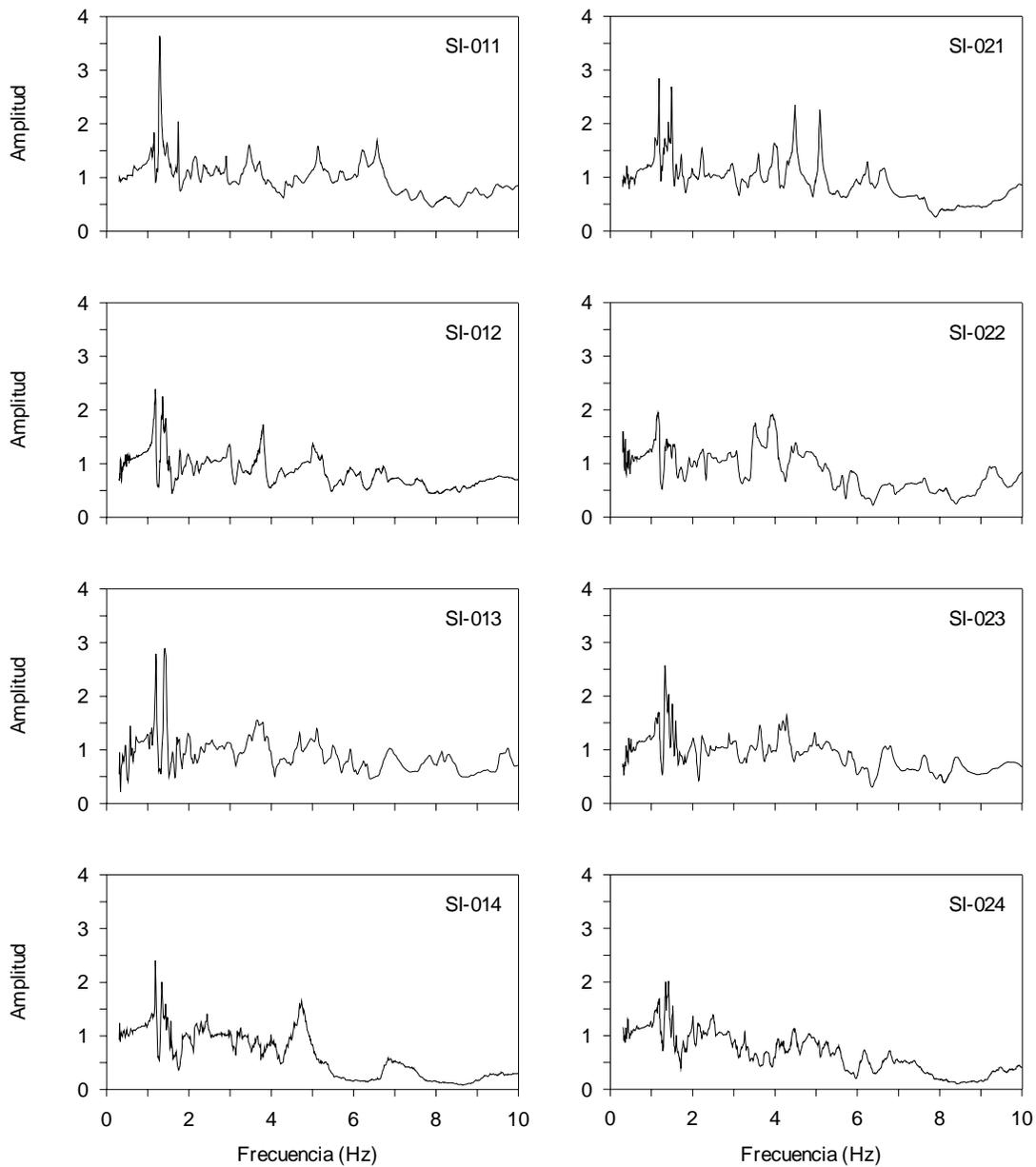
Con el objetivo de aislar el movimiento de cabeceo de esta serie de factores influyentes, se usó la función de transferencia  $FT_c$  propuesta en la ec 3.31, a partir de la cual se calcularon los cocientes que se enseñan en las figs 5.10 y 5.11 para el cabeceo en los componentes T y L, respectivamente. Los intervalos de frecuencia identificados en dichas funciones se resumen en la tabla 5.3, sobre los cuales conviene hacer las siguientes observaciones:

- En la mayoría de los casos el cociente  $FT_c$  logra evadir satisfactoriamente la influencia de los modos fundamentales del sistema.
- Para el componente T no se observa claramente la definición de un intervalo estrecho de frecuencias, sino que por el contrario se da una variedad de crestas que pudieran encontrarse desde 1.0 hasta 7.0 Hz, dentro del cual se pueden destacar algunos valores coincidentes entre evento y evento, como las ordenadas que se encuentran de 1.0 a 1.7, de 2.1 a 3.0, de 3.5 a 3.9 y de 4.5 a 5.2 Hz.
- En lo que respecta al componente L en la tabla 5.3 se señalan hasta cuatro intervalos en los que se observan dichas amplificaciones que, aunque varían entre evento y evento, en general pueden ser agrupados entre 1.3 y 3.0 Hz.

De acuerdo con lo anterior se observa que el movimiento de cabeceo no está asociado con una única frecuencia, sino que por el contrario se presenta en amplios intervalos que al parecer se definen más claramente en el componente de movimiento longitudinal que en el transversal, en el cual, al contrario de

**Tabla 5.3 - Intervalos de frecuencias identificados en las funciones de transferencia de cabeceo ( $FT_c$ )**

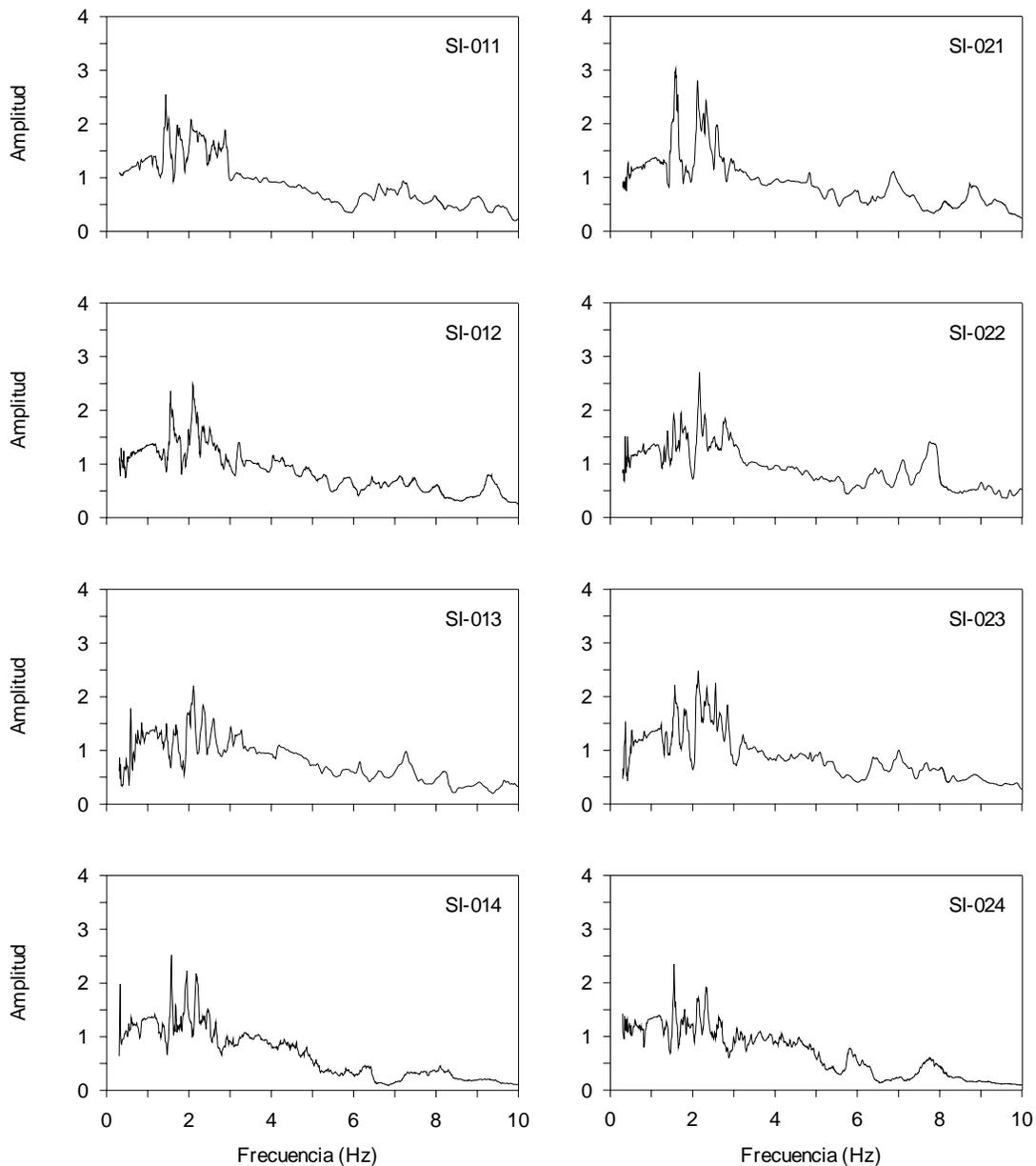
Evento	Intervalos de Frecuencias (Hz)	
	Dirección T	Dirección L
SI-011	0.98 - 1.74	1.37 - 1.64
	2.16 - 2.92	1.66 - 1.90
	3.31 - 3.77	1.97 - 2.43
	4.93 - 6.87	2.49 - 2.98
SI-012	1.04 - 1.46	1.49 - 1.80
	3.67 - 3.84	1.95 - 2.75
	4.96 - 5.25	3.15 - 3.65
SI-013	1.07 - 1.48	0.69 - 1.50
	3.40 - 3.94	1.59 - 1.74
	4.63 - 5.21	1.92 - 2.69
		2.92 - 3.36
SI-014	0.81 - 1.51	0.83 - 1.29
	2.13 - 2.51	1.51 - 2.61
	4.53 - 4.89	
SI-021	1.02 - 1.61	0.84 - 1.36
	2.17 - 2.27	1.44 - 1.74
	3.80 - 4.67	2.08 - 2.78
	5.03 - 5.22	2.86 - 3.31
SI-022	0.90 - 1.58	0.83 - 1.20
	2.15 - 3.09	1.31 - 1.92
	3.42 - 4.10	2.06 - 3.18
	4.36 - 5.02	
SI-023	0.90 - 1.60	0.79 - 1.27
	1.96 - 3.07	1.48 - 1.92
	3.50 - 3.69	2.06 - 2.91
	4.05 - 4.39	
SI-024	0.96 - 1.49	0.85 - 1.40
	2.03 - 2.62	1.50 - 1.63
		1.70 - 2.42
		2.53 - 2.72



**Fig 5.10 - Funciones de transferencia de cabeceo ( $FT_c$ ) en el componente T**

concentrarse en un intervalo claramente definido, se identifican múltiples ordenadas que pudieran asociarse a éste movimiento.

Ahora bien, con el interés de complementar las observaciones realizadas en las funciones de transferencia de la estructura y el cabeceo, con la intención de explorar un poco más sobre el comportamiento de la traslación relativa de la base con respecto al movimiento del terreno y para estimar las frecuencias de la estructura y la rotación de la base en el caso de la torsión, se optó adicionalmente por aplicar la metodología propuesta por Luco (1980) e implementada en trabajos posteriores como los de Luco *et al.* (1987) y Mendoza *et al.* (1991).



**Fig 5.11 - Funciones de transferencia de cabeceo ( $FT_c$ ) en el componente L**

El modelo usado en este procedimiento se presentó en el capítulo 3 (fig 3.1). Para su aplicación en los componentes de traslación se requirió obtener los espectros de amplitudes de Fourier de las señales de traslación total en la azotea (AZ-CEN) y traslación en la base (SO-CEN) en ambas direcciones. Adicionalmente se calculó el espectro correspondiente al movimiento en la azotea debido al cabeceo de la base, expresándolo a partir de las señales verticales registradas en el sótano (SO-EST y SO-OES para el componente T, y SO-SUR y SO-NOR para el componente L).

Para la aplicación de este método fue también necesario desarrollar un modelo de la estructura, de forma tal que puedan ser estimados los valores de los parámetros  $\gamma_1$ ,  $\beta_1$ ,  $M_1$  y  $H_1$ . Los valores obtenidos para dichos parámetros se muestran en la tabla 5.4.

**Tabla 5.4 - Parámetros para la estimación de los efectos ISE con el método de Luco**

Parámetro	Dirección T	Dirección L	Torsión
$\beta_1$	1.526	1.450	1.441
$\gamma_1$	0.686	0.677	---
$H_1$ (m)	45.39	44.76	43.68
$M_1$ (kg)	$1.03 \times 10^6$	$1.06 \times 10^6$	---
$I_1$ (kg·m <sup>2</sup> )	---	---	$1.24 \times 10^8$

Conocidos estos parámetros, se seleccionan para cada uno de los espectros involucrados en el procedimiento las ordenadas asociadas con la frecuencia fundamental identificada para el sistema. Una vez que se conocen estas ordenadas, mediante las ecs 3.33, 3.34 y 3.37 se obtienen las frecuencias de cabeceo de la base y traslación de la base, además de la frecuencia fundamental de la estructura, respectivamente.

En las tablas 5.5 y 5.6 se presentan las frecuencias del sistema, de la estructura, del cabeceo y la traslación de la base, y los cocientes entre la frecuencia fundamental de la estructura y el sistema, además de los porcentajes de participación de los movimientos de traslación y cabeceo de la base en la respuesta total del sistema. Estos tres últimos parámetros son especialmente útiles para estimar la contribución de los efectos ISE a la respuesta en traslación de la estructura.

Para ambos componentes de movimiento la relación entre las frecuencias de la estructura y el sistema guardan una relación estable de 1.08 y 1.15 en promedio para T y L, respectivamente. Esto indica que los efectos ISE son más pronunciados en el componente longitudinal. Es preciso anotar que para el componente L el valor promedio obtenido es el mismo que se obtuvo en el análisis del cociente  $FT_e$ , mientras que en el componente T es ligeramente menor.

En cuanto a las frecuencias de cabeceo y traslación de la base se observa que en general la frecuencia que se estima para el movimiento de traslación es menos estable que el valor obtenido para el cabeceo. Calculando

**Tabla 5.5 - Parámetros identificados con el método de Luco para el componente T**

Evento	$\bar{f}_i$ (Hz)	$f_i$ (Hz)	$f_c$ (Hz)	$f_h$ (Hz)	$\frac{f_1}{\bar{f}_1}$	$\frac{X_T^{so}}{X_T^{az}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{rx}}{X_T^{az}}$ (%)
SI-011	0.784	0.848	2.406	3.970	1.08	2.69	15.70
SI-012	0.818	0.879	2.599	4.324	1.08	2.47	14.62
SI-013	0.842	0.921	2.525	3.660	1.09	3.64	16.50
SI-014	0.806	0.875	2.598	3.454	1.09	3.76	14.34
SI-021	0.806	0.871	2.578	3.736	1.08	3.21	14.45
SI-022	0.824	0.887	2.657	4.126	1.08	2.75	14.16
SI-023	0.824	0.883	2.655	4.479	1.07	2.33	14.16
SI-024	0.824	0.884	2.653	4.416	1.07	2.40	14.23

**Tabla 5.6 - Parámetros identificados con el método de Luco para el componente L**

Evento	$\bar{f}_i$ (Hz)	$f_i$ (Hz)	$f_c$ (Hz)	$f_h$ (Hz)	$\frac{f_1}{\bar{f}_1}$	$\frac{X_T^{so}}{X_T^{az}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{ry}}{X_T^{az}}$ (%)
SI-011	0.992	1.170	2.192	3.589	1.18	4.98	29.95
SI-012	1.038	1.186	2.353	5.236	1.14	2.57	28.30
SI-013	1.099	1.256	2.415	6.630	1.14	1.80	29.90
SI-014	1.050	1.201	2.349	5.555	1.14	2.34	29.00
SI-021	1.019	1.170	2.342	4.469	1.15	3.41	27.71
SI-022	1.038	1.214	2.242	4.456	1.17	3.57	31.40
SI-023	1.050	1.205	2.378	4.888	1.15	3.02	28.40
SI-024	1.062	1.225	2.377	4.814	1.15	3.20	29.19

las desviaciones estándar para cada caso se obtienen valores de 0.09 y 0.08 en el caso del cabeceo, mientras que para el caso de la traslación se alcanzan valores de 0.38 y 0.90 en las direcciones T y L, respectivamente.

Este comportamiento refuerza lo observado en las funciones de transferencia de piso, acerca de las cuales se comentó sobre la imposibilidad de realizar un trabajo de identificación como el realizado para los otros componentes de movimiento. Apreciación que se ve robustecida al comparar los porcentajes de participación, en los cuales, para el caso del cabeceo tenemos valores promedio de 15 y 29 %, mientras que para la traslación someramente se alcanza el 3 % para ambos componentes.

Complementariamente, la observación de los valores promedio de la participación del cabeceo en la respuesta del sistema señala que estos se hacen bastante más significativos en la dirección longitudinal que en la transversal, poco más del doble en algunos casos, por lo cual seguramente la caracterización de las frecuencias en éste componente resultó mejor en el análisis de los cocientes  $FT_c$ .

Es preciso anotar que los valores de la frecuencia de la estructura, al igual que en el caso de las frecuencias del sistema, guardan una relación directa con la intensidad del sismo, de forma tal que los menores valores en cada una de las dos direcciones están asociados con el evento más intenso (SI-011). Situación distinta ocurre con las frecuencias de traslación y cabeceo, sobre las cuales no se puede llegar a una conclusión similar.

De otra parte, para el caso de la torsión interesa conocer la frecuencia propia de la estructura y la de torsión en la base. En este caso se requiere contar con los espectros de los movimientos en los extremos de la azotea y el sótano, a partir de los cuales se calcula la torsión en cada uno de ellos. Para esto se utilizaron los registros en la dirección transversal de los puntos AZ-SUR, AZ-NOR, SO-SUR y SO-NOR. Adicionalmente, de acuerdo con el modelo calibrado del edificio con el que se cuenta, se estimaron los parámetros  $I_1$  y  $\beta_1$ , cuyos valores se incluyen en la tabla 5.4.

**Tabla 5.7 - Parámetros identificados con el método de Luco para torsión**

Evento	$\bar{f}_{1t}$ (Hz)	$f_{1t}$ (Hz)	$f_t$ (Hz)	$\frac{f_{1t}}{f_t}$	$\frac{\Phi_{rz}^{so}}{\Phi_{rz}^{az}}$ (%)
SI-011	1.303	1.355	4.733	1.04	5.25
SI-012	1.373	1.433	4.805	1.04	5.71
SI-013	1.440	1.487	5.774	1.03	4.33
SI-014	1.367	1.431	4.628	1.05	6.05
SI-021	1.349	1.375	6.986	1.02	2.59
SI-022	1.361	1.443	4.091	1.06	7.62
SI-023	1.361	1.406	5.414	1.03	4.40
SI-024	1.379	1.440	4.792	1.04	5.73

En la tabla 5.7 se presentan las frecuencias del sistema en torsión para cada uno de los eventos, acompañadas de los resultados obtenidos con las expresiones del método de Luco (1980) para la estimación de las frecuencias de torsión en la base y de la estructura con base empotrada (ecs 3.43 y 4.45, respectivamente).

Como una medida de los efectos ISE en el comportamiento por torsión del edificio, en la misma tabla se incluyen los cocientes entre las frecuencias de la estructura y el sistema, acompañados de los porcentajes de participación de la torsión en la base frente a la torsión total del sistema.

Acerca de los resultados que se muestran en la tabla 5.7 puede decirse que los efectos por torsión en la cimentación no representan un componente importante en el movimiento total de torsión en el sistema. Debido a esta poca participación, que únicamente en un caso aislado supera un valor del 6 % se deriva el hecho de que, seguramente por la pobreza de amplitud en las señales, se encuentre una gran variación entre los valores de frecuencia de giro en la base, los cuales oscilan entre 4.09 y 6.99 Hz.

En lo que respecta a la frecuencia de torsión de la estructura con base empotrada, se puede comentar que esta sí conserva una relación estable con las frecuencias del sistema, con respecto a la cual presenta un cociente promedio igual a 1.04, cuya cercanía a la unidad, señala precisamente la baja participación de los efectos ISE en el componente torsional.

### 5.1.2 Análisis espectral de señales por ventanas

De acuerdo con los cambios observados entre evento y evento, con los intervalos señalados en las funciones de transferencia de la estructura ( $FT_e$ ), y especialmente por la variedad de ordenadas de amplificación y los límites de frecuencias definidos en las funciones de cabeceo ( $FT_c$ ), es adecuado pensar que el sistema, especialmente en lo que corresponde a los efectos ISE, puede estar experimentando comportamientos no lineales.

Es por ello que resulta de interés realizar un análisis de los eventos más representativos, en el cual sea posible estudiar el comportamiento de las diferentes frecuencias a lo largo de la ocurrencia de un evento sísmico. Siendo así, se seleccionaron tres eventos (SI-011, SI-021 y SI-022) a los cuales se les aplicó un proceso espectral por ventanas usando segmentos de 20 s, con traslapes entre ventana y ventana de 10 s.

En las figs 5.12 a 5.14 se muestran las funciones de transferencia de estructura y cabeceo en los dos componentes de movimiento en traslación para los tres eventos seleccionados, las cuales se obtuvieron de igual manera que como se explicó en la sección del análisis espectral para las señales completas, es decir, por medio de las expresiones 3.30 y 3.31.

En las funciones de transferencia de la estructura para los tres eventos, se puede observar una fuerte variación entre ventana y ventana, que al contrario de lo que inicialmente se señaló en el análisis espectral para las señales completas, se hace más notoria en el componente L. En éstos se observa la destacada aparición de

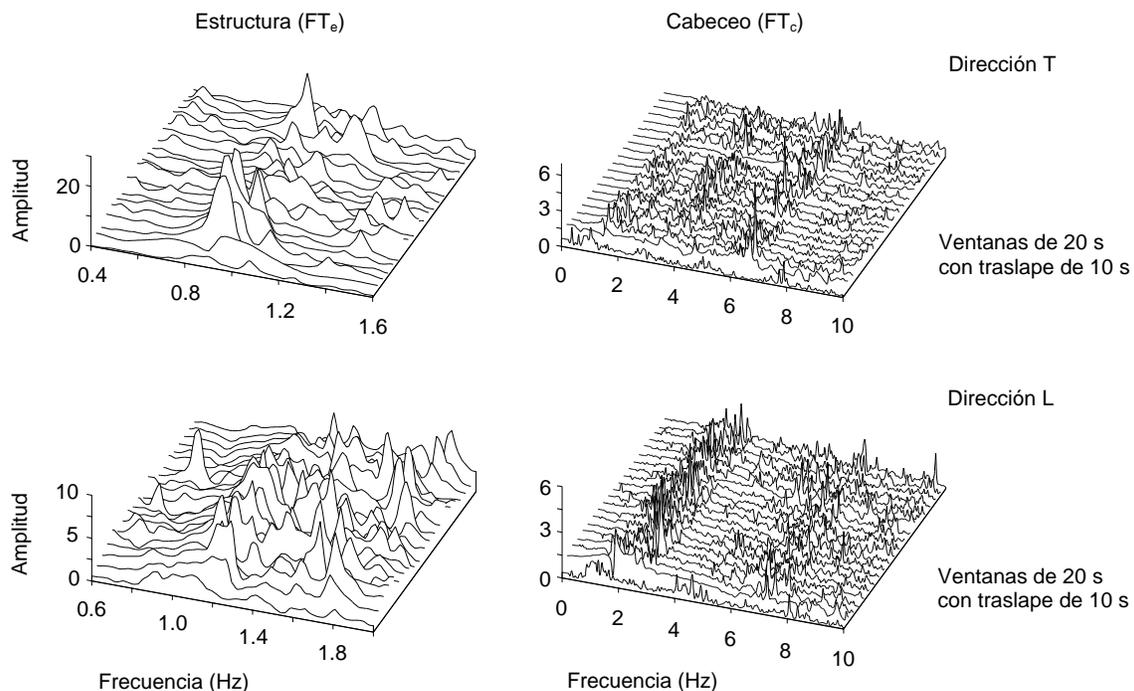


Fig 5.12 - Funciones de transferencia de estructura ( $FT_e$ ) y cabeceo ( $FT_c$ ) para el evento SI-011

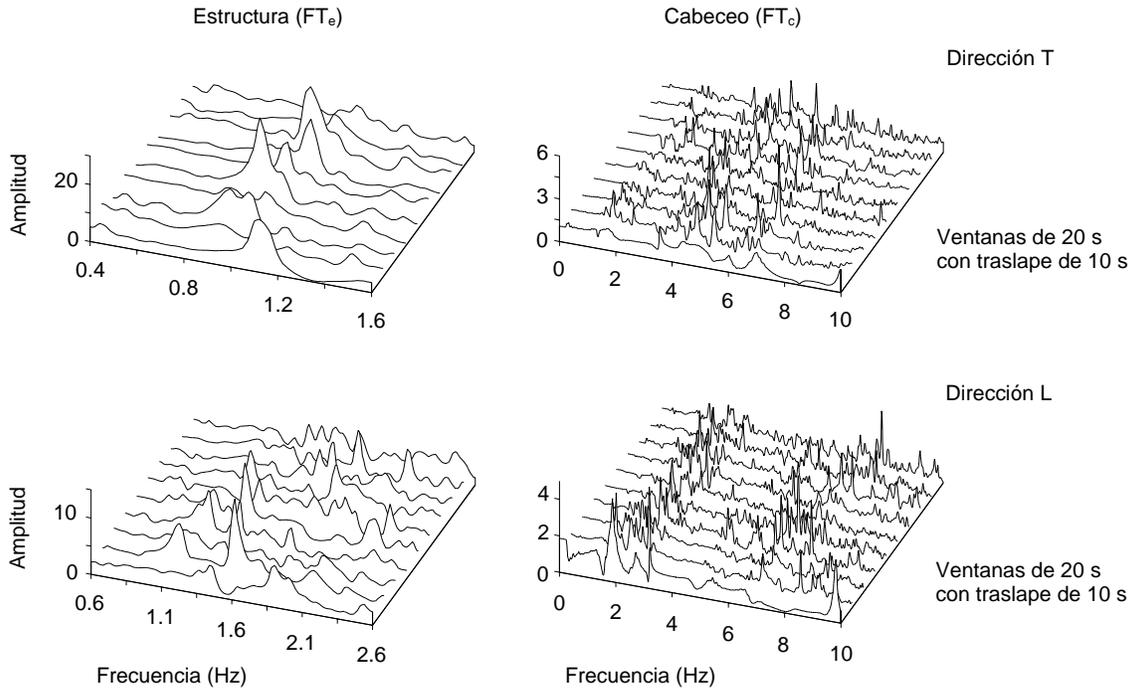


Fig 5.13 - Funciones de transferencia de estructura ( $FT_e$ ) y cabeceo ( $FT_c$ ) para el evento SI-021

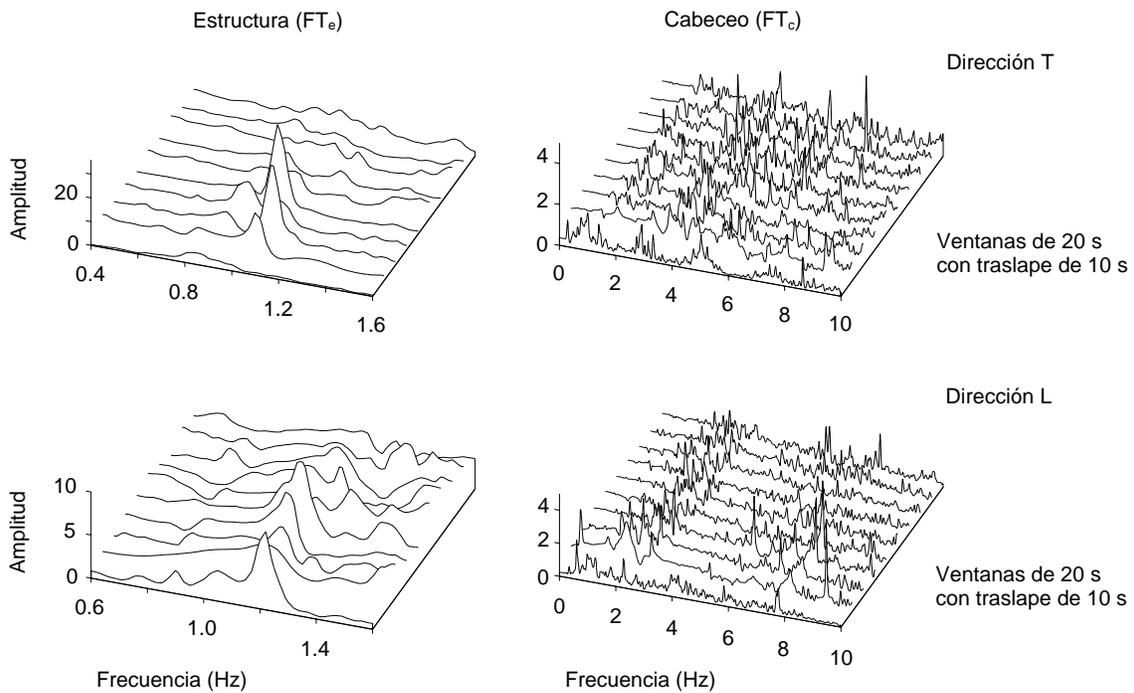


Fig 5.14 - Funciones de transferencia de estructura ( $FT_e$ ) y cabeceo ( $FT_c$ ) para el evento SI-022

crestas asociadas con los diferentes modos de la estructura y el sistema en los demás componentes de movimiento, observándose con especial realce en el evento SI-011 las constantes apariciones del modo fundamental del sistema en su componente de torsión, y en algunos casos aislados la aparición de ordenadas que seguramente están ligadas al primer modo del sistema en dirección transversal.

De manera similar, en el componente T se nota la constante aparición de las ordenadas asociadas con la frecuencia del modo fundamental del componente L del sistema, tal como se comentó en la sección anterior.

Estas observaciones son producto de las limitaciones ya comentadas sobre el proceso que se propone con las ecs 3.30 y 3.31, que inevitablemente no permiten aislar por completo el movimiento de la estructura, por encima de lo cual, conocidas las frecuencias del sistema y ya que el edificio no se presenta grandes efectos de acoplamiento para los modos fundamentales de los tres componentes de movimiento, resulta relativamente fácil realizar un proceso limpio de identificación.

Dicho trabajo conduce a la selección de las frecuencias que se muestran en la fig 3.15 y que se resumen, para los componentes T y L, en la tabla 5.8. Los valores correspondientes a cada una de las ventanas para los tres eventos seleccionados pueden encontrarse en las tablas B.7 a B.9.

**Tabla 5.8 - Frecuencias de estructura identificadas para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

Evento	Frecuencias (Hz)							
	Dirección T				Dirección L			
	$f_{1-min}$	$f_{1-max}$	$f_{1-P}$	$f_{1-DE}$	$f_{1-min}$	$f_{1-max}$	$f_{1-P}$	$f_{1-DE}$
SI-011	0.854	0.977	0.909	0.037	1.123	1.416	1.182	0.065
SI-021	0.854	1.123	0.984	0.089	1.123	1.440	1.174	0.096
SI-022	0.879	1.074	0.969	0.063	1.147	1.245	1.194	0.027

Los valores de cada ventana correspondientes a la fig 5.15 que aquí se resumen, se encuentran en las tablas B.7 a B.9.

**Tabla 5.9 - Cocientes entre las frecuencias fundamentales de la estructura y el sistema para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

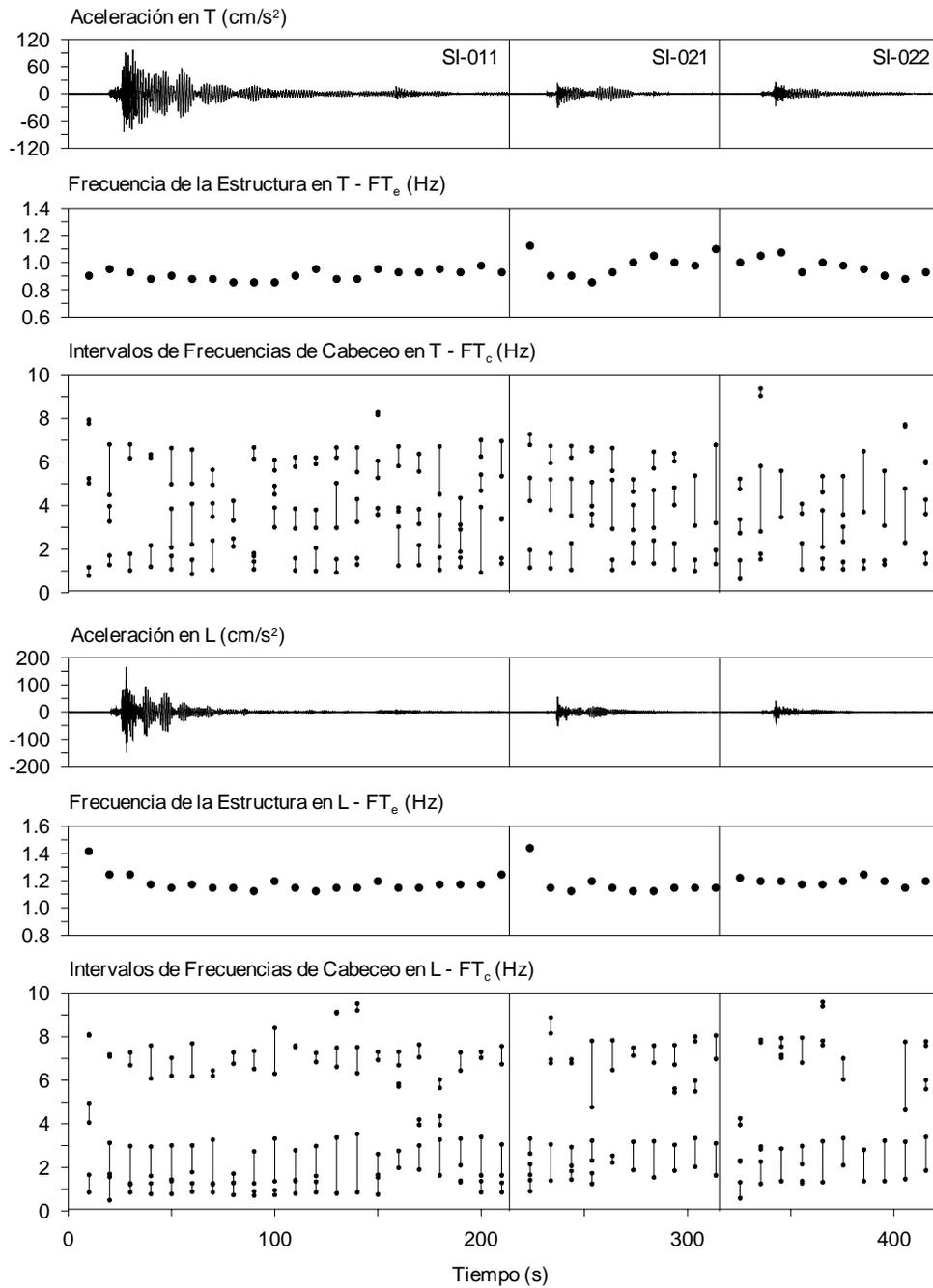
Evento	Frecuencias (Hz)							
	Dirección T				Dirección L			
	$f_1/\bar{f}_1 \min$	$f_1/\bar{f}_1 \max$	$f_1/\bar{f}_1 P$	$f_1/\bar{f}_1 DE$	$f_1/\bar{f}_1 \min$	$f_1/\bar{f}_1 \max$	$f_1/\bar{f}_1 P$	$f_1/\bar{f}_1 DE$
SI-011	1.06	1.31	1.15	0.05	1.04	1.29	1.15	0.06
SI-021	1.06	1.41	1.21	0.12	1.05	1.37	1.13	0.09
SI-022	1.06	1.29	1.17	0.07	1.09	1.19	1.13	0.04

Los valores de cada ventana correspondientes que aquí se resumen, se encuentran en las tablas B.10 a B.12.

Adicionalmente en la tabla 5.9 se resumen los cocientes entre las frecuencias de la estructura y las frecuencias del sistema, que como ya se ha dicho, son una medida de la importancia de los efectos ISE en el comportamiento del sistema. Los valores de cada una de las ventanas se detallan en las tablas B10 a B.12.

El análisis de las figs 5.12 a 5.15 en lo que respecta a la identificación de las frecuencias de la estructura, además de los resultados incluidos en las tablas 5.8 y 5.9 conduce a algunas observaciones de relevancia en el estudio del comportamiento del edificio.

La frecuencia de la estructura en el componente T revela una mayor estabilidad en el evento SI-011 que en los dos eventos posteriores, para los cuales la estructura parece experimentar una recuperación de su rigidez, al final del evento SI-021, pero que al final del SI-022 se encuentra prácticamente en el mismo valor que en la condición inicial del primero de los tres eventos. En L la situación es similar a aquella que se observara en las frecuencias del sistema, dándose inicialmente valores máximos, los cuales conforme ocurre el paso de las fases intensas de los eventos alcanzan valores bajos que son en buena parte recuperados al final.



**Fig 5.15 - Frecuencias de estructura y cabeceo identificadas en las funciones de transferencia  $FT_e$  y  $FT_c$  para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

Excepto por las pérdidas en las primeras ventanas, en especial aquellas del evento SI-021, las cuales posiblemente se asocian con dificultades numéricas derivadas de la transformación espectral y la pobreza de amplitudes en ese tramo de la señal, puede observarse que la frecuencia de la estructura es más estable en L que en T. Esto explica por qué, a diferencia de lo que se observó en el análisis espectral de las señales completas, en este caso se obtienen mayores valores para los cocientes entre las frecuencias de la estructura y

el sistema para T que para L, aun cuando ya se ha hecho ver que para el componente L los efectos ISE resultan tienen mayor influencia.

De acuerdo con esto, dichas variaciones en la frecuencia de la estructura en T, quizá correspondan más a deficiencias en las señales debido a las bajas amplitudes de los eventos SI-021 y SI-022, y a las limitaciones propias de un análisis espectral (Zapata *et al.*, 1999), que a un comportamiento no lineal de la estructura. A pesar de lo cual, aun para estos dos eventos, no se debe descartar la influencia que induce la presencia de los efectos ISE en la estimación de la frecuencia de la estructura, tal como lo revela la observación de las figs 5.12 a 5.14.

En cuanto a las funciones de transferencia de cabeceo ( $FT_c$ ) mostradas en estas mismas figuras, pueden notarse las franjas que definen los mismos intervalos de frecuencia que se identificaron en el análisis espectral para las señales completas. Ahora bien, para cada una de las ventanas se realizó el mismo trabajo de identificación que se hiciera en el caso de la sección anterior, y en la fig 5.15 se muestran, para los dos componentes de traslación, los intervalos de frecuencia de cabeceo identificados en cada una de las ventanas durante los tres eventos.

La identificación para el componente T resultó ser un poco más complicada que para L. Sin embargo se puede diferenciar una gran franja que cubre las frecuencias entre 1.0 y 7.0 Hz, aproximadamente (fig 5.15). Entre estas, quizá mas fácilmente observable en las figs 5.12 a 5.14 se encuentra un pequeño intervalo de ordenadas que se amplifican entre 1.0 y 2.5 Hz, y otro bastante mejor definido entre 3.0 y 7.0 Hz.

En el caso del componente L, la frecuencia de cabeceo, tal como lo relevó el análisis de las señales completas, se encuentra un primer intervalo bien definido entre 1.3 y 3.0 Hz, y un segundo menos claro entre 6.0 y 8.0 Hz (fig 5.15).

Al igual que como se realizó en el caso del análisis espectral de las señales completas, conocidas las frecuencias fundamentales del sistema para cada una de las ventanas de análisis y los parámetros  $\beta_1$ ,  $\gamma_1$ ,  $M_1$  y  $H_1$  para los componentes T y L, y  $\beta_1$  e  $I_1$  para el caso de la torsión (tabla 5.4), se calcularon los espectros por ventanas para los movimientos del sótano, la azotea y el componente de cabeceo, de forma tal que pudiese aplicarse el método simplificado de Luco (1980) para complementar el trabajo de identificación de las frecuencias del cabeceo y la estructura con base empotrada, además de estimar los valores de la frecuencia de traslación relativa de la base y los factores de participación de los efectos ISE en la respuesta total del sistema.

En las tablas 5.10 a 5.12 se presentan los valores mínimo, máximo y promedio de las frecuencias del sistema, la estructura con base empotrada, el cabeceo y la traslación de la base, acompañados de los cocientes entre las frecuencias de la estructura y el sistema, además de los porcentajes de participación del cabeceo y traslación de la base.

Los valores de estos parámetros correspondientes a cada una de las ventanas analizadas, se encuentran detallados en las tablas B.13 a B.15 y graficados en las figs 5.16 a 5.18, en las cuales se puede observar su variación a lo largo de los tres eventos.

En general, los valores promedio obtenidos para las frecuencias de la estructura con base empotrada y sus respectivos cocientes con respecto a las frecuencias del sistema son ligeramente superiores a los obtenidos anteriormente con el análisis espectral de señales completas, mientras que en el caso de las frecuencias de cabeceo el comportamiento es el opuesto, conduciendo en general a mayores porcentajes de participación del cabeceo en la respuesta total del sistema, excepto para el evento SI-011 en el componente transversal.

Para los valores de las frecuencias de la estructura se observa una disminución conforme se incursiona en las ventanas correspondientes a las mayores amplitudes de aceleración. Para el componente T estas variaciones se encuentran entre 0.78 y 1.06 Hz, mientras que en L varían entre 1.13 y 1.45 Hz. En cuanto a la torsión, las frecuencias de la estructura con base empotrada se encuentran desde 1.36 hasta 1.70 Hz.

En el movimiento de cabeceo se observa que, contrario a lo que sucede en el caso de la estructura con base empotrada o en el caso del sistema, las frecuencias estimadas empiezan en valores bajos que, conforme el sistema supera la fase inicial de vibración ambiental (0 a 20 s) y las ventanazas con contenidos de alta frecuencia (20 a 35 s), logran ganar estabilidad alrededor de los valores promedio calculados. Una primera interpretación de este comportamiento es pensar que el sistema de la cimentación ha ganado rigidez por el reacomodo mismo de los elementos participantes. Sin embargo, al observar el alto grado de variación en los valores de la frecuencia estimados para el movimiento de traslación en la base, éste proceso de estabilización se atribuye más a un efecto ocasionado por las pobres amplitudes en los espectros de dichas ventanas en las ordenadas que corresponden a la frecuencia fundamental del sistema. Situación que conduce a que el cálculo resulte afectado por problemas numéricos.

**Tabla 5.10 - Parámetros estimados con el método de Luco en dirección T**

Evento	Parámetro	$\bar{f}_i$ (Hz)	$f_i$ (Hz)	$f_c$ (Hz)	$f_h$ (Hz)	$\frac{f_i}{\bar{f}_i}$	$\frac{H\Phi_{ry}}{X_T^{az}}$ (%)	$\frac{X_T^{so}}{X_T^{az}}$ (%)
SI-011	Mínimo	0.708	0.776	0.742	1.524	1.07	13.70	1.95
	Máximo	0.879	1.065	2.722	4.946	1.28	16.50	6.82
	Promedio	0.798	0.872	2.446	3.438	1.10	14.65	3.74
SI-021	Mínimo	0.781	0.846	1.191	1.349	1.07	14.03	2.10
	Máximo	0.854	0.968	2.616	4.621	1.17	20.57	26.13
	Promedio	0.813	0.890	2.379	3.347	1.10	15.58	6.45
SI-022	Mínimo	0.781	0.834	1.672	1.728	1.07	13.58	1.74
	Máximo	0.879	1.063	2.696	5.229	1.24	16.34	16.84
	Promedio	0.828	0.918	2.520	3.814	1.11	14.77	4.46

Los valores de cada ventana correspondientes a la fig 5.16 que aquí se resumen, se encuentran en las tablas B.13 a B.15.

**Tabla 5.11 - Parámetros estimados con el método de Luco en dirección L**

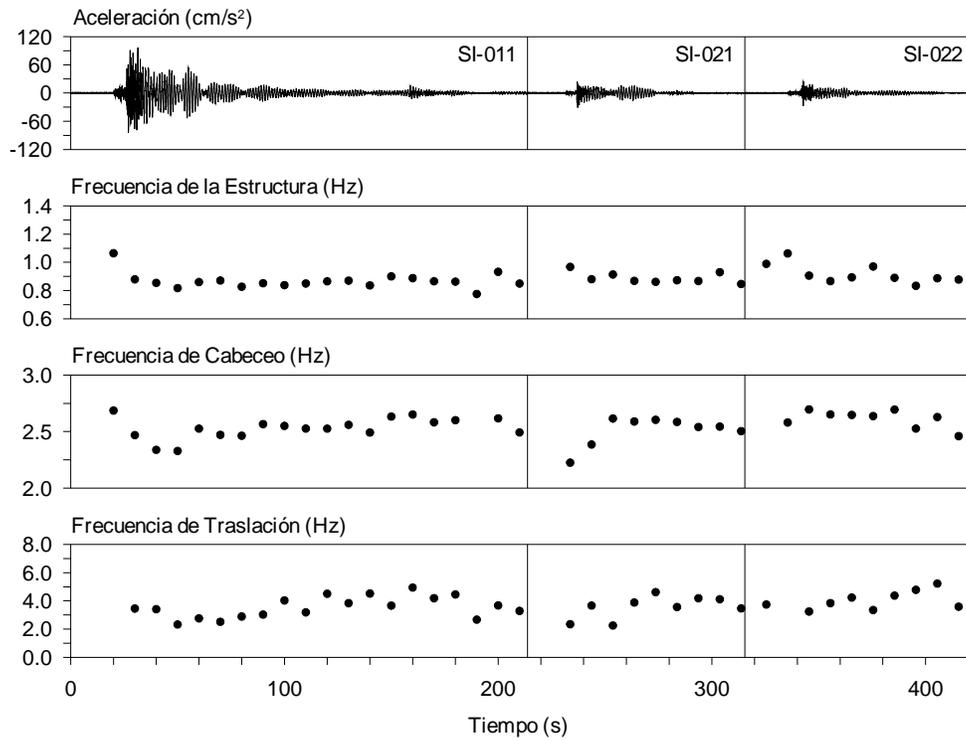
Evento	Parámetro	$\bar{f}_i$ (Hz)	$f_i$ (Hz)	$f_c$ (Hz)	$f_h$ (Hz)	$\frac{f_i}{\bar{f}_i}$	$\frac{X_T^{so}}{X_T^{az}}$ (%)	$\frac{H\Phi_{ry}}{X_T^{az}}$ (%)
SI-011	Mínimo	0.977	1.132	1.776	2.651	1.13	26.84	2.02
	Máximo	1.099	1.449	2.453	5.686	1.32	37.15	8.85
	Promedio	1.025	1.208	2.248	4.244	1.18	29.80	4.18
SI-021	Mínimo	1.025	1.155	2.192	2.646	1.13	27.17	1.10
	Máximo	1.074	1.341	2.392	8.094	1.28	33.57	10.32
	Promedio	1.040	1.205	2.348	5.119	1.16	28.77	3.64
SI-022	Mínimo	1.001	1.172	1.942	3.491	1.13	27.47	1.88
	Máximo	1.099	1.408	2.457	6.211	1.28	46.87	6.52
	Promedio	1.060	1.248	2.286	4.797	1.18	32.22	3.58

Los valores de cada ventana correspondientes a la fig 5.17 que aquí se resumen, se encuentran en las tablas B.13 a B.15.

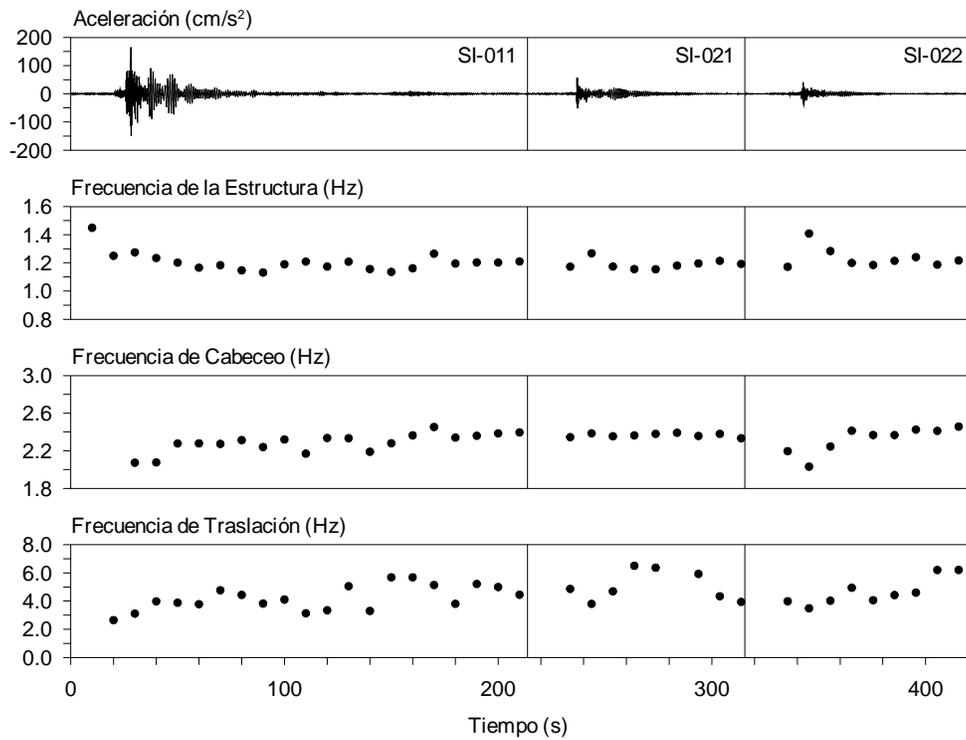
**Tabla 5.12 - Parámetros estimados con el método de Luco en torsión**

Evento	Parámetro	$\bar{f}_{it}$ (Hz)	$f_{it}$ (Hz)	$f_t$ (Hz)	$\frac{f_{it}}{\bar{f}_{it}}$	$\frac{\Phi_{rz}^{so}}{\Phi_{rz}^{az}}$ (%)
SI-011	Mínimo	1.270	1.402	2.227	1.00	3.94
	Máximo	1.538	1.636	5.734	1.24	24.27
	Promedio	1.361	1.487	3.707	1.09	11.40
SI-021	Mínimo	1.318	1.366	1.696	1.02	3.24
	Máximo	1.709	1.519	6.218	1.08	9.77
	Promedio	1.394	1.430	4.388	1.05	6.57
SI-022	Mínimo	1.245	1.375	2.192	1.02	3.18
	Máximo	1.440	1.699	6.252	1.27	25.85
	Promedio	1.335	1.469	3.985	1.10	11.28

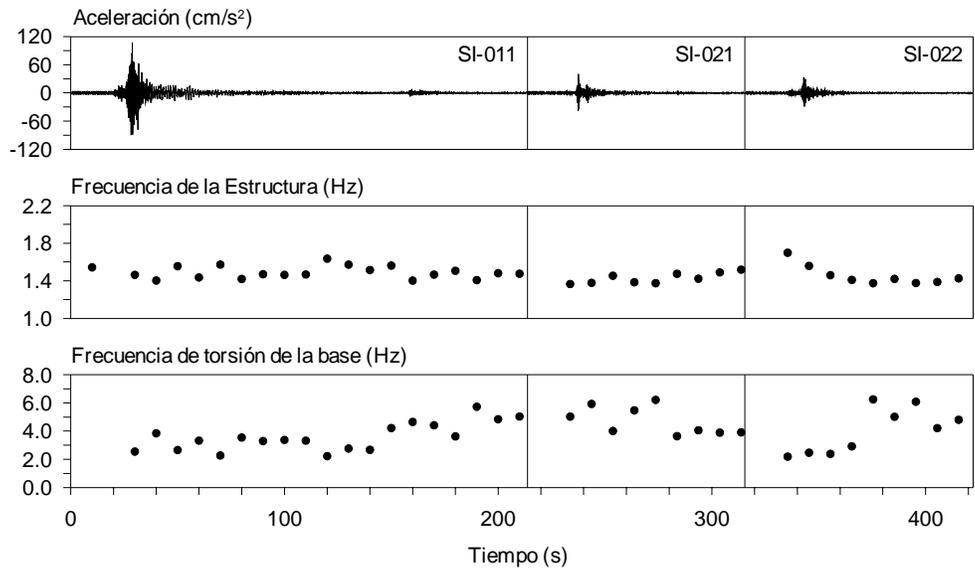
Los valores de cada ventana correspondientes a la fig 5.18 que aquí se resumen, se encuentran en las tablas B.13 a B.15.



**Fig 5.16 - Frecuencias estimadas con el método de Luco en dirección T**



**Fig 5.17 - Frecuencias estimadas con el método de Luco en dirección L**



**Fig 5.18 - Frecuencias estimadas con el método de Luco en torsión**

Sin embargo, en la comprensión de este aspecto, no puede dejarse aparte el hecho de que tal comportamiento es una muestra más de que ni el movimiento de cabeceo ni mucho menos el de traslación, puede ser adecuadamente caracterizado por un único valor de frecuencia, sino que por el contrario son componentes en la traslación total del conjunto suelo-estructura en los que existe una variable no lineal que dificulta su identificación, aun ante excitaciones moderadas. Comportamiento que tal vez este siendo adicionalmente acrecentado por la influencia de ondas incidentes y el contenido energético de las frecuencias de excitación.

Por último, se debe hacer notar que los porcentajes de participación para los movimientos de traslación, cabeceo y rotación de la base en la respuesta total del sistema indican que los efectos de interacción entre el suelo y la estructura más importantes se concentran especialmente en los movimientos de cabeceo, siendo entre éstos los más representativos los correspondientes al componente L, en la cual se promedian valores alrededor del 30 %, mientras que para el componente T se concentran cerca al 15 %.

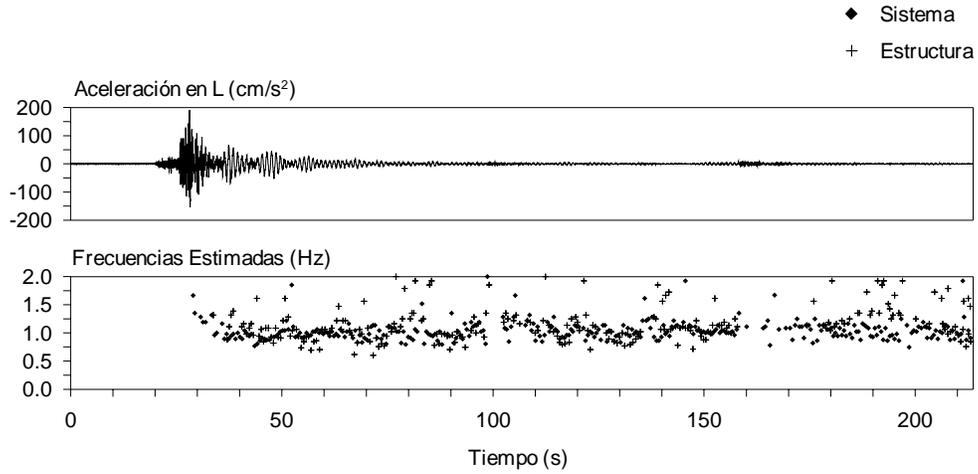
**5.1.3 Método de cruces por cero**

Con el interés despertado por los buenos resultados obtenidos con el método de cruces por cero para la estimación de las frecuencias fundamentales del sistema, se quiso incursionar en su uso para estudiar su utilidad en cuanto a la identificación de los movimientos propios de la estructura, el cabeceo de la base y la traslación de la misma.

En el caso del cálculo de la frecuencia de la estructura con base empotrada se realizó un trabajo previo con las señales con la intención aislar el movimiento propio de este subsistema, de acuerdo a como se planteó anteriormente en la expresión 3.63 que aquí se escribe nuevamente para el caso del componente L.

$$\ddot{y}_e^{AZ} = \ddot{y}_T^{AZ-CEN} - (\ddot{y}_s + \ddot{y}_0 + \ddot{y}_c^{AZ}) \tag{5.1}$$

Obtenida entonces esta señal se procedió a aplicar sobre ella el método de cruces por cero. Los resultados obtenidos mostraron que en el dominio del tiempo resulta difícil desacoplar del movimiento de la estructura el contenido propio de las frecuencias del sistema. En la fig 5.19 se comparan los resultados obtenidos para el evento SI-011 al aplicar el método a la señal del sistema y a la obtenida con la ec 5.1.



**Fig 5.19 - Comparación de las frecuencias estimadas para el sistema y la estructura con el método de cruces por cero en dirección L para el evento SI-011**

La dificultad en distinguir una de otra resulta obvia. Efectuar un proceso de filtrado con la intención de aislar alguna de las dos terminaría por afectar el proceso de identificación, ya que sería necesario recurrir a intervalos de filtrado muy estrechos o a un número de polos superior al comúnmente utilizado (4), lo que invariablemente conduciría a problemas numéricos. Es por ello que no se encontró viable el análisis de las frecuencias de la estructura con base empotrada por este procedimiento.

A pesar de lo anterior, y con la intención de examinar el potencial del método de cruces por cero con movimientos cuyas frecuencias se tiene previsto que se encuentren más aisladas de la frecuencia fundamental del sistema, gracias a lo cual resultase posible aplicar un proceso de filtrado en el que no se incurriera en las dificultades mencionadas para el caso de la estructura con base empotrada, se calcularon las señales de cabeceo y de traslación de la base en las direcciones transversal y longitudinal, así como la señal de giro en la cimentación.

Dichos movimientos fueron obtenidos por medio de expresiones similares a las planteadas en la sección 3.1.2. Las ecs 5.2 y 5.3 corresponden al cabeceo en los componentes T y L, respectivamente. Mientras que las expresiones 5.4 y 5.5 expresan los movimientos relativos de la cimentación respecto al registro en la estación de campo. Por su parte, en la ec 5.6 se calcula la torsión en la base.

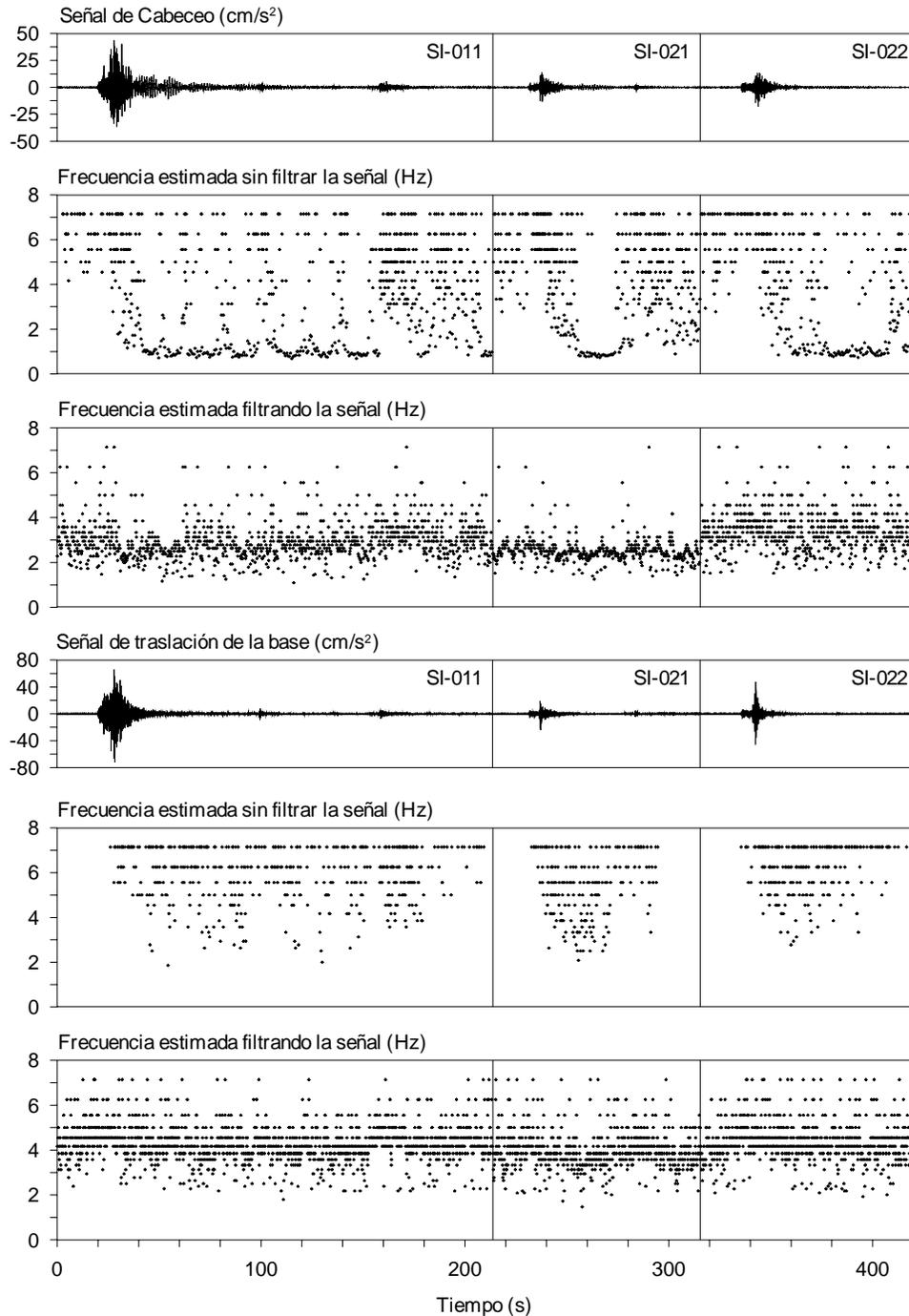
$$\ddot{\phi}_{rx} = \frac{\ddot{z}_T^{SO-EST} - \ddot{z}_T^{SO-OES}}{L_y} \tag{5.2}$$

$$\ddot{\phi}_{ry} = \frac{\ddot{z}_T^{SO-SUR} - \ddot{z}_T^{SO-NOR}}{L_x} \tag{5.3}$$

$$\ddot{y}_0 = \ddot{y}_T^{SO-CEN} - \ddot{y}_s \tag{5.4}$$

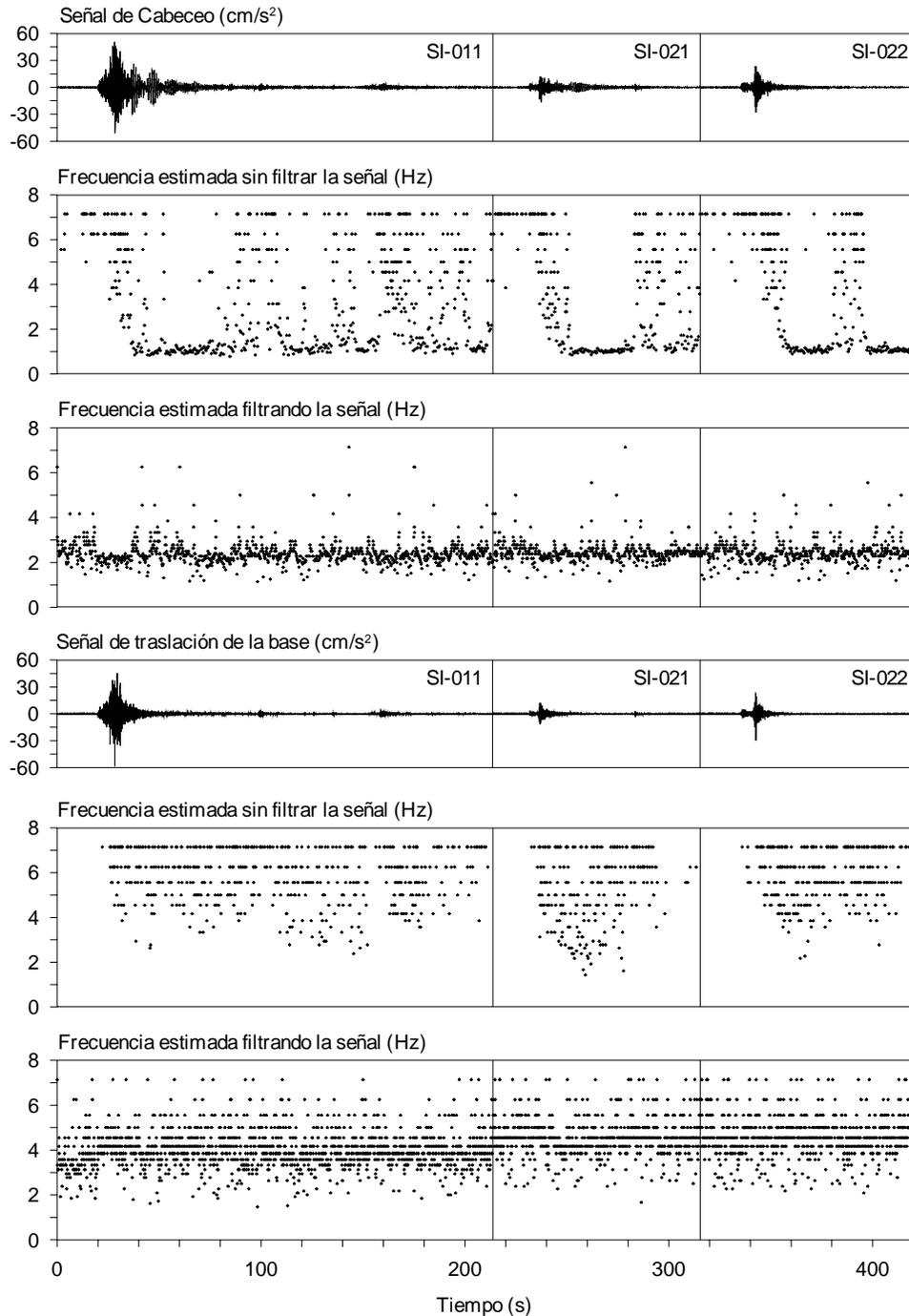
$$\ddot{x}_0 = \ddot{x}_T^{SO-CEN} - \ddot{x}_s \tag{5.5}$$

$$\ddot{\phi}_{rz}^{SO} = \frac{\ddot{y}_T^{SO-LAT} - \ddot{y}_T^{SO-OPTO}}{D_x} \tag{5.6}$$



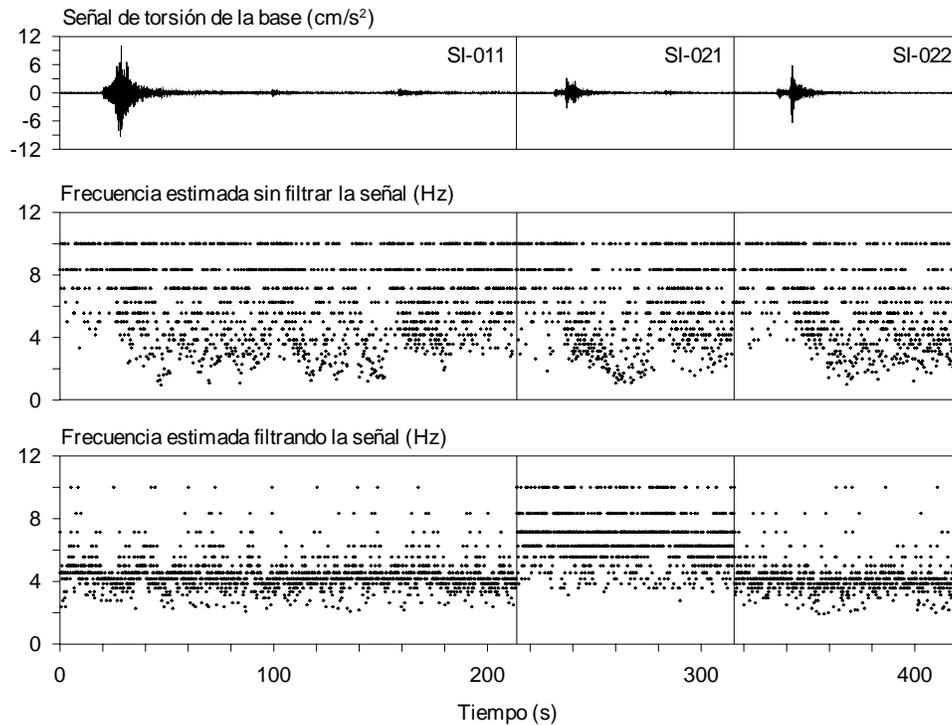
**Fig 5.20 - Frecuencias de cabeceo y traslación de la base estimadas con el método de cruces por cero en la dirección T para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

Para las señales de cabeceo en las direcciones transversal y longitudinal se utilizaron filtrados paso banda entre 1.8 y 3.0 Hz, mientras que en los casos de traslación de la base éstos se efectuaron entre 3.0 y 5.0 Hz en los tres eventos. En cuanto a la torsión en la cimentación se utilizó un filtrado entre 3.0 y 5.0 Hz para los eventos SI-011 y SI-022, mientras que para el evento SI-021 fue entre 6.0 y 8.0 Hz.



**Fig 5.21 - Frecuencias de cabeceo y traslación de la base estimadas con el método de cruces por cero en la dirección L para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

En todos los casos, los límites de los intervalos de filtrado se fijaron de acuerdo con las características observadas en las funciones de transferencia en el análisis espectral y conforme a los resultados obtenidos con el método simplificado de Luco (1980).



**Fig 5.22 - Frecuencia de torsión en la base estimada con el método de cruces por cero para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

Las estimaciones obtenidas para los componentes T, L y torsión se muestran en las figs 5.20 a 5.22, en las cuales se incluye tanto las frecuencias calculadas a partir de las señales sin filtrar, como las obtenidas con las señales ya filtradas, sobre las cuales se pueden destacar las siguientes observaciones.

En las señales de cabeceo sin filtrar es posible ver como se hacen presente las frecuencias características del sistema, las cuales una vez filtrada la señal pierden relevancia. Para el cabeceo en el componente T, a diferencia de cuando se buscaba identificar las características del sistema, una vez que se filtra la señal las frecuencias no se concentran de tal manera que sea posible ser concluyente sobre una tendencia de comportamiento, sino que simplemente parecen aglutinarse dentro del intervalo definido por el filtrado.

Para el cabeceo en el componente L, si bien la situación mejora un poco y las frecuencias parecen aglutinarse un poco más alrededor de los valores identificados en el análisis espectral, los resultados tampoco permiten ser concluyentes, más que en el hecho ya conocido de que, ya que este aglutinamiento se da de manera más evidente, se pueda llegar a expresar que esto obedece a que hay una mayor participación de este movimiento en tal componente. Sin embargo un juicio honesto debe expresar que, a menos que se tenga un análisis previo del sistema, este método no llevaría a observaciones relevantes, puesto que estaría sujeto a los criterios de filtrado.

En cuanto a la identificación de las frecuencias de traslación y torsión en la base la situación no es mejor que en los casos de cabeceo. Llama la atención que al aplicar el procedimiento a las señales sin filtrar, el mayor contenido de frecuencias se ubica significativamente alejado de los valores de la frecuencia fundamental del sistema. Siendo así, pareciera que las frecuencias de traslación de la base se encuentran en intervalos superiores a los esperados de acuerdo con los valores estimados con el método simplificado de Luco. Mientras que para las señales filtradas, la dispersión de los resultados finalmente se limita principalmente a los intervalos del filtro aplicado, de tal manera que no muestra una tendencia clara.

#### 5.1.4 Análisis paramétrico modal

Para el estudio de los efectos de interacción por medio de la técnica paramétrica modal se analizaron los distintos modelos planteados en el tercer capítulo para la estimación de las propiedades de la estructura con base empotrada y los movimientos de cabeceo en la base. Se descartó la posibilidad de estimar las características correspondientes a la traslación relativa de la base por su baja participación en la respuesta del sistema y por que, de acuerdo a el comportamiento observado en los resultados con los métodos espectrales y según experiencias pasadas (Zapata, 2001) las bajas amplitudes en este componente no permiten hacer una adecuada identificación.

Para el caso de la identificación de las frecuencias fundamentales de la estructura con base empotrada y sus respectivos porcentajes de participación en la respuesta, se utilizaron tres tipos de modelos. El primero involucra los movimientos en cada una de las direcciones de traslación ( $1D_T$ -EST y  $1D_L$ -EST), el segundo es un modelo que involucra ambas componentes (2D-EST) y el tercero adiciona al caso anterior la respuesta en torsión de la estructura (3D-EST). Estos tres modelos pueden verse claramente en las figs 3.4 y 3.5, mientras que la manera en que se preparan las señales de excitaciones y respuestas se detalla en la tabla 3.3.

La utilización de modelos de un solo nivel, como los propuestos ha mostrado resultados bastante aceptables (Toro, 1997; Zapata, 2001), ya que se ha visto que permiten determinar satisfactoriamente los modos fundamentales y superiores en las distintas componentes de análisis. De otra parte, en el trabajo realizado por Palacios (2003) se observó que la identificación de sistemas mediante modelos planos como lo son los modelos  $1D_T$ -EST y  $1D_L$ -EST, puede conducir a errores debidos a la omisión de los efectos de acoplamiento. Es por ello que, para complementar el trabajo de identificación se estimaron también las propiedades en un modelo de dos dimensiones (2D-EST), y se propuso un modelo de tres dimensiones (3D-EST) que involucrara la respuesta en torsión de la estructura restando de esta la influencia por torsión en la base.

En el caso del cabeceo, se utilizaron modelos en una dimensión y dos dimensiones ( $1D_T$ -CAB,  $1D_L$ -CAB y 2D-CAB), los cuales pueden verse en las figs 3.6 y 3.7. Los registros utilizados como señales de entrada y de salida se enseñan en la tabla 3.4. Adicionalmente, dado que estos modelos resultaron estar fuertemente influenciados por la respuesta del sistema, discusión que se amplía más adelante, se propuso realizar filtrados sobre las señales de respuesta, a fin de encontrarlas características propias del cabeceo.

Para ambos casos, estructura y cabeceo, se estimaron frecuencias, factores de participación y errores en el ajuste, tanto los relativos a cada una de las respuestas como los errores totales. En general, como primera opción se realizaron procesos de ajuste en ventanas de 10 s, pero en algunos casos, concretamente en los modelos con respuestas filtradas para la caracterización de los movimientos de cabeceo, los errores obtenidos fueron superiores al 40 %, por lo que fue necesario recurrir a procesos con ventanas de 5 s para mejorar el ajuste de las señales calculadas con respecto a las medidas experimentalmente y así disminuir los índices de error.

Corresponde mencionar que en algunos de los casos no fue posible realizar la estimación de los parámetros en las primeras ventanas (0 a 20 s), debido a las bajas amplitudes que en estos intervalos se registran, ya que corresponden a los tiempos de registro de pre-evento de los instrumentos.

En la tabla 5.13 se resumen los resultados encontrados con cada uno de los modelos para el caso de la identificación de las frecuencias de la estructura con base empotrada en los tres componentes de movimiento, traslación en T, L y torsión. Los resultados correspondientes a cada una de las ventanas de análisis de los tres eventos seleccionados se encuentran en las tablas B.16 a B.18, en las cuales se incluyen no sólo las frecuencias, sino también los factores de participación y los índices de error en cada uno de los ajustes. En las figuras 5.23 a 5.25 se muestra la variación de estos parámetros en función del tiempo.

El ajuste de las respuestas calculadas para cada uno de los modelos utilizados en los tres componentes de movimiento involucrados, se encuentra en el apéndice C en las figs C.7 a C.27, en las cuales puede apreciarse no sólo el ajuste de las señales en el dominio del tiempo, sino también la reproducción del contenido de

frecuencias mediante la comparación entre los espectros de amplitudes de Fourier de las respuestas relativas estimadas contra los de las respuestas relativas medidas.

En términos generales puede decirse que los tres modelos utilizados coinciden en los valores de frecuencia identificados, excepto en la primera ventana del evento SI-011, para la cual no fue posible realizar la identificación con los modelos 2D-EST y 3D-EST, por lo que se omiten los resultados correspondientes.

De acuerdo con los valores obtenidos para el modelo 3D-EST en los tres eventos analizados, se tiene que las frecuencias de la estructura en los componentes T, L y torsión fueron en promedio de 0.89, 1.21 y 1.40 Hz, respectivamente. Los valores máximos alcanzaron frecuencias de 0.93, 1.34 y 1.46, mientras que los mínimos, que se ubicaron en las zonas intensas de cada evento, llegaron a señalar valores de 0.83, 1.13 y 1.34 Hz para T, L y R, respectivamente.

Las diferencias entre las frecuencias máximas y mínimas para el mismo modelo indican que se alcanzaron reducciones del orden de 11, 15 y 8 % para los mismos tres componentes. Mientras que si se comparan los valores identificados en las primeras ventanas del evento SI-011 con respecto a la última del evento SI-022, se obtiene que las reducciones finales fueron 8, 10 y 4 % para los componentes T, L y torsión.

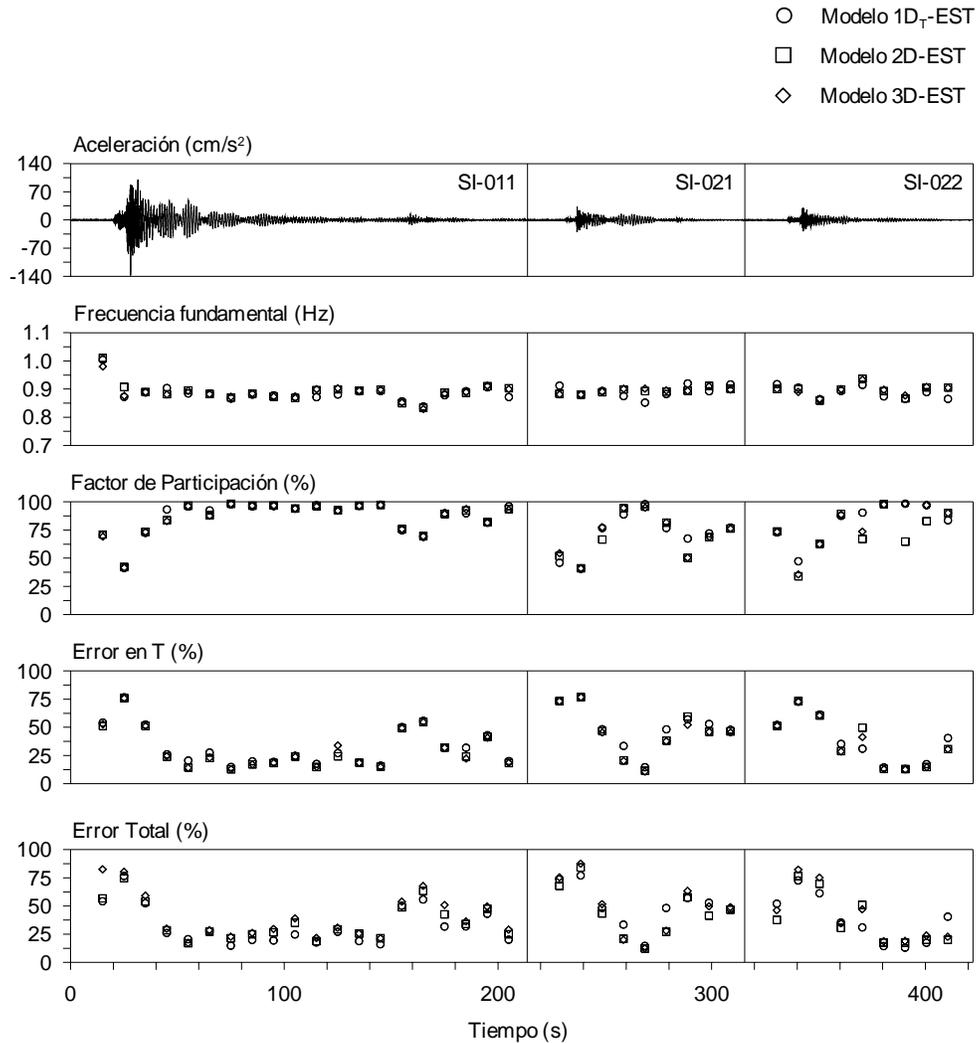
Para cotejar los resultados con respecto al trabajo hecho con el sistema en el capítulo anterior, si se comparan las frecuencias al final del evento SI-021 con las iniciales del evento SI-011, se obtiene que la reducción final en la estructura para estos dos eventos fue de 8, 13 y 3 %, en T, L y R, respectivamente. Valores que contrastan con las reducciones de 6, 6 y 13 % obtenidas en el sistema para igual comparación en los mismos componentes. Lo que indica que, al menos para estos dos eventos, hay diferencias entre las pérdidas de rigidez que se detectan en el sistema con respecto a las que se encuentran en la estructura.

Es importante resaltar que la variación de las frecuencias en el tiempo es muy baja. En general, los valores de desviación estándar no sobrepasan de 0.05 Hz. En especial en los movimientos de traslación, pasada la fase intensa del primer sismo, los valores se concentran alrededor de las frecuencias promedio y se puede decir que aun cuando en torsión las fluctuaciones son más notables, las reducciones finales no son importantes.

**Tabla 5.13 - Frecuencias de la estructura estimadas con los modelos 1D-EST, 2D-EST y 3D-EST para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

Evento	Dirección	Modelo	Frecuencias (Hz)						
			$f_{1-ini}$	$f_{1-fin}$	$f_{1-min}$	$f_{1-max}$	$f_{1-P}$	$f_{1-DE}$	
SI-011	T	1D <sub>T</sub> -EST	1.060	0.872	0.838	1.060	0.894	0.049	
		2D-EST	1.010	0.903	0.833	0.910	0.885	0.019	
		3D-EST	0.980	0.900	0.829	0.912	0.883	0.019	
	L	1D <sub>L</sub> -EST	1.521	1.247	1.131	1.521	1.219	0.094	
		2D-EST	1.390	1.266	1.141	1.329	1.210	0.044	
		3D-EST	1.410	1.268	1.145	1.343	1.211	0.046	
	R	3D-EST	1.480	1.409	1.346	1.455	1.384	0.025	
	SI-021	T	1D <sub>T</sub> -EST	0.920	0.917	0.852	0.920	0.894	0.023
			2D-EST	0.903	0.901	0.880	0.911	0.894	0.009
3D-EST			0.910	0.898	0.881	0.910	0.896	0.010	
L		1D <sub>L</sub> -EST	1.253	1.219	1.161	1.253	1.202	0.035	
		2D-EST	1.227	1.241	1.139	1.258	1.219	0.034	
		3D-EST	1.252	1.232	1.130	1.265	1.217	0.039	
R		3D-EST	1.379	1.430	1.361	1.430	1.384	0.022	
SI-022		T	1D <sub>T</sub> -EST	0.968	0.865	0.864	0.968	0.896	0.032
			2D-EST	0.901	0.905	0.859	0.937	0.897	0.021
	3D-EST		0.898	0.904	0.865	0.933	0.897	0.018	
	L	1D <sub>L</sub> -EST	1.239	1.276	1.152	1.276	1.208	0.044	
		2D-EST	1.216	1.273	1.158	1.273	1.202	0.037	
		3D-EST	1.201	1.271	1.170	1.271	1.211	0.037	
	R	3D-EST	1.420	1.428	1.408	1.466	1.431	0.018	

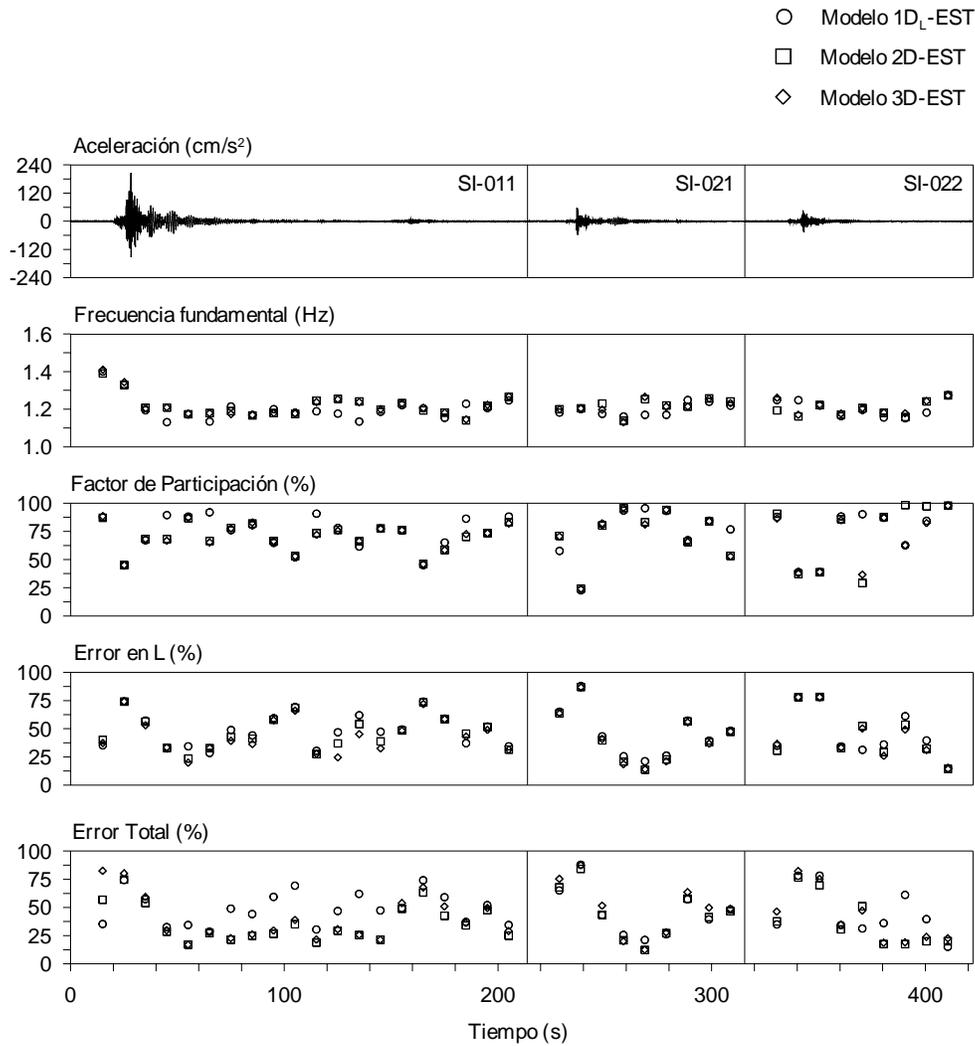
Los valores de cada ventana correspondientes a las figs 5.23 a 5.25 que aquí se resumen, se encuentran en las tablas B.16 a B.18.



**Fig 5.23 - Frecuencias fundamentales de la estructura en dirección T estimadas con los modelos 1D<sub>T</sub>-EST, 2D-EST y 3D-EST para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

Sobre los factores de participación puede decirse que, conforme la estructura entra en las etapas de vibración libre se hace más importante la participación de su modo fundamental. Los valores bajos que se observan en las primeras ventanas corresponden a etapas en las que seguramente la estructura responde predominantemente bajo la influencia de modos superiores, lo cual justifica los altos índices de error encontrados en estas ventanas.

A cerca de éstos últimos puede señalarse que, tanto en el componente T como en L se nota una correlación entre las amplitudes de las señales y los errores encontrados. Cuando se tienen mayores amplitudes los errores son menores y a su vez, los factores de participación son más altos. En general, los mayores errores se presentaron al comienzo de los eventos y en los modelos planos. Los modelos 2D-EST y 3D-EST mostraron conducir a mejores ajustes. Lo anterior puede ser corroborado de mejor manera si se observan las figs C.7 a C.27, no solo para las ventanas de interés sino también en el contenido de frecuencia encontrado.

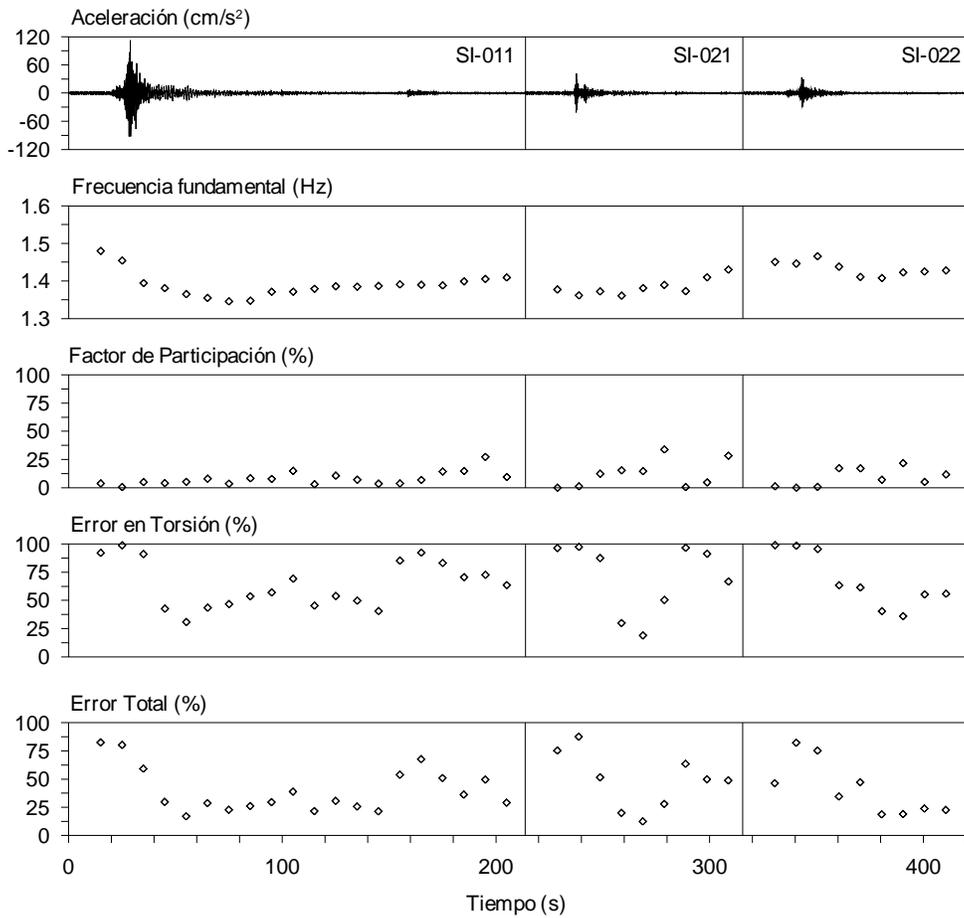


**Fig 5.24 - Frecuencias fundamentales de la estructura en dirección L estimadas con los modelos 1D<sub>L</sub>-EST, 2D-EST y 3D-EST para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

Para la identificación de las frecuencias de cabeceo se utilizaron tres diferentes modelos, dos de ellos para los procesos en una sola dirección (el modelo 1D<sub>T</sub>-CAB para el componente transversal y el modelo 1D<sub>L</sub>-CAB para el componente longitudinal) y un tercero en el que se combinaron los dos componentes (2D-CAB).

En una primera etapa se utilizaron las señales de excitación y de respuesta tal como se describen en la tabla 3.4 utilizando ventanas de 10 s. Pero de acuerdo con los resultados que éstos arrojaban en algunos casos se debió optar por utilizar ventanas de 5 s o realizar procesos de filtrado a las señales de respuesta.

Para cada modelo se estimaron hasta diez frecuencias o hasta alcanzar índices de error por debajo de 40 %. De cada uno de estos valores de frecuencia identificados, se calculó su factor de participación en la respuesta total de cabeceo. Los resultados de cada uno de los diferentes modelos y sus respectivas variaciones en el tamaño de las ventanas o por la utilización de respuestas filtradas, se enseñan detalladamente en las tablas B.19 a B.38. Los ajustes entre las señales calculadas y las respuestas medidas experimentalmente se presentan para dos ventanas representativas de altos y bajos índices de error, acompañadas de una comparación entre los espectros de amplitudes de Fourier de ambas respuestas, en las figs C.28 a C.47.



**Fig 5.25 - Frecuencias fundamentales de la estructura en torsión estimadas con el modelo 3D-EST para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

Las figs 5.26 a 5.45 muestran los resultados de las frecuencias identificadas (cada una asociada a su valor de participación), la suma del factor de participación de todas las frecuencias identificadas en una misma ventana y el error relativo del ajuste de la respuesta en estudio. En la parte superior se presenta la respuesta relativa utilizada en el análisis.

Conviene anotar que en las figuras mencionadas, en lo que se refiere a los valores de las frecuencias identificadas, se utilizó un tipo de gráfica tal que el tamaño de cada círculo representa el factor de participación de la frecuencia a la cual está asociado. La ubicación de dichos círculos corresponde a la ventana a la cual corresponde y al valor mismo de la frecuencia en Hz. Como referencia sobre la escala de tamaño de los factores de participación de las frecuencias, en la esquina superior derecha del recuadro se presentan dos círculos rellenos cuyo tamaño representa factores de 25 y 50 %.

En las figs 5.26 y 5.27 se presentan los resultados obtenidos con los modelos 1D<sub>T</sub>-CAB y 2D-CAB correspondientes al componente T para el evento SI-011. Por su parte, las figs 5.29 y 5.30 enseñan en el mismo orden, los resultados obtenidos para el componente L con los modelos 1D<sub>L</sub>-CAB y 2D-CAB para el mismo evento. Todos ellos utilizando ventanas de 10 s.

Se observó que el modelo 2D-CAB arrojó valores de índices de error no deseados (superiores a 40 %), además de que al comparar las señales y sus contenidos frecuenciales (figs C.29 y C.32), el ajuste no se

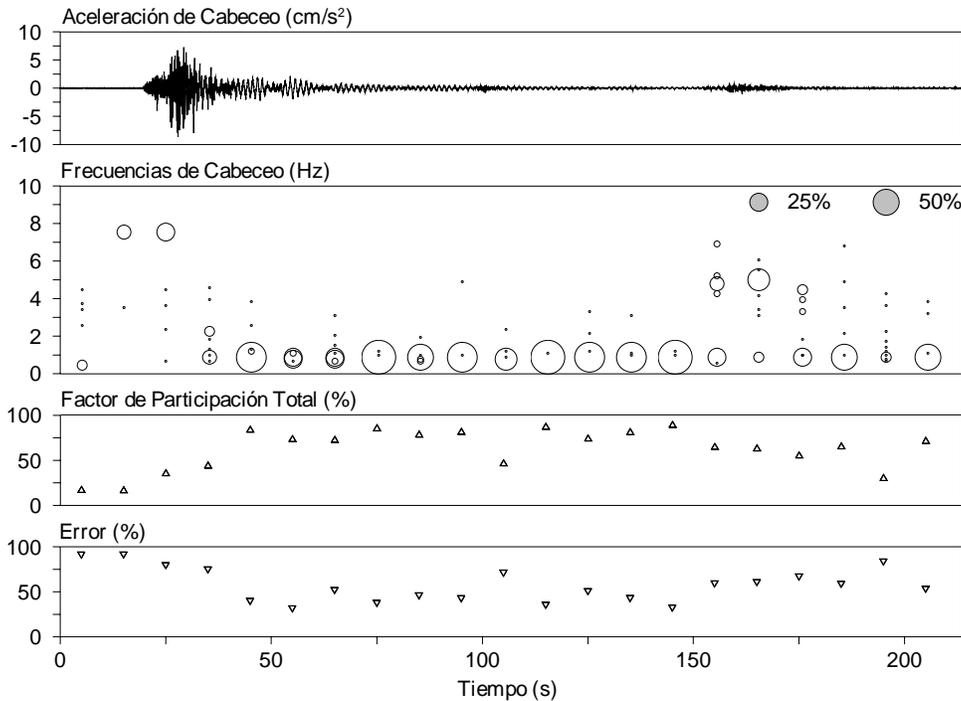
encontró satisfactorio. Por lo tanto se optó por calcular adicionalmente los parámetros, utilizando ventanas de 5 s, cuyos resultados para los componentes T y L se presentan en las figs 5.28 y 5.31, respectivamente. Los resultados mejoraron como era deseado.

En estos modelos se notó que en ambas direcciones, aquellas frecuencias asociadas con los mayores factores de participación se concentraban prácticamente en los mismos valores de frecuencias identificadas para los movimientos de traslación del sistema. Por encima de estas aparece un pequeño grupo escasamente visible con muy bajos factores de participación entre 1.5 y 3.0 Hz, tras los cuales aparecen con moderados a bajos factores de participación distintos grupos de frecuencia, alrededor de 5.0 y 8.0 Hz, relacionados en general con las fases intensas de los eventos y al parecer con los modos superiores del sistema.

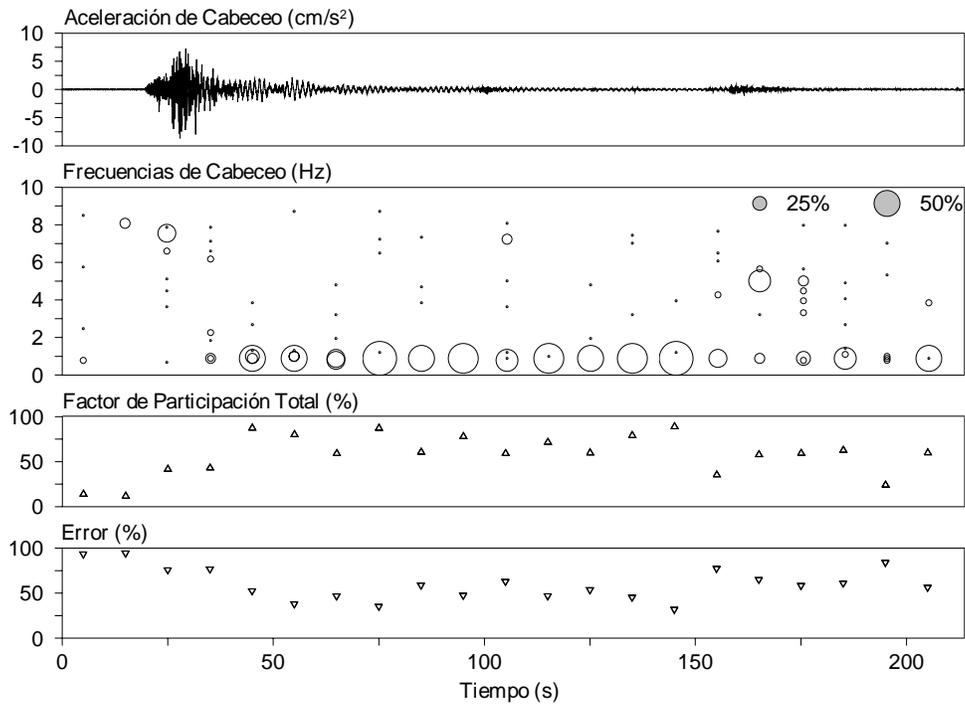
Esta influencia en las señales de cabeceo ya se había señalado en el caso de los cocientes de transferencia entre las señales verticales de los costados del sótano con respecto a la señal del centro en el análisis espectral, en cuyo caso se contaba con la posibilidad de apelar a otros cocientes en los cuales se lograra aislar este predominio. En este caso, la alternativa propuesta fue aplicar filtrados a las señales de respuesta, para eliminar los contenidos de frecuencia de los modos fundamentales del sistema y la presencia del contenido de frecuencias por encima de 10 Hz, el cual influye de manera significativa en los índices de error.

Se aplicaron entonces filtros paso banda sobre las señales de respuesta de cada uno de los modelos, con límites inferior y superior de 1.8 y 9.0 Hz. Estos límites se definieron de acuerdo con las observaciones hechas en los procesos de identificación por métodos no paramétricos. Para cada modelo, con el fin de diferenciar los nuevos procesos de los anteriores, dichos límites se indican al final del nombre entre paréntesis y precedidos de la letra *F*, en forma de subíndice.

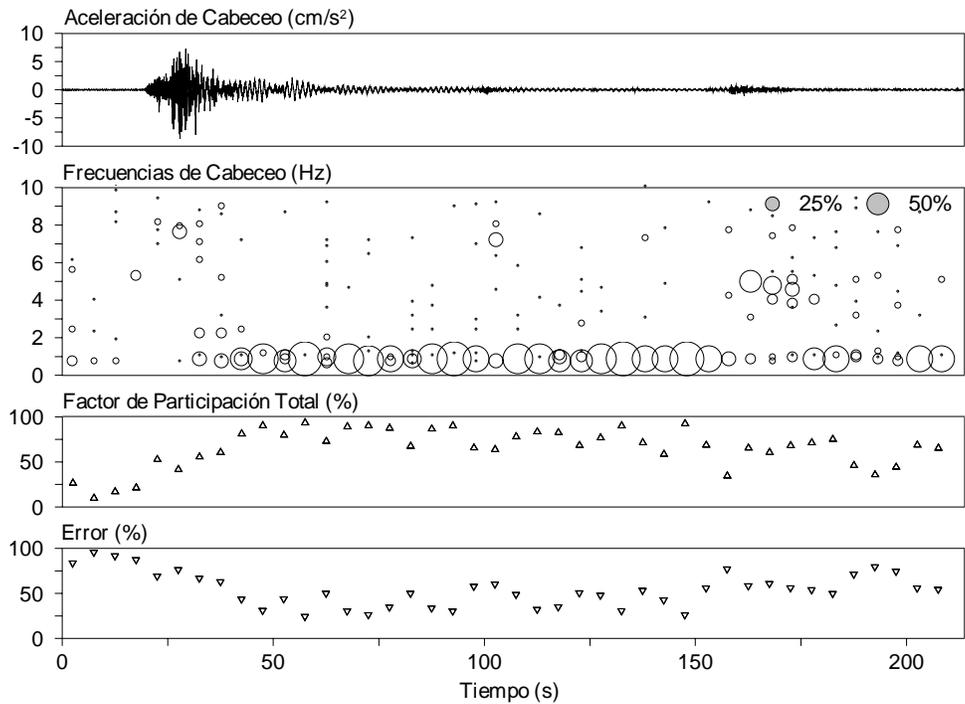
En las figs 5.32 y 5.35 se presentan los resultados obtenidos con los modelos modificados  $1D_T-CAB_{F(1.8-9.0)}$  y  $1D_L-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 procesado con ventanas de 10 s para los componentes T y L,



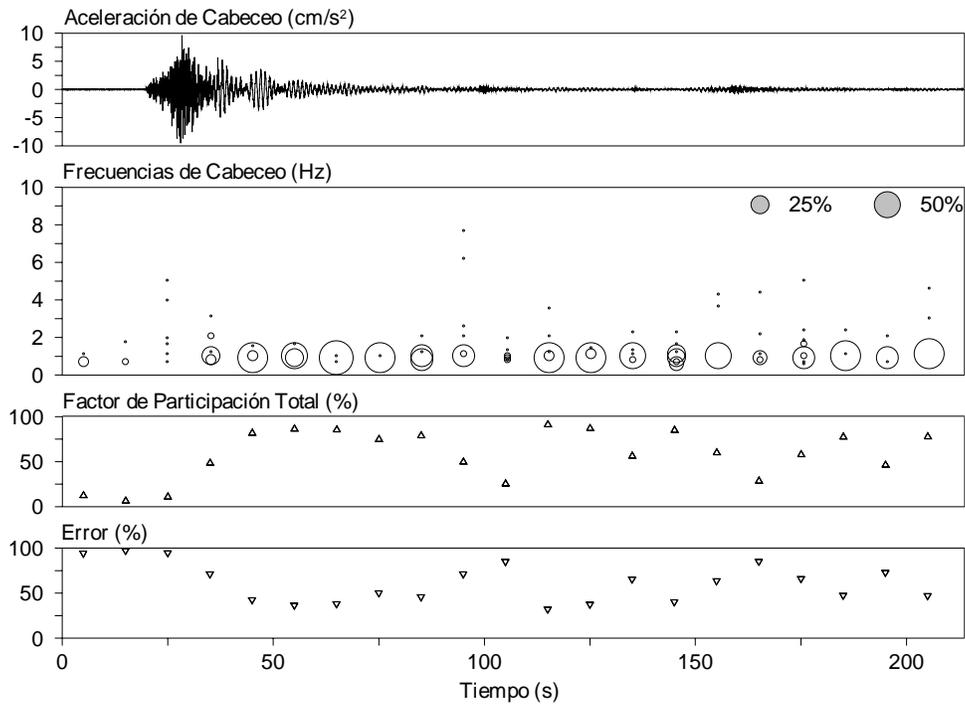
**Fig 5.26 - Frecuencias de cabeceo en dirección T estimadas con el modelo  $1D_T-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**



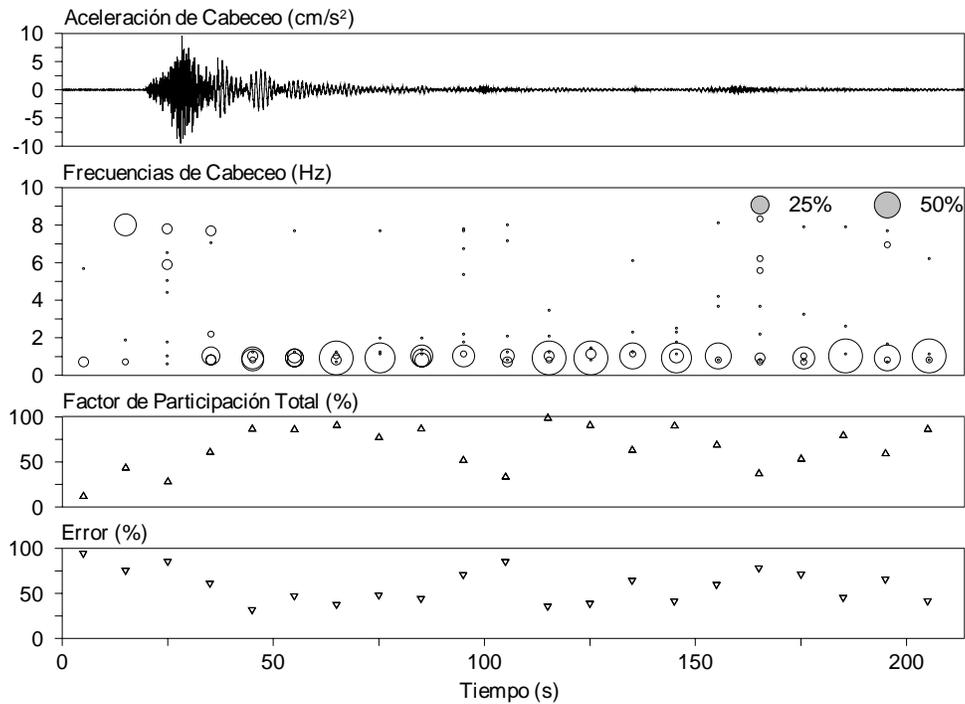
**Fig 5.27 - Frecuencias de cabeceo en dirección T estimadas con el modelo 2D-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**



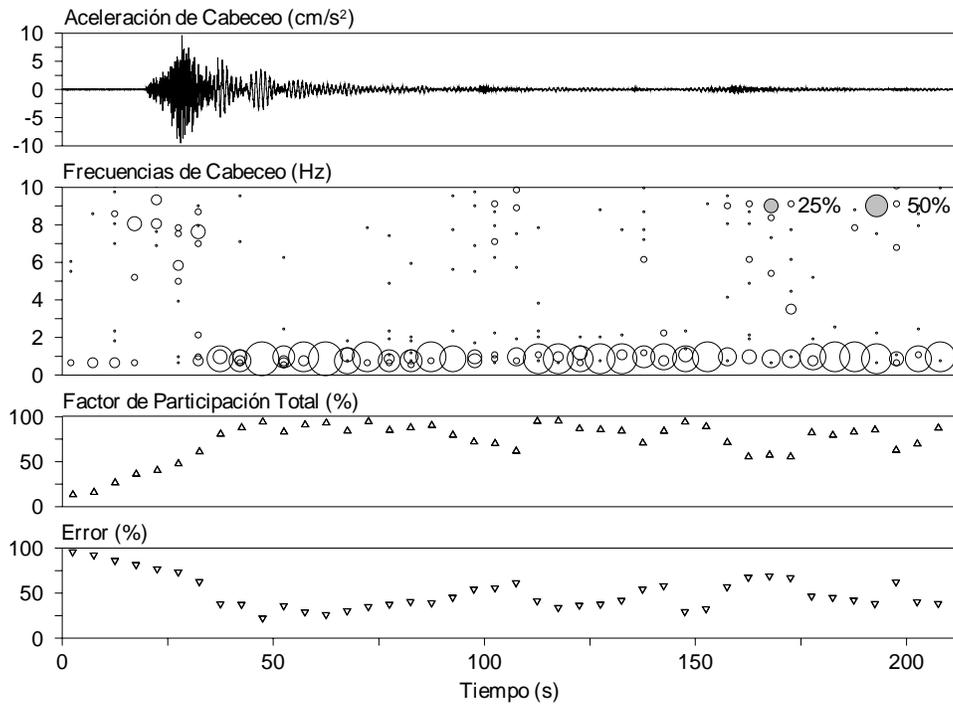
**Fig 5.28 - Frecuencias de cabeceo en dirección T estimadas con el modelo 2D-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**



**Fig 5.29 - Frecuencias de cabeceo en dirección L estimadas con el modelo 1D<sub>L</sub>-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**



**Fig 5.30 - Frecuencias de cabeceo en dirección L estimadas con el modelo 2D-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**



**Fig 5.31 - Frecuencias de cabeceo en dirección L estimadas con el modelo 2D-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**

respectivamente. Debido al gran número de frecuencias identificadas y a que para todas se encontraban factores de participación de moderados a bajos, el proceso de ajuste fue sumamente laborioso aun sin lograr llegar a índices de error menores 60 %. El ajuste por lo tanto no fue satisfactorio ni en el tiempo ni en el contenido de frecuencias, tal como puede verse en las figs C.34 y C.37.

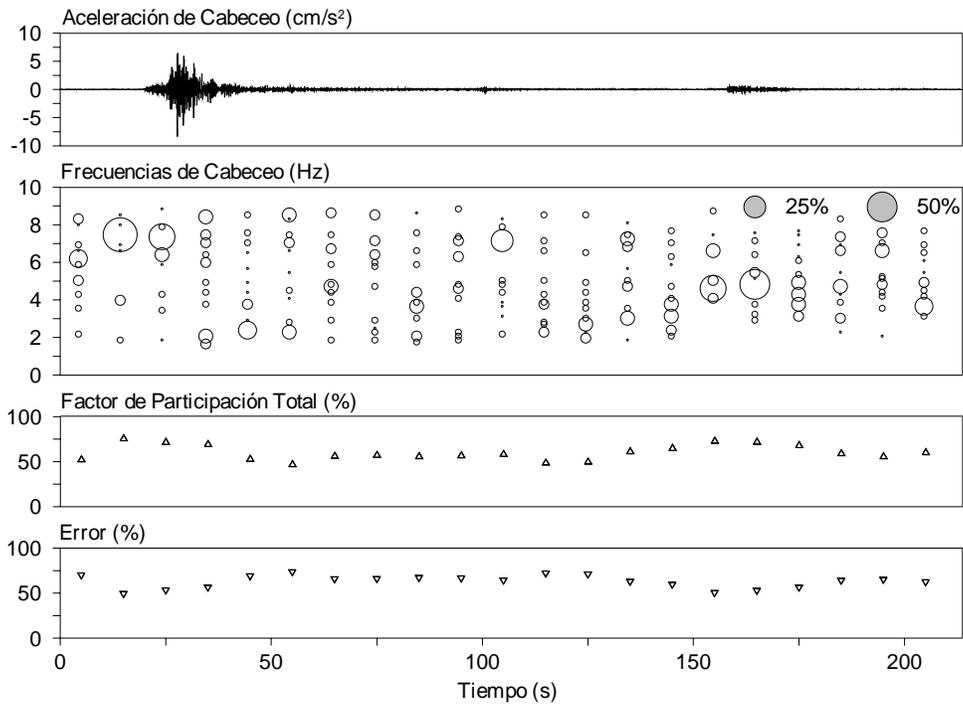
Por lo tanto fue necesario reproducir la identificación con estos mismos modelos y para el mismo evento, pero en esta ocasión utilizando ventanas de 5 s, cuyos resultados se enseñan en las figs 5.33 y 5.36. En las cuales puede verse como fue posible alcanzar valores de error inferiores a un 50 %, un límite que si bien no es el deseado, puede notarse condujo a ajustes mucho mejores como los que se muestran en las figs C.35 y C.38.

El mismo proceso de filtrado, pero en esta ocasión operado directamente con ventanas de 5 s, se realizó en el caso bidimensional para obtener el modelo  $2D-CAB_{F(1.8-9.0)}$ , cuyos resultados para los componentes T y L pueden ser vistos en las figs 5.34 y 5.37, respectivamente. Los índices de error se enseñan en las mismas figuras y se pueden encontrar en las figs C.36 y C.39.

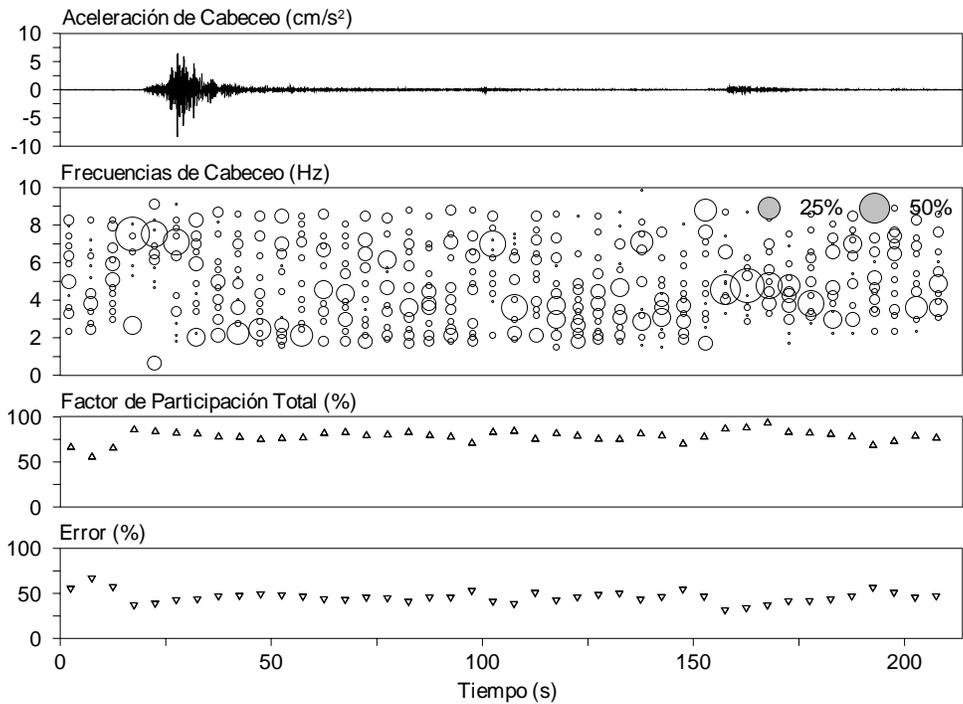
Los valores detallados de las frecuencias, factores de participación y errores relativos, correspondientes a éstas gráficas se encuentran en el mismo orden en las tablas B.25 a B.30.

Para ambos componentes de movimiento se observó que en los modelos en una sola dirección se identifica una gran variedad de frecuencias con factores de participación de mediana importancia que posteriormente, en el análisis con el modelo  $2D-CAB_{F(1.8-9.0)}$  esclarecen su influencia en cada una de las componentes, es decir, participan definitivamente solo en una de las dos direcciones, mientras que en la otra aparecen luego con participaciones bajas, fruto únicamente de los efectos de acoplamiento.

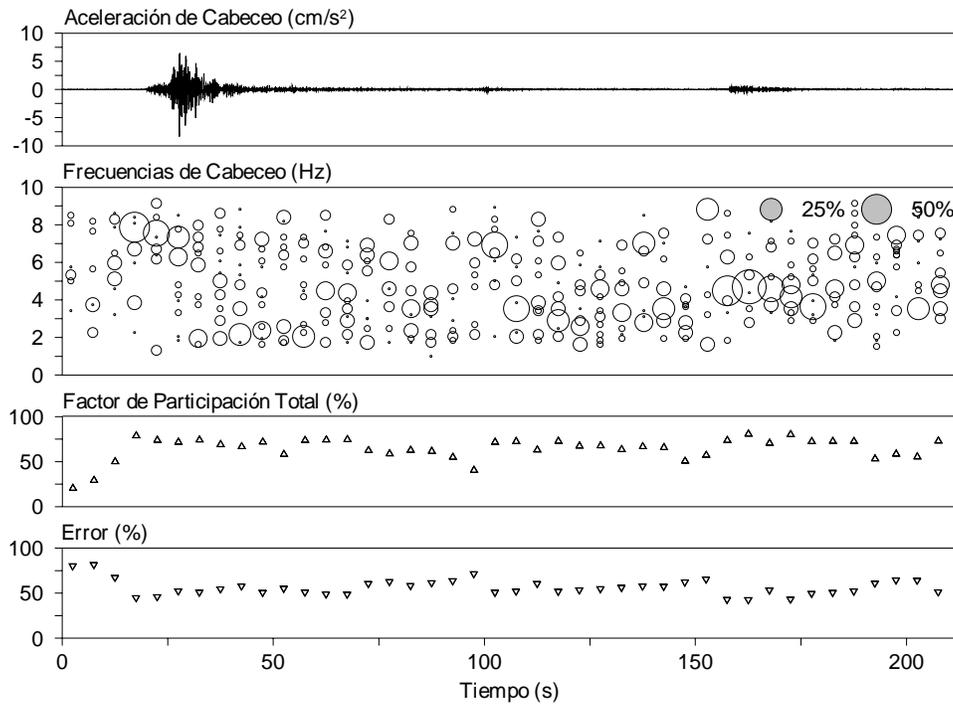
Dado lo anterior conviene entonces resaltar las siguientes observaciones sobre los resultados en cada uno de los dos componentes en el modelo  $2D-CAB_{F(1.8-9.0)}$ .



**Fig 5.32 - Frecuencias de cabeceo en dirección T estimadas con el modelo  $1D_T-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**



**Fig 5.33 - Frecuencias de cabeceo en dirección T estimadas con el modelo  $1D_T-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**



**Fig 5.34 - Frecuencias de cabeceo en dirección  $T$  estimadas con el modelo  $2D-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**

En dirección  $T$  se distinguen alrededor de cuatro intervalos con participaciones relevantes (fig 5.34). El primero de ellos corresponde a frecuencias entre 1.5 y 3.0 Hz aproximadamente, y su influencia se hace notable pasadas las máximas amplitudes en la aceleración y durante el período de vibración libre del sistema, es decir, entre 30 y 160 s aproximadamente.

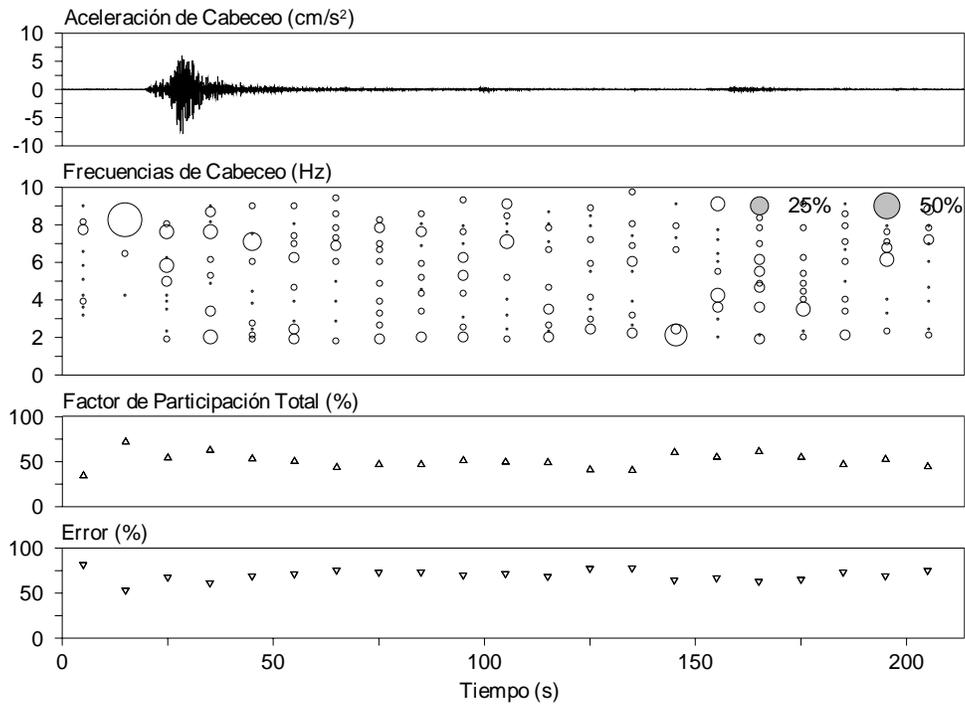
Si se observa que el sismo SI-011 esta compuesto por dos sub-eventos, el primero comprendido de 0 a 150 s aproximadamente, y el tercero, en el tiempo restante del registro, se encuentra que el segundo intervalo de frecuencias se ubica entre 3.0 y 4.0 Hz para la fase final del primer sub-evento. Mientras que el tercer intervalo de frecuencias, con importantes factores de participación, corresponde a la fase intensa del segundo sub-evento, entre 4.0 y 5.0 Hz, aproximadamente.

Por su parte, el cuarto y último intervalo de frecuencias, el cual se ubica principalmente en la fase inicial del evento, con esporádicas apariciones en aquellos puntos caracterizados por la presencia de amplitudes importantes en la aceleración, se caracteriza por frecuencias entre 7.0 y 9.0 Hz.

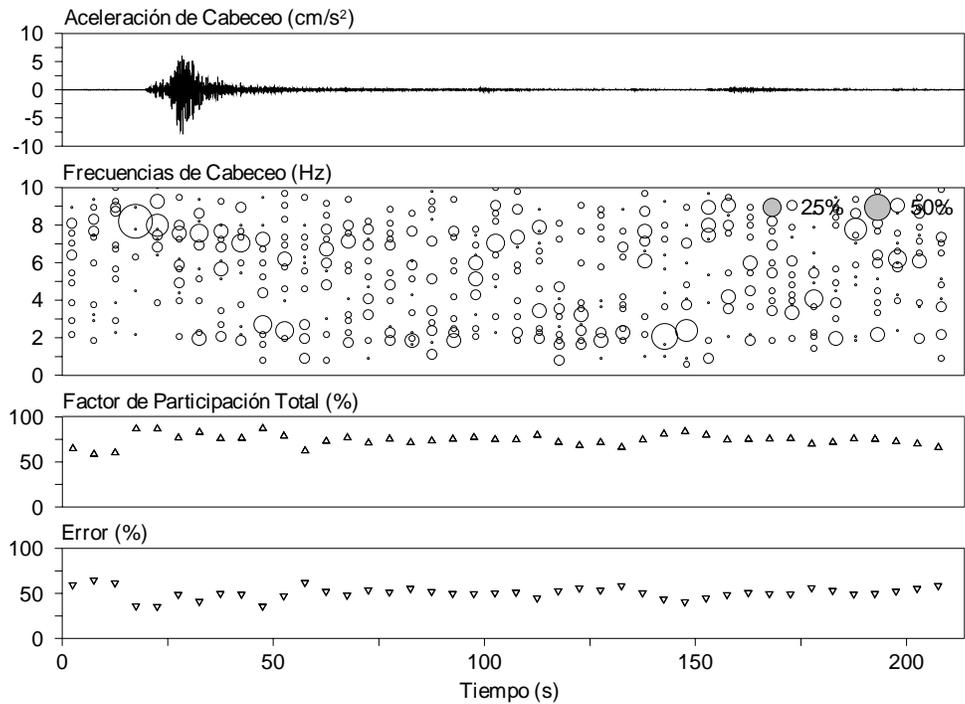
En cuanto al componente  $L$  se logra identificar claramente tres intervalos de frecuencias asociadas con el movimiento de cabeceo en el evento SI-011 (fig 5.37). El primero de ellos revela frecuencias oscilando de 2.0 a 3.0 Hz en el lapso de tiempo que va desde 40 hasta 150 s con factores de participación entre 5 y 20 %.

El segundo intervalo se presenta ante la aparición del segundo sub-evento, para frecuencias entre 3.0 y 5.0 Hz aproximadamente. Mientras que el tercer intervalo de frecuencias identificado se ubica entre 7.0 y 9.0 Hz, principalmente en los primeros 80 s del sismo y entre 140 y 200 s.

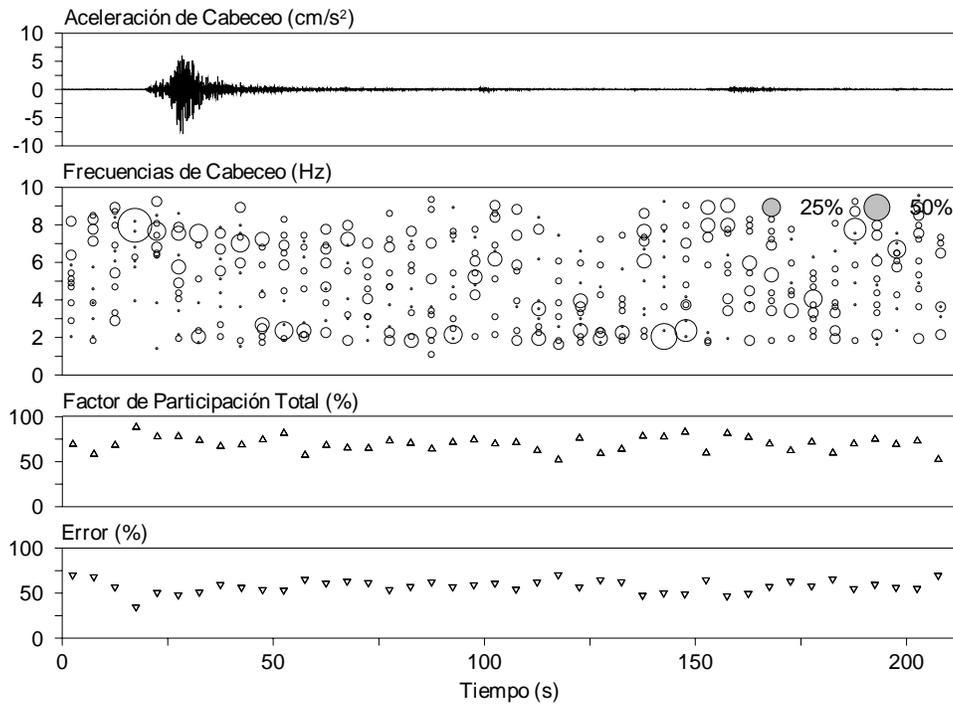
Antes de continuar debe mencionarse que, aunque para ambos componentes de movimiento los índices de error determinados para el modelo  $2D-CAB_{F(1.8-9.0)}$  en general no lograron llevarse por debajo de 50 %, aun



**Fig 5.35 - Frecuencias de cabeceo en dirección L estimadas con el modelo  $1D_L-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**



**Fig 5.36 - Frecuencias de cabeceo en dirección L estimadas con el modelo  $1D_L-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**



**Fig 5.37 - Frecuencias de cabeceo en dirección L estimadas con el modelo  $2D-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**

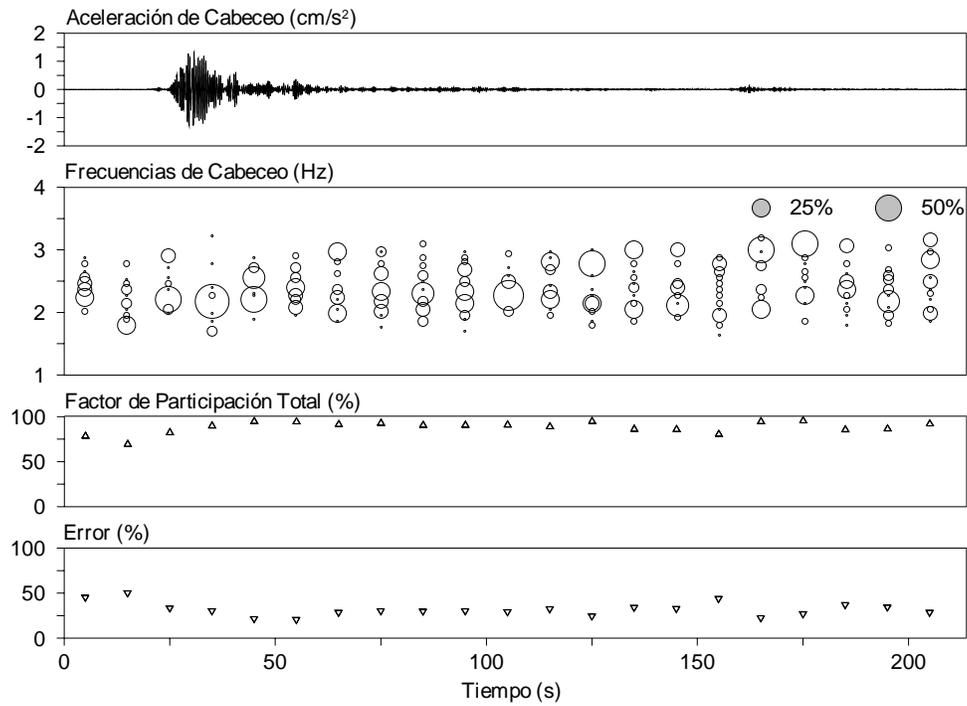
cuando se utilizaron ventanas de 5 s, los resultados encontrados tienen validez puesto que, como se observa en las figs C.36 y C.39, el ajuste de las señales y especialmente el de los espectros de amplitudes de Fourier, tanto en los valores de frecuencia como en sus ordenadas máximas, fue satisfactorio.

De acuerdo con los resultados identificados en el análisis espectral con las funciones de transferencia  $FT_c$ , los valores de frecuencia obtenidos con el método simplificado de Luco (1980), así como las interesantes observaciones que pudieron obtenerse de los modelos con señales de respuesta filtradas, y teniendo en cuenta que en el modelo  $2D-CAB_{F(1.8-9.0)}$  se identificaron intervalos entre 1.5 y 3.0 Hz para el componente T y entre 2.0 y 3.0 Hz para el componente L, interesó realizar un nuevo proceso de filtrado en el que se aislara esta franja de frecuencias.

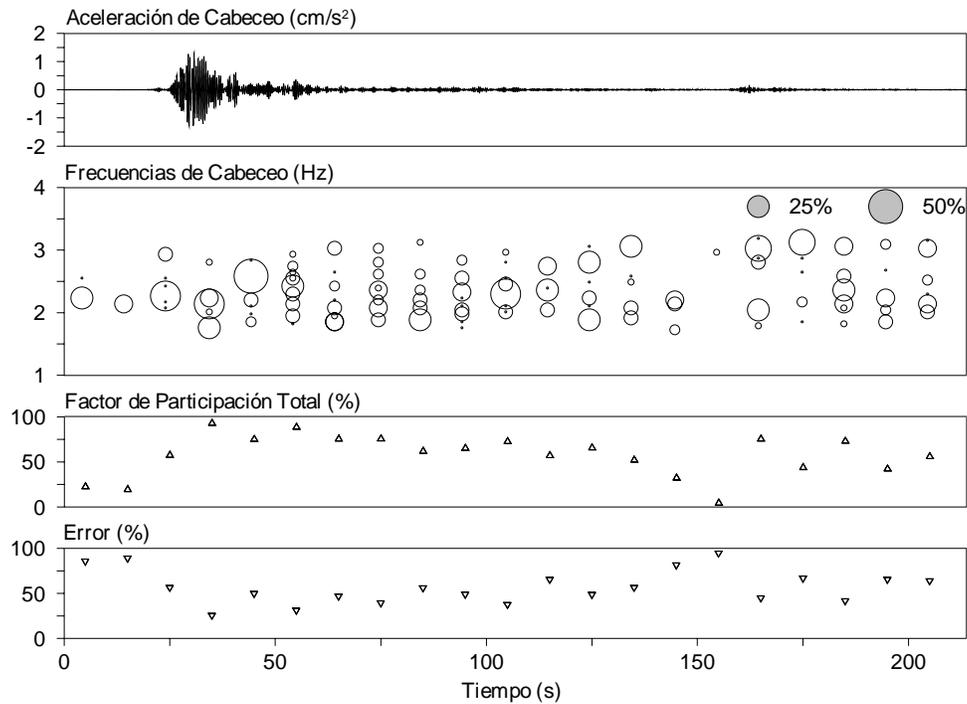
De esta manera, para el evento SI-011 se calcularon los registros de salida con filtrados paso banda entre 1.8 y 3.0 Hz para ambas direcciones, con lo cual se obtuvieron los modelos  $1D_T-CAB_{F(1.8-3.0)}$ ,  $1D_L-CAB_{F(1.8-3.0)}$  y  $2D-CAB_{F(1.8-3.0)}$ . Este último se desarrolló adicionalmente para los eventos SI-021 y SI-022. Los resultados para los tres eventos se presentan en las figs 5.38 a 5.45.

Debe indicarse que para los tres modelos mencionados, en el caso del evento SI-011 se utilizaron ventanas de 10 s de longitud, mientras que para los sismos SI-021 y SI-022 se realizó el proceso de identificación en segmentos de 5 s.

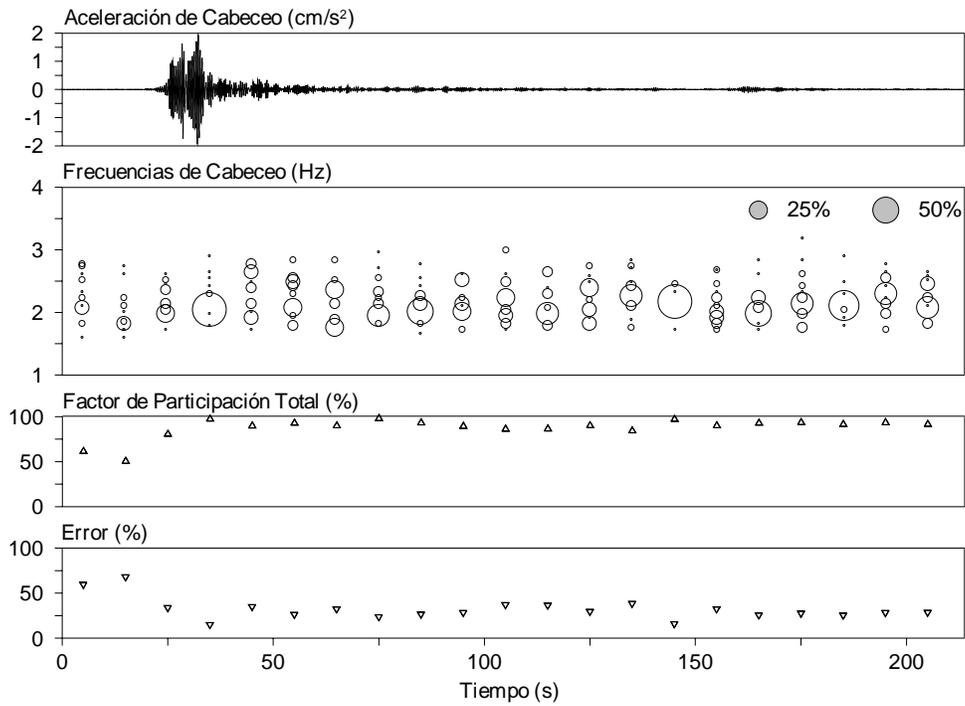
En todos los casos los índices de error fueron bajos y se alcanzaron altos valores de factor de participación total. Las características identificadas en cada ventana se detallan en las tablas B.31 a B.38 y los ajustes de las señales obtenidas pueden verse para cada una de las direcciones y eventos en las figs C.40 a C.47.



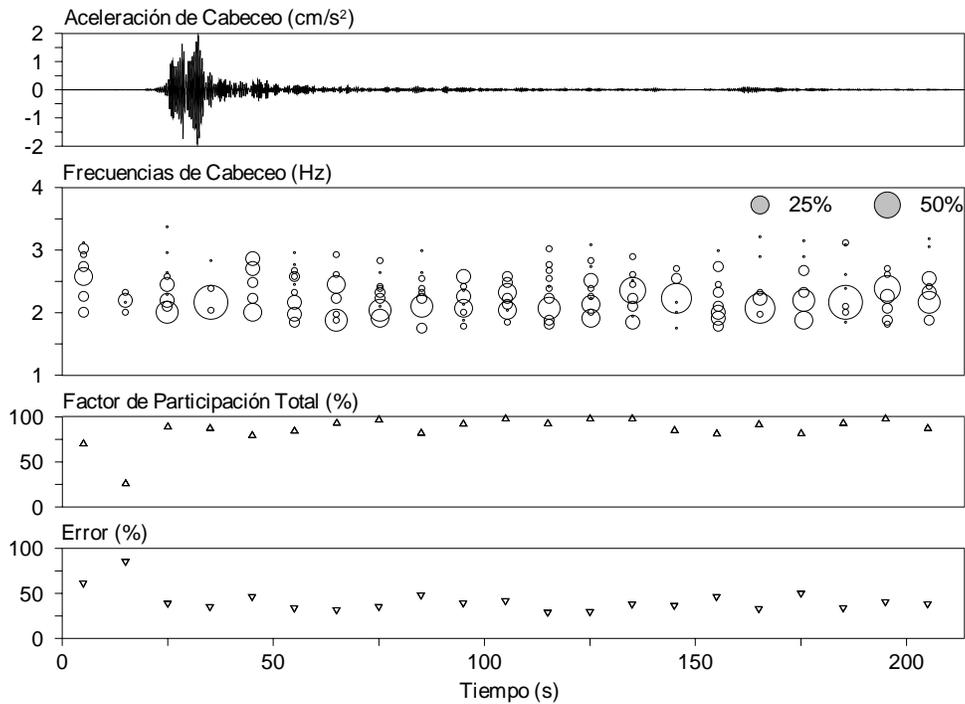
**Fig 5.38 - Frecuencias de cabeceo en dirección T estimadas con el modelo 1D<sub>T</sub>-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**



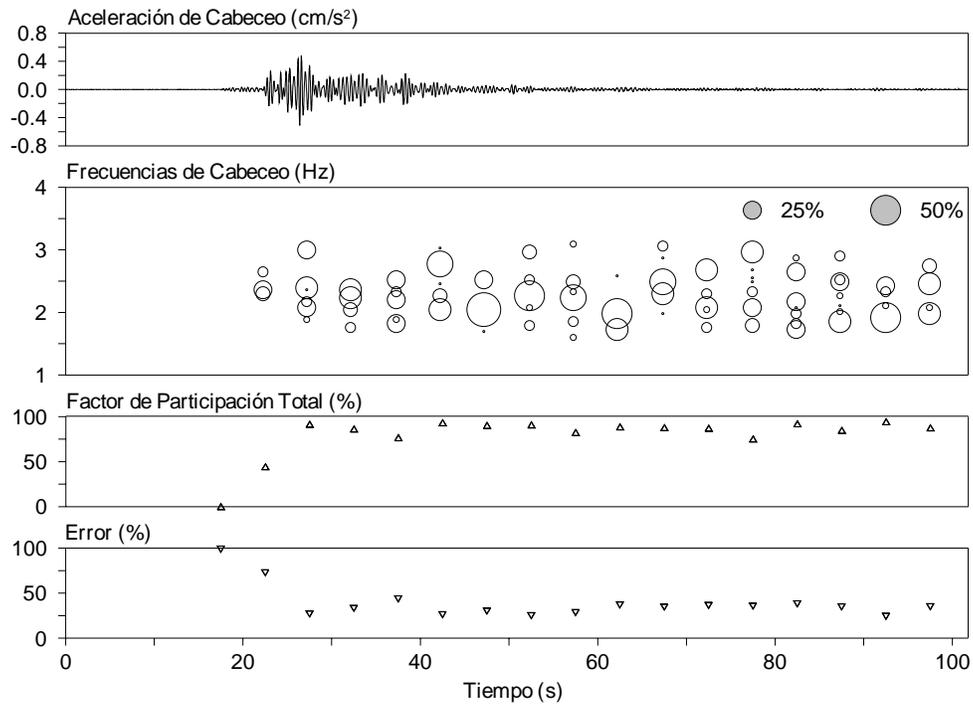
**Fig 5.39 - Frecuencias de cabeceo en dirección T estimadas con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**



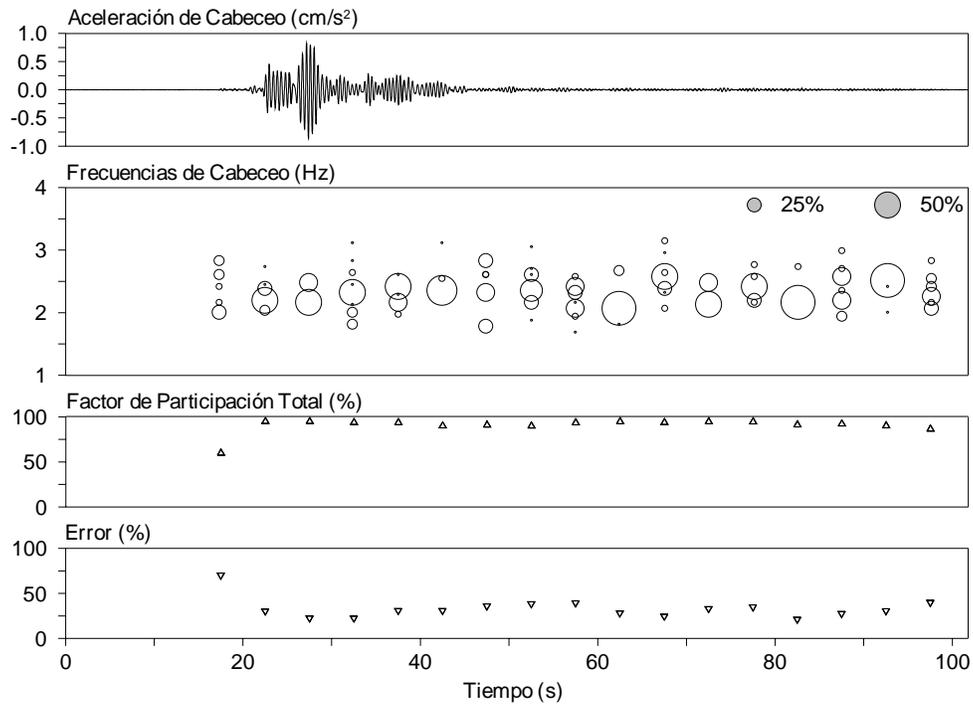
**Fig 5.40 - Frecuencias de cabeceo en dirección L estimadas con el modelo 1D<sub>L</sub>-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**



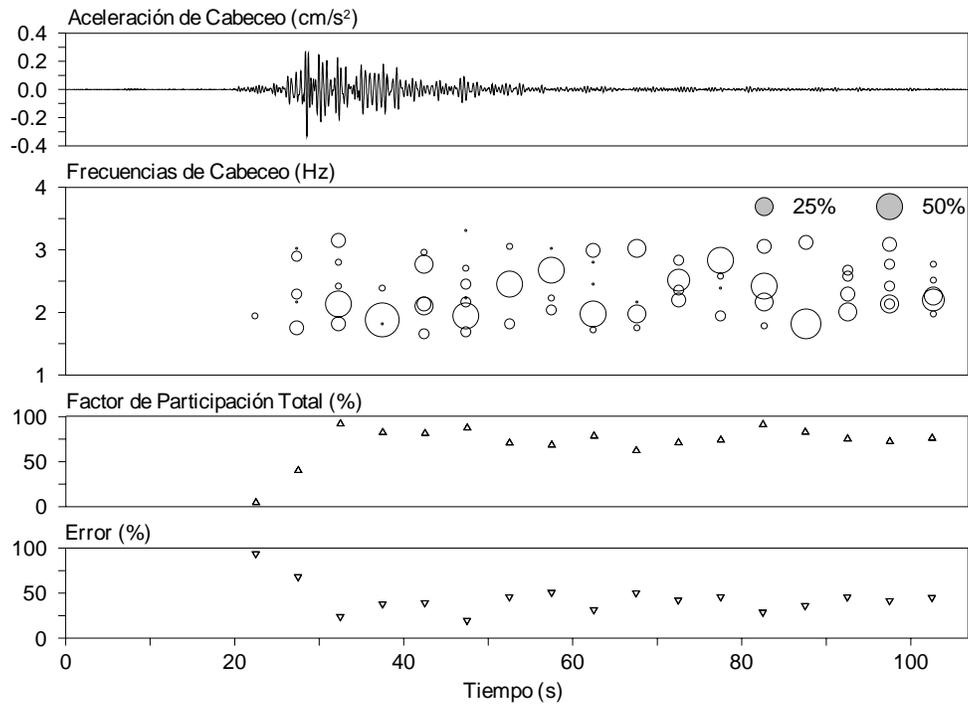
**Fig 5.41 - Frecuencias de cabeceo en dirección L estimadas con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**



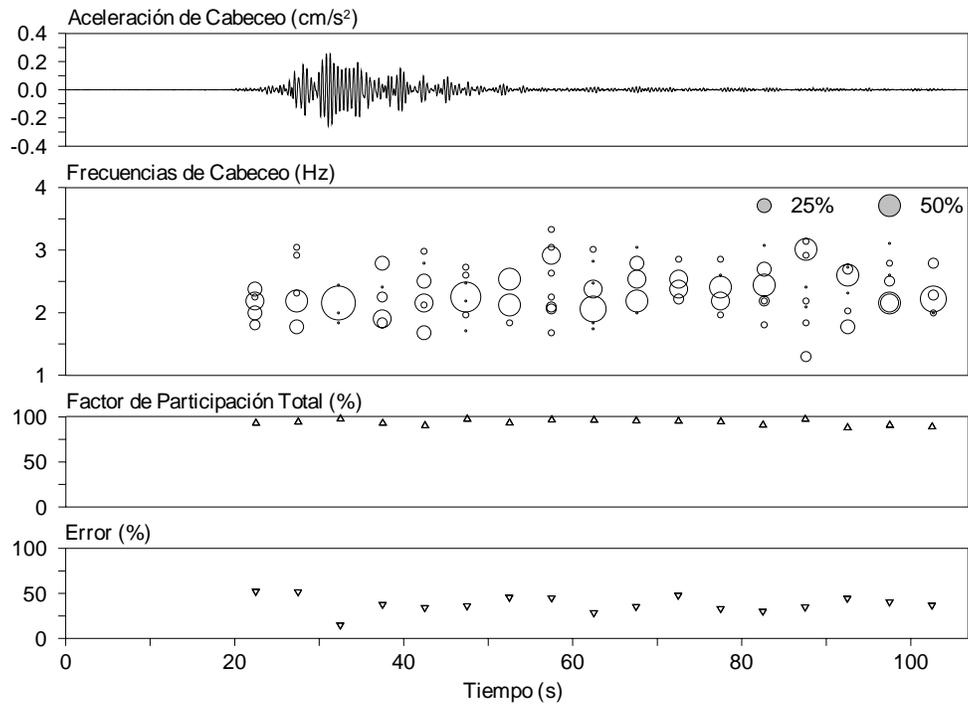
**Fig 5.42 - Frecuencias de cabeceo en dirección T estimadas con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-021 en un análisis con ventanas de 5 s**



**Fig 5.43 - Frecuencias de cabeceo en dirección L estimadas con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-021 en un análisis con ventanas de 5 s**



**Fig 5.44 - Frecuencias de cabeceo en dirección T estimadas con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-022 en un análisis con ventanas de 5 s**



**Fig 5.45 - Frecuencias de cabeceo en dirección L estimadas con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-022 en un análisis con ventanas de 5 s**

Una vez hecho el filtrado es evidente que los valores identificados se encontrarán dentro de los límites impuestos, mas lo importante en estos modelos es observar la existencia de frecuencias que absorban altos porcentajes de participación, de manera que evidencien que en efecto son características del movimiento de cabeceo.

Resultados como el que se observa en la ventana correspondiente al intervalo entre 150 y 160 s en el evento SI-011 para el modelo unidimensional en el componente T (fig 5.38), en el cual se hallan múltiples valores con bajos factores de participación indican que para dicha ventana la frecuencia de cabeceo no se encuentra dentro del intervalo del filtrado, lo cual se ve confirmado de manera más evidente en el modelo bidimensional para el mismo componente (fig 5.39) donde precisamente no se logró identificar ninguna frecuencia de importancia.

De acuerdo con lo anterior interesa entonces analizar los cambios para las frecuencias con mayores factores de participación durante cada uno de los eventos, acerca de los cuales pueden hacer las siguientes observaciones:

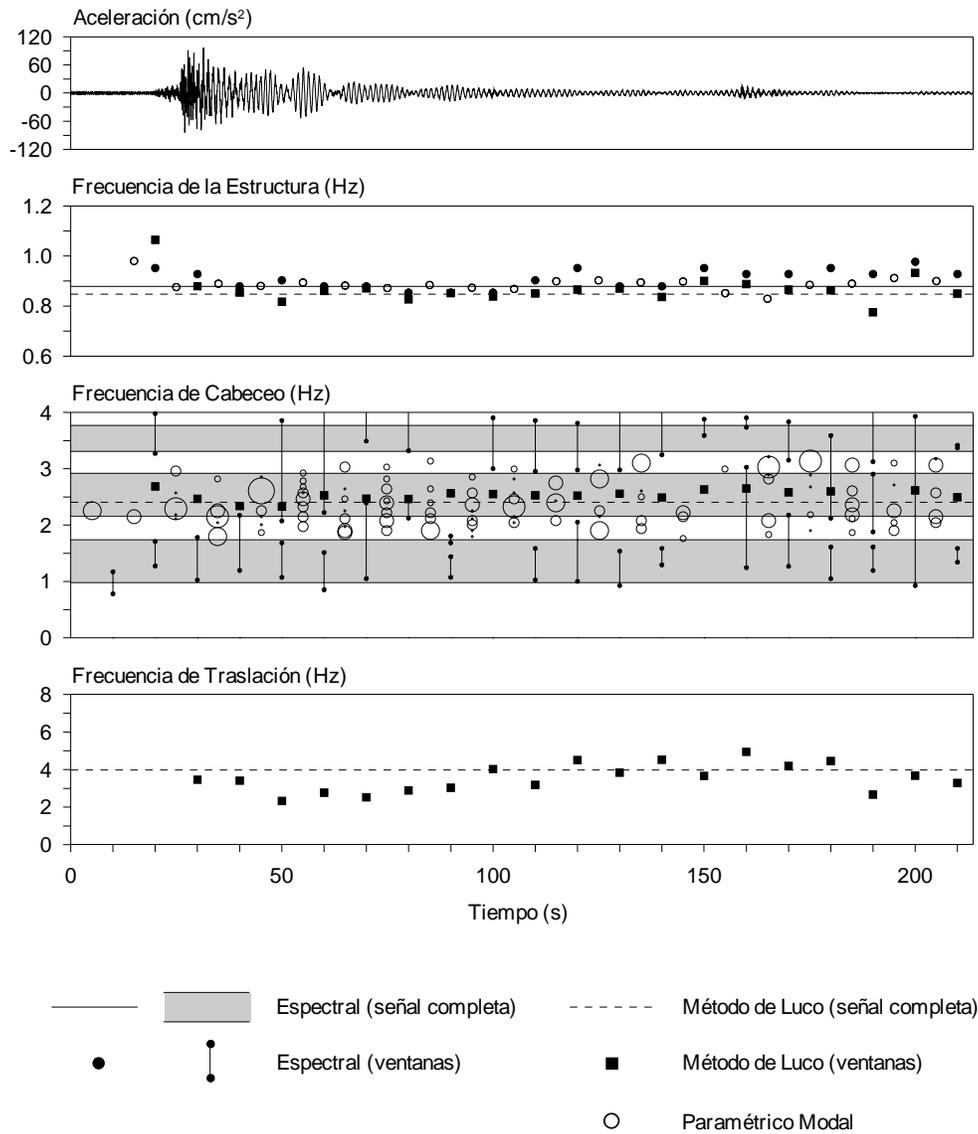
- Al parecer no se encuentra relación alguna entre el movimiento y las fluctuaciones de los valores de frecuencia. En ocasiones los valores mínimos se asocian con las fases intensas de los eventos tal como se observó para los casos de las frecuencias del sistema o la estructura (por ejemplo en el componente T para el evento SI-022), mientras que en otros por el contrario, dichas frecuencias se hallan precisamente en las etapas de menores amplitudes (sismo SI-021 en la dirección L).
- Por su parte, los factores de participación tampoco parecen estar relacionados con las amplitudes del movimiento, ya que en algunos casos como en el evento SI-011 en el componente longitudinal, las frecuencias con mayores factores de participación se ubicaron en la fase intensa del evento, mientras que en otros, como sucede para el evento SI-021 para ambas componentes, las frecuencias con mayor intervención se ubican pasada la fase intensa del sismo
- Adicionalmente, se observa que para cada ventana en general no se encuentra un único valor predominante de frecuencia, sino que en algunos casos son dos o más las frecuencias que caracterizan el movimiento, tal como ocurre por ejemplo en las últimas cinco ventanas del componente T en el evento SI-011 (figs 5.38 y 5.39).

Las fluctuaciones sin patrón con el movimiento y la gran variedad de frecuencias identificadas, sumadas al hecho de que estas características se presentan tanto en el evento más intenso (SI-011) como en dos de baja intensidad (SI-021 y SI-022), son evidencia de la existencia de un comportamiento no lineal en el sistema, presente en su componente de cabeceo.

### 5.1.5 Comparaciones y comentarios

Con la intención de evaluar los resultados obtenidos con cada uno de los métodos y para llegar a interpretaciones finales sobre las propiedades detectadas para la estructura con base empotrada y los componentes de traslación y cabeceo en la base, se presenta en lo que sigue un conjunto de gráficas en las cuales se comparan los diferentes métodos utilizados. Se excluyen los valores de frecuencias derivados de la aplicación del método de cruces por cero por los escasos resultados logrados.

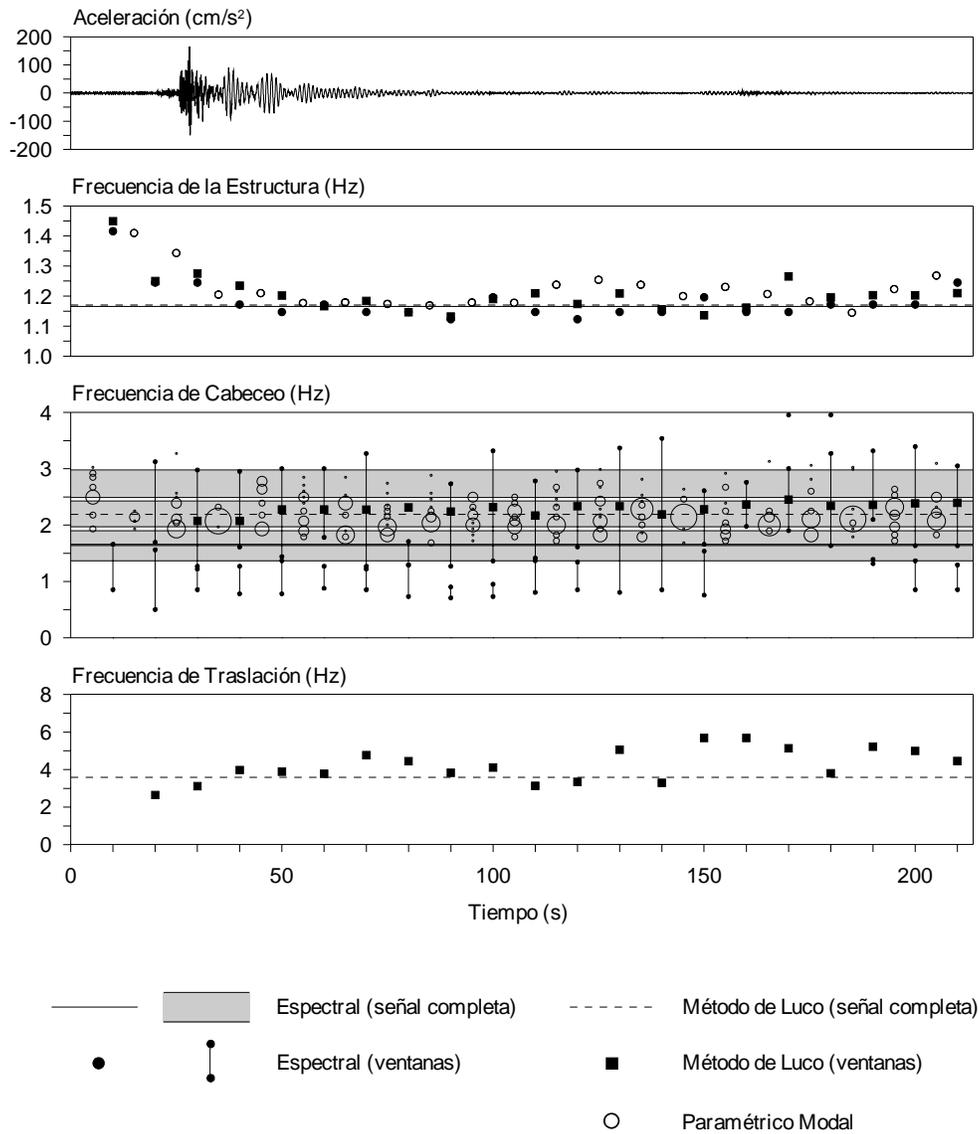
En las figs 5.46 a 5.51 se presentan los resultados obtenidos para los tres eventos seleccionados en cada uno de los dos componentes de traslación. En la parte superior, se muestra la señal de aceleración registrada en la azotea y en el siguiente recuadro se presentan las frecuencias de la estructura estimadas con las función de transferencia  $FT_e$  para la señal completa (línea continua) y para el proceso por ventanas (círculos rellenos), además de los resultados obtenidos por el método de Luco para el análisis espectral de la señal completa



**Fig 5.46 - Comparación de las frecuencias identificadas en el componente T para el evento SI-011**

(línea discontinua) y por ventanas (cuadros rellenos). Todos estos, comparados con los resultados obtenidos mediante el análisis paramétrico modal con el modelo 3D-EST (círculos vacíos).

El tercer recuadro muestra una comparación entre estos mismos métodos en lo que respecta a la estimación de las frecuencias de cabeceo. En este caso, los intervalos identificados a través del cociente  $FT_c$  en análisis espectral para las señales completas, se presentan como franjas en color gris delimitadas por líneas continuas y los intervalos identificados en el proceso por ventanas se delimitan por pequeños círculos rellenos unidos por una línea vertical continua. Para los valores obtenidos con el método de Luco se conserva la misma convención y en el caso del método paramétrico modal el tamaño de los círculos es ahora asociado con el factor de participación respectivo a la frecuencia mostrada.

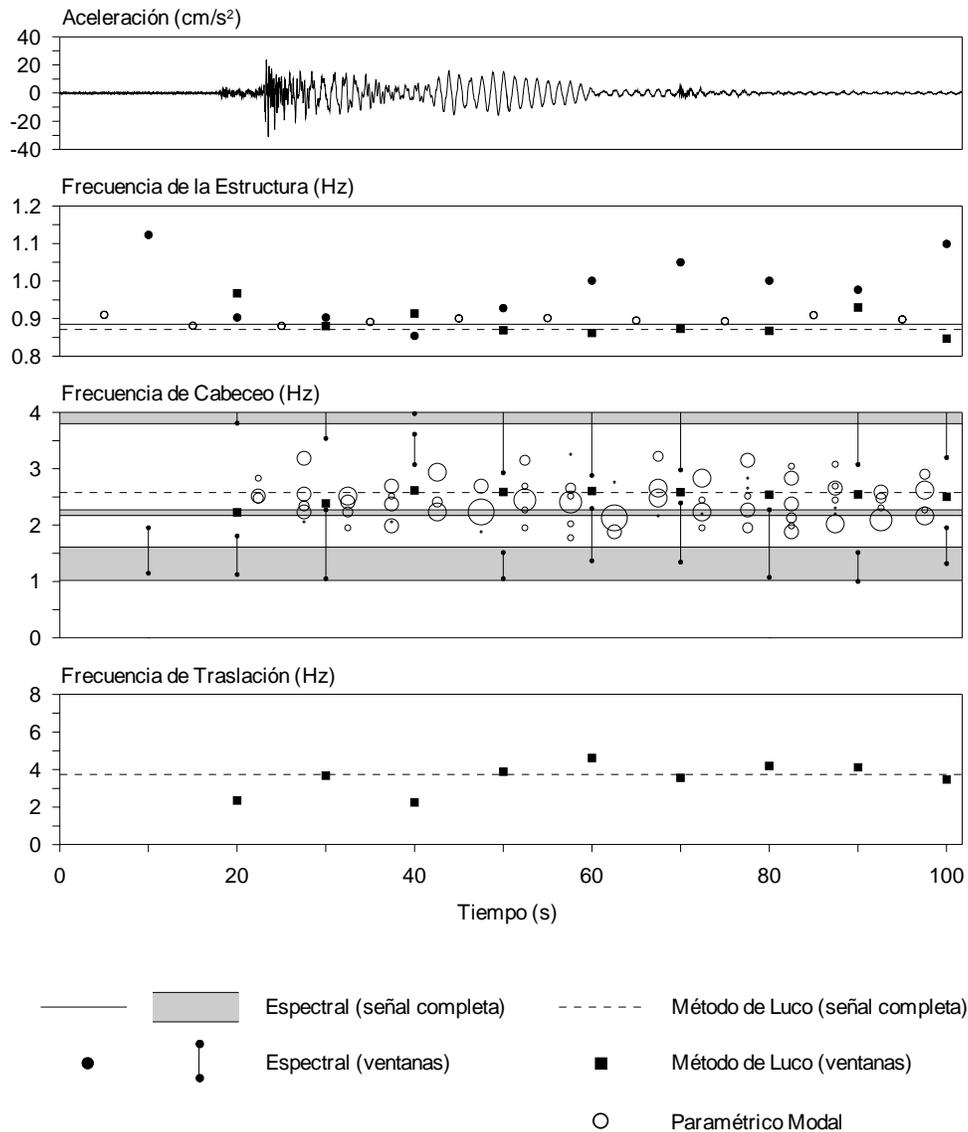


**Fig 5.47 - Comparación de las frecuencias identificadas en el componente L para el evento SI-011**

Por su parte, en el recuadro inferior se comparan los resultados obtenidos para la frecuencia de traslación relativa de la base con el método de Luco durante el análisis espectral de la señal completa y por ventanas.

En la fig 5.52 se presenta una comparación del mismo método de Luco para el caso de la torsión de la estructura con base empotrada para la señal completa y por ventanas, contra los resultados obtenidos en este componente mediante el modelo 3D-EST, y en el recuadro inferior se comparan las frecuencias asociadas con la torsión en la base.

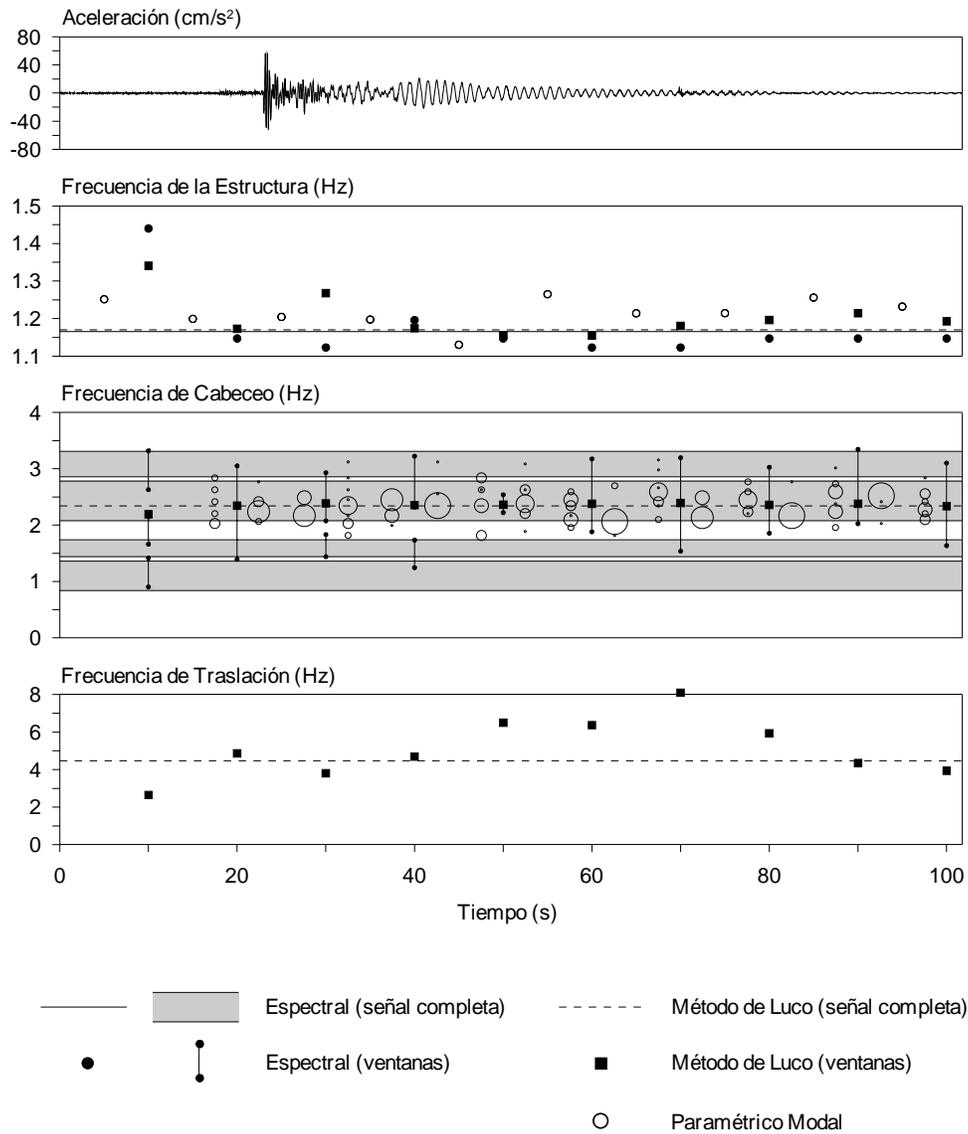
En el caso de la frecuencia de la estructura con base empotrada, tanto para los dos componentes de traslación como para el movimiento por torsión, se observa que en general, los valores de frecuencia obtenidos con el cociente  $FT_e$  y el método de Luco, cuando estos son derivados de un análisis espectral de señales completas,



**Fig 5.48 - Comparación de las frecuencias identificadas en el componente T para el evento SI-021**

son similares. Además, a excepción del evento SI-021 en el componente L, los valores obtenidos con la técnica paramétrica modal se concentran alrededor dichos resultados.

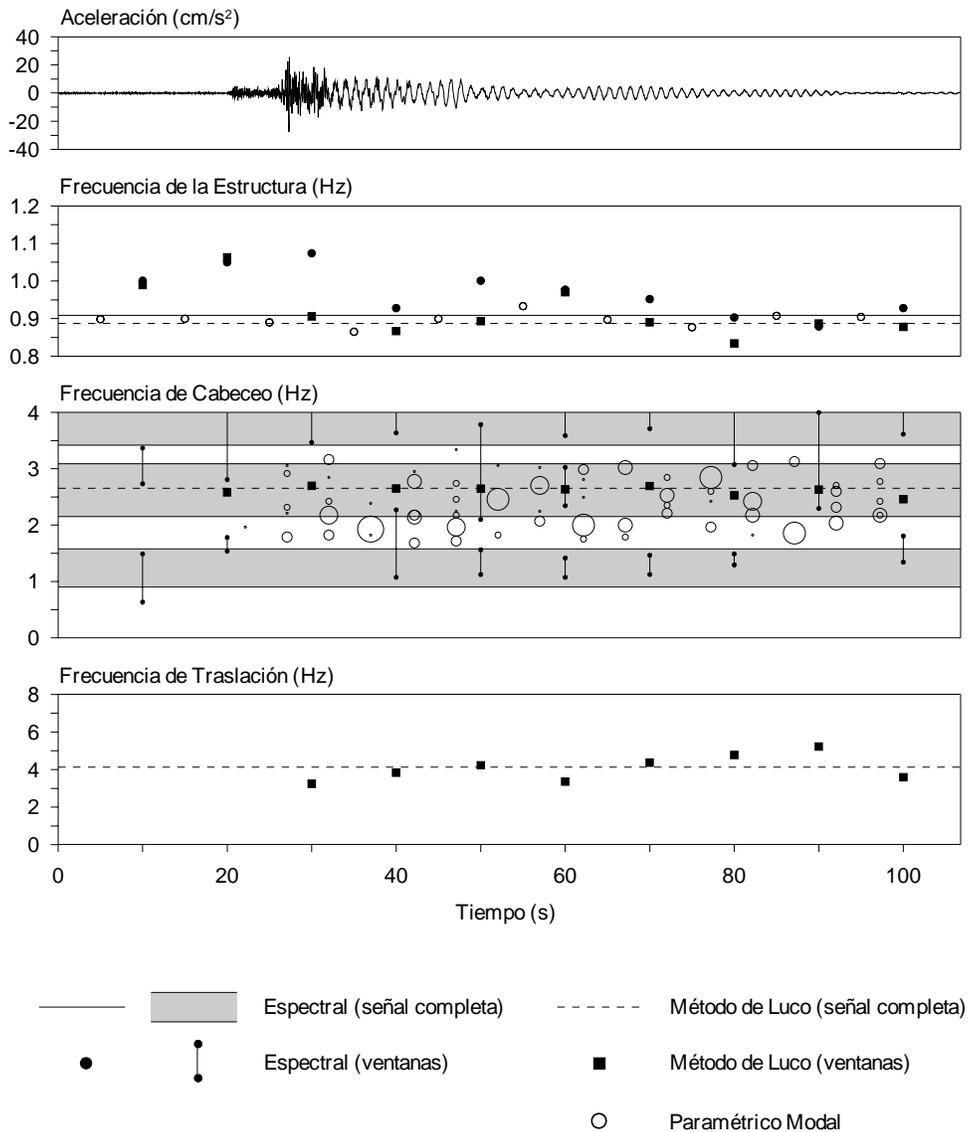
Por el contrario, cuando se realiza el análisis espectral por ventanas usando estos dos métodos ( $FT_e$  y Luco), los resultados aparecen más dispersos, con una mayor variación en el tiempo que no en todos los casos concuerda entre ambos procedimientos y tampoco es coherente con el transcurso de las amplitudes de la señal. Este contraste es mucho más evidente durante los eventos SI-021 y SI-022, lo cual conduce a pensar que no se debe propiamente a un comportamiento no lineal de la estructura, lo cual es de esperarse ya que el edificio no ha sufrido daño alguno, sino que por el contrario se debe a limitaciones de los procedimientos cuando se utiliza un análisis espectral por ventanas en señales con bajas amplitudes. Dado esto se llega a resultados no apropiados, influenciados por problemas numéricos y las limitaciones ya mencionadas sobre la



**Fig 5.49 - Comparación de las frecuencias identificadas en el componente L para el evento SI-021**

influencia de los efectos ISE y las propiedades mismas del sistema, las cuales se involucran en el trabajo espectral por ventanas de manera inconveniente.

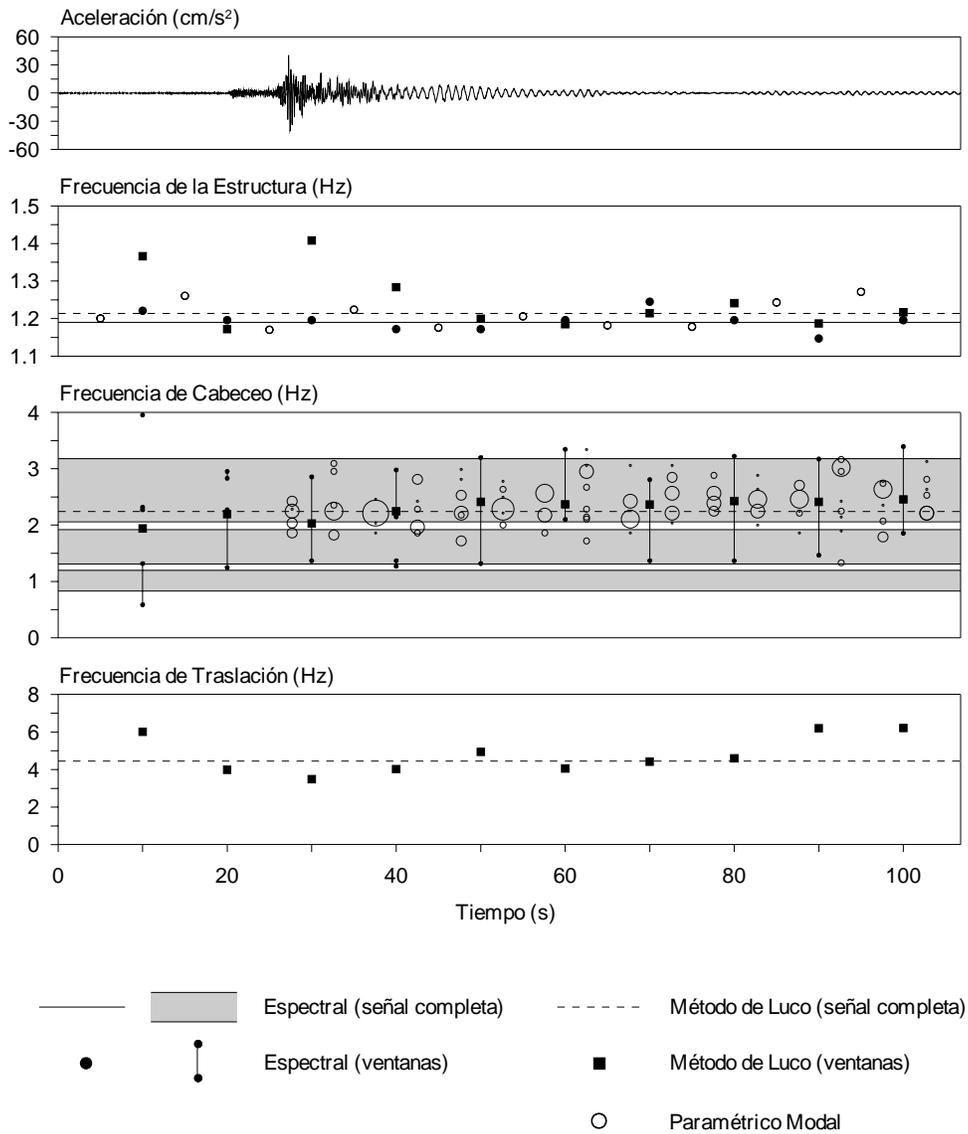
De acuerdo con lo anterior, y ya que este fenómeno no se presenta durante el evento SI-011, es adecuado interpretar que la mejor estimación de las frecuencias de la estructura con base empotrada es la que se derivó de los análisis espectrales con las señales completas y con la técnica paramétrica modal, en las cuales se observa que los cambios más relevantes en las propiedades del edificio, se presentaron ante la llegada del primer evento, tras el cual, una vez superada la fase intensa de dicho sismo, la estructura ha permanecido, en términos generales, con propiedades estables.



**Fig 5.50 - Comparación de las frecuencias identificadas en el componente T para el evento SI-022**

En cuanto a las frecuencias identificadas para el movimiento debido al cabeceo de la base se encuentra que los intervalos definidos espectralmente, tanto para el análisis de señales completas, como en el caso de procesos por ventanas, usando el cociente  $FT_c$  coinciden de mejor manera, para los tres eventos, en L que en T. Esto puede entenderse de acuerdo con los porcentajes de participación estimados con el método de Luco, puesto que se observó que eran mayores en ésta componente que en T, lo que también fue señalado con la técnica paramétrica modal, en la cual los intervalos entre 1.3 y 3.0 Hz se definían más claramente en la primera que en la segunda.

En cuanto a los resultados obtenidos con el método de Luco se puede concluir que, si bien estos se encuentran dentro de los intervalos identificados con los demás procedimientos, se ha visto que al movimiento de cabeceo no corresponde un único valor de frecuencia y que por el contrario, según sea el caso, este

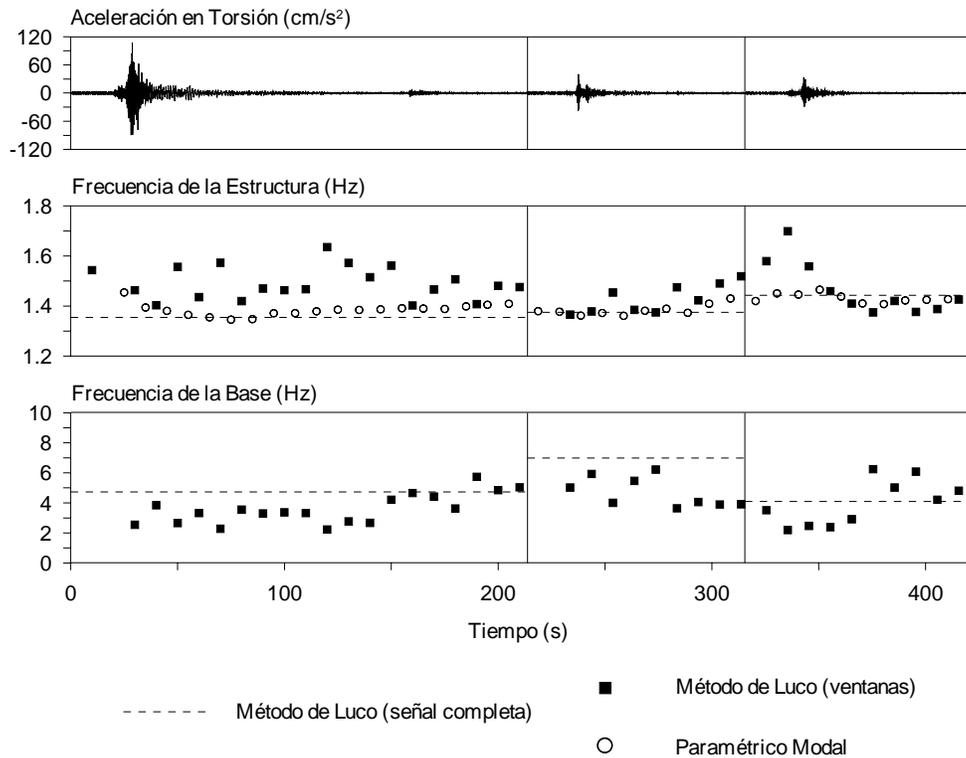


**Fig 5.51 - Comparación de las frecuencias identificadas en el componente L para el evento SI-022**

componente puede estar, o bien asociado con un intervalo bien definido de frecuencias tal como ocurre en el caso del componente L, o bien con una amplia banda de frecuencias cuyos límites no se encuentran tan claramente definidos como ocurre en el caso del componente T.

Aun dada esta situación, los valores a los que se llega por el método simplificado, bien sea aplicado en un análisis espectral por ventanas o sobre las señales completas, permite tener una idea del orden de valores promedio a los que se llegaría con procedimientos más detallados.

En cuanto a los valores estimados para la frecuencia del movimiento de traslación relativa de la base, se ha comentado que con un análisis espectral no se puede llegar a conclusiones claras, mientras que para los valores estimados con el método de Luco el panorama no es muy diferente, ya que los valores varían en



**Fig 5.52 - Comparación de las frecuencias de torsión para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

intervalos tan amplios, que no resulta adecuado emitir conclusión alguna. Se hace notar simplemente que en el análisis por ventanas se obtienen valores que varían desde 2.5 hasta 8.0 Hz. Mientras que en el caso de la torsión en la base la situación es bastante similar, con variaciones entre 2.0 y 7.0 Hz aproximadamente, y diferencias drásticas, aun en el caso de los valores obtenidos mediante el proceso de las señales completas.

En ambos casos, tales variaciones y la dificultad en el proceso de identificación son atribuibles a la baja participación del movimiento de la base en la respuesta global del sistema.

## 5.2 ESTIMACIÓN DE LAS RIGIDECES DE TRASLACIÓN, TORSIÓN Y CABECEO

Para la estimación de las rigideces de la cimentación se aplicó, para su valoración experimental, el procedimiento planteado por Luco (1980), mientras que desde el punto de vista normativo se aplicó el incluido en la propuesta de las Normas Técnicas para Diseño por Sismo del Distrito Federal (NTCDS-RCDF, 2000).

Adicionalmente se utilizó el programa Dyna5, con el cual se evaluaron por separado y en conjunto los componentes de la cimentación, es decir, las pilas y el cajón que conforman los muros de contención y el sistema de contratraves del sótano, utilizando la propuesta de Kobori (1991) y las diversas variantes que se expusieron en el capítulo tres, las cuales se analizaron tanto para las propiedades promedio del suelo de cimentación como para los estratos identificados en el trabajo de Lermo (2002) que se expusieron en el capítulo uno.

### 5.2.1 Análisis espectral de señales completas

Una vez que se han calculado las frecuencias de los movimientos de traslación y cabeceo de la base en los dos componentes de movimiento T y L, además de las asociadas con el movimiento de torsión, por el método de Luco (1980), las cuales se mostraron para cada uno de los eventos en las tablas 5.5 a 5.7, y conocidos los parámetros mostrados en la tabla 5.4, es posible estimar las rigideces asociadas a cada uno de estos movimientos haciendo uso de las expresiones 3.38, 3.39 y 3.46.

**Tabla 5.14 - Rigideces del subsistema de interacción estimadas con el método de Luco en un análisis espectral de señales completas**

Evento	Rigideces				
	Componente T		Componente L		Torsión
	$K_c$ (N·m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_c$ (N·m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_r$ (N·m/rad x $10^{12}$ )
SI-011	4.77	1.36	3.95	1.21	2.21
SI-012	5.57	1.61	4.55	2.54	2.32
SI-013	5.25	1.18	4.79	4.01	3.35
SI-014	5.56	1.04	4.54	2.84	2.15
SI-021	5.48	1.21	4.51	1.87	4.71
SI-022	5.81	1.46	4.14	1.85	1.68
SI-023	5.81	1.72	4.65	2.23	2.89
SI-024	5.80	1.68	4.65	2.16	2.30

Aplicadas dichas ecuaciones se obtuvieron las rigideces del subsistema de interacción para los ocho eventos seleccionados, las cuales se muestran en la tabla 5.14, sobre las cuales pueden hacerse las siguientes observaciones:

- Para la rigidez del movimiento por cabeceo se obtienen valores promedio de  $5.51 \times 10^{12}$  y  $4.47 \times 10^{12}$  N·m/rad para los componentes T y L, mientras que para los movimientos de traslación se obtienen valores promedio de  $1.41 \times 10^{10}$  y  $2.10 \times 10^{10}$  N/m, respectivamente. En el caso de rigidez por torsión en la base se encuentra en  $2.70 \times 10^{12}$  N·m/rad.
- Las menores diferencias entre evento y evento se presentan en los casos del cabeceo en T y L, para los cuales se obtienen desviaciones estándar hasta del 6 %, mientras que en las rigideces de traslación éstas indican márgenes de 18 y 25 %, que para la torsión se alcanza un valor de 35 %.
- Se aprecia que las rigideces de cabeceo, excepción hecha del valor obtenido para el evento SI-013 en el componente L, guardan una relación con la intensidad del evento, dándose los menores valores para el evento SI-011 y los máximos en los últimos eventos. No puede decirse nada similar en el caso de las rigideces por traslación o giro, en las cuales justamente se observan las mayores variaciones.
- En el evento SI-013 se obtiene un valor de rigidez en traslación que sobresale por encima de los demás estimados. Dado el contenido de frecuencias observado para este sismo (figs 2.16 a 2.18), se detectó que este valor es producto de una singularidad numérica fruto de las bajas amplitudes en estas ordenadas de frecuencia, por lo que para efectos comparativos este valor ha sido omitido.

### 5.2.2 Análisis espectral de señales por ventanas

A los mismos eventos que se seleccionaron en los procesos de identificación de frecuencias asociadas con los movimientos de interacción, se les aplicó el método de Luco en un análisis espectral por ventanas de 20 s con traslapes de 10 s. En la tabla 5.15 se resumen los valores calculados para las rigideces de la cimentación en los componentes de movimiento de cabeceo, traslación y giro de la base. Los valores estimados para cada

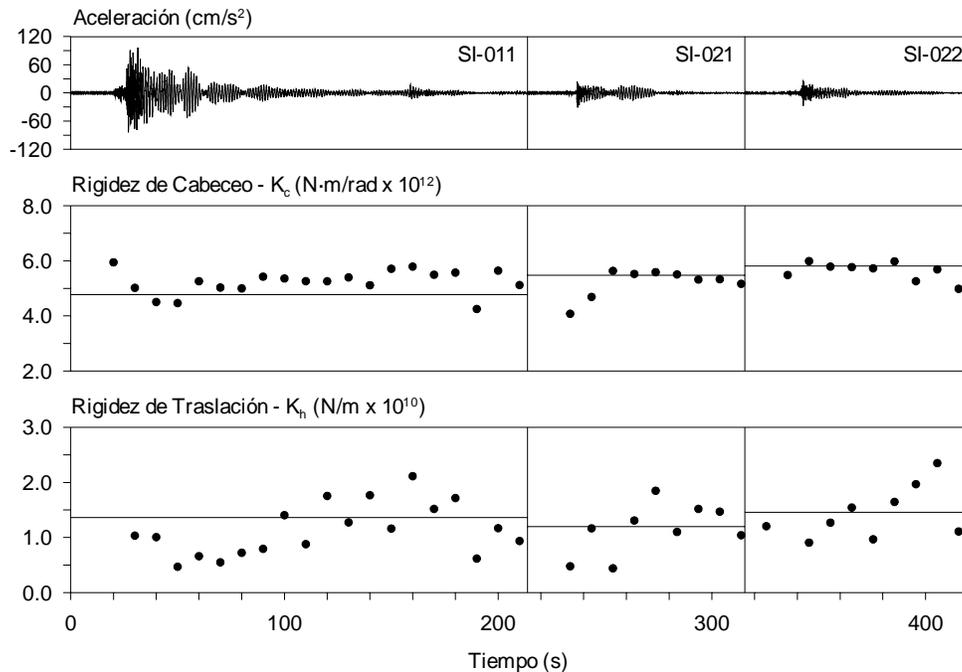
una de las ventanas se encuentran en detalle en las tablas B.13 a B.15, y se pueden observar en las figs 5.53 a 5.55 en las cuales se incluye en línea continua los resultados obtenidos en el análisis espectral de señales completas.

**Tabla 5.15 - Rigideces del subsistema de interacción estimadas con el método de Luco en un análisis espectral por ventanas para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

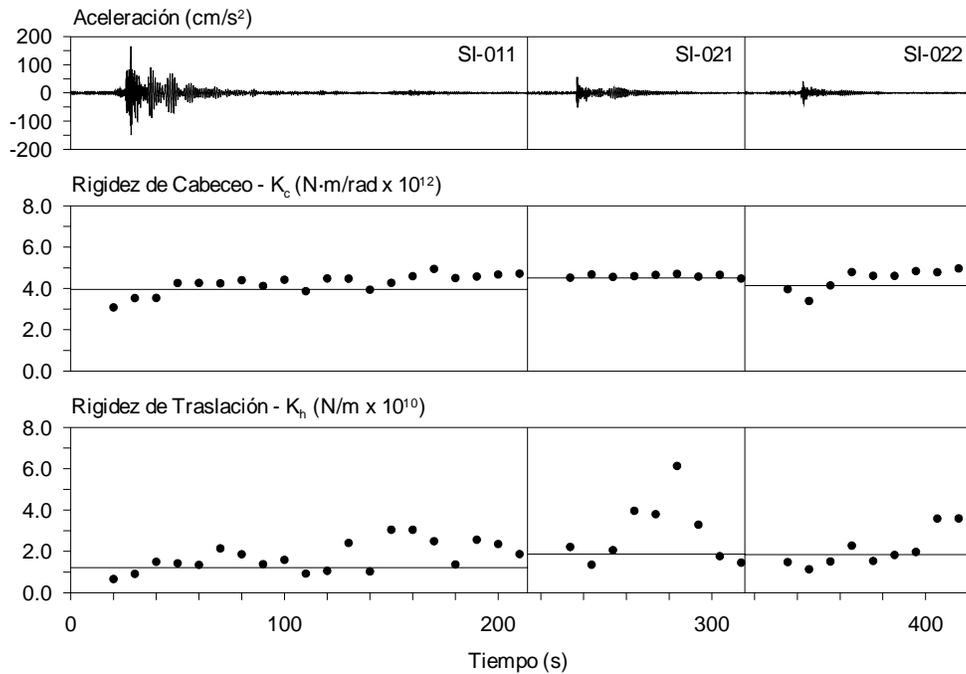
Evento	Parámetro	Rigideces				
		Componente T		Componente L		Torsión
		$K_c$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	$K_c$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	$K_r$ (N·m/rad x 10 <sup>13</sup> )
SI-011	Mínimo	4.25	0.47	2.59	0.66	0.49
	Máximo	6.11	2.11	4.95	3.05	3.25
	Promedio	5.27	1.17	4.17	1.77	1.47
SI-021	Mínimo	4.08	0.44	3.95	0.66	1.28
	Máximo	5.64	1.85	4.71	6.14	3.73
	Promedio	5.21	1.15	4.54	2.67	2.20
SI-022	Mínimo	4.98	0.91	3.11	1.14	0.48
	Máximo	5.99	2.35	4.97	3.60	3.91
	Promedio	5.63	1.44	4.32	2.23	1.80

Los valores de cada ventana correspondientes a las figs 5.53 a 5.55 que aquí se resumen, se encuentran en las tablas B.13 a B.15.

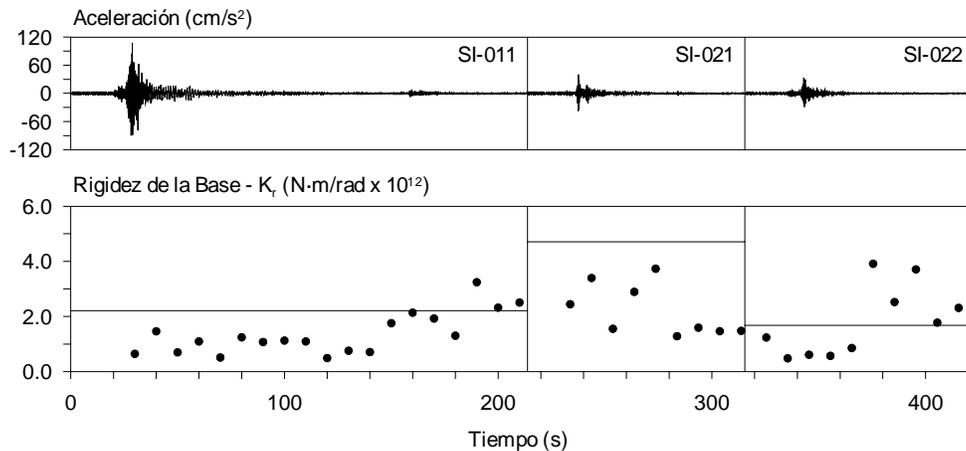
Dada la forma en que las rigideces son calculadas, la variación de sus valores a lo largo de los eventos es equivalente a la que se observó en el caso de las frecuencias. De esta manera vemos como, a excepción del componente T en el primer evento, los valores de cabeceo para las primeras ventanas se encuentran por debajo del obtenido con el procedimiento para la señal completa, alrededor del cual se estabilizan pasados los primeros 40 s de cada evento.



**Fig 5.53 - Rigideces del subsistema de interacción en el componente T estimadas con el método de Luco para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**



**Fig 5.54 - Rigideces del subsistema de interacción en el componente L estimadas con el método de Luco para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**



**Fig 5.55 - Rigideces del subsistema de interacción en torsión estimadas con el método de Luco para los eventos SI-011, SI-021 y SI-022**

En cuanto a la estimación de las rigideces de traslación y torsión en la base, la gran dispersión en los resultados indica una vez más que las bajas amplitudes en estos componentes de movimiento afectan los resultados que puedan ser obtenidos en procesos espectrales por ventanas.

Teniendo en cuenta que en el caso del cabeceo los resultados por ventanas se ajustan satisfactoriamente con los obtenidos para el proceso de la señal completa, y dado que debido a la escasa calidad de las señales en los movimientos de traslación y torsión de la base, se observa que los resultados obtenidos en el proceso de las señales completas dan una igual o mejor estimación de los valores de la rigidez del subsistema de interacción.

Por lo tanto, serán los resultados obtenidos con el proceso para las señales completas los que se utilicen en las posteriores comparaciones con los resultados derivados del procedimiento normativo y los modelos usados en el programa Dyna5.

**5.2.3 Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo**

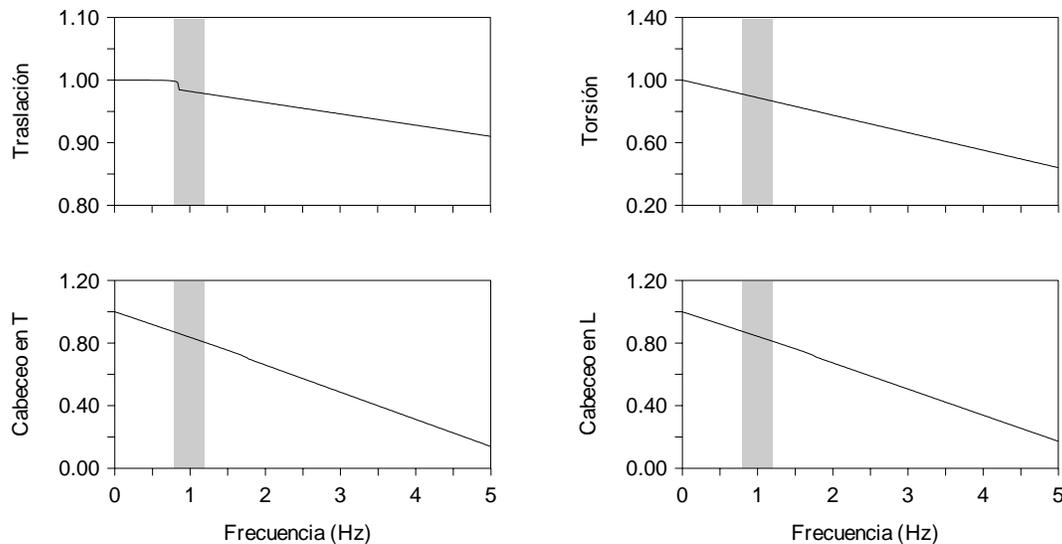
Dado que en la versión preliminar de NTCDs-RCDF (2000) se incluyó una sección dirigida a permitir que en el diseño se tomen en cuenta los efectos ISE, cuando ésta cumpla con ciertas características y además se encuentre cimentada sobre un suelo blando, y a pesar de que no son las normas que aplican en la ciudad de Acapulco, bajo las cuales fue diseñado el edificio en estudio, se decidió realizar los cálculos necesarios para estimar las rigideces del sistema de cimentación ante los movimientos de cabeceo y traslación de la base por los procedimientos que en este documento se incluyen para comparar sus resultados con los obtenidos experimentalmente.

Adicionalmente, puesto que en lo que a efectos ISE se refiere las normas no incluyen la torsión, la rigidez en esta componente fue estimada con las expresiones reunidas por Gazetas (1990).

Siguiendo tales procedimientos, para cada componente de movimiento se calcularon tanto la rigidez en condiciones estáticas como en condiciones dinámicas. Se puede decir que en general estas últimas equivalen a las primeras multiplicadas por un factor dinámico que depende de la frecuencia de la excitación.

Para el aporte de rigidez de las pilas en el movimiento de cabeceo, este factor tiene valor unitario siempre que se cumpla que la relación entre la longitud y el diámetro de la éstas ( $L/d$ ) sea menor que uno, tal como ocurre para todas las pilas del sistema de cimentación del edificio. En cuanto a la rigidez en traslación y torsión dicho factor dinámico siempre es uno (ec 3.105).

Con respecto al cajón, es decir, el conjunto que conforman el sistema de contratrabes y muros de contención del sótano del edificio, el aporte por rigidez en los diferentes componentes de movimiento en condiciones dinámicas, el mencionado factor dinámico es la suma de una serie de términos que son función de la frecuencia de excitación a la que está sometido el sistema (ec 3.93).



**Fig 5.56 - Variación del factor dinámico para las rigideces del cajón (NTCDs-RCDF, 2000; Gazetas, 1990)**

En la fig 5.56 se muestra la variación del factor dinámico en las rigideces del cajón para los diferentes componentes de movimiento contemplado. En gris se presenta el intervalo de frecuencias que cubija la frecuencia fundamental del suelo y las características del sistema. Dado lo cual, para el cálculo de las rigideces en condiciones dinámicas, se tomó 1 Hz como frecuencia representativa de este intervalo.

**Tabla 5.16 - Rigideces de la cimentación estimadas con el procedimiento de NTC-DS**

Dirección	Parámetro		Estático (E)		Dinámico (D)		D/E
			Rigidez	Participación (%)	Rigidez	Participación (%)	
T	$K_c$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )	Cajón	1.65	44.4	1.35	39.5	0.81
		Pilas	2.07	55.6	2.07	60.5	1.00
		<b>Total</b>	<b>3.72</b>		<b>3.42</b>		<b>0.91</b>
	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	Cajón	0.52	30.8	0.51	30.4	0.98
		Pilas	1.17	69.2	1.17	69.6	1.00
		<b>Total</b>	<b>1.69</b>		<b>1.68</b>		<b>0.99</b>
L	$K_c$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )	Cajón	1.48	34.5	1.25	30.8	0.84
		Pilas	2.81	65.5	2.81	69.2	1.00
		<b>Total</b>	<b>4.29</b>		<b>4.06</b>		<b>0.94</b>
	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	Cajón	0.52	30.8	0.51	30.4	0.98
		Pilas	1.17	69.2	1.17	69.6	1.00
		<b>Total</b>	<b>1.69</b>		<b>1.68</b>		<b>0.99</b>
R	$K_r$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )	Cajón	2.04	52.2	1.81	49.2	0.88
		Pilas	1.87	47.8	1.87	50.8	1.00
		<b>Total</b>	<b>3.91</b>		<b>3.68</b>		<b>0.94</b>

En la tabla 5.16 se enseñan los valores obtenidos en cada componente para las condiciones estáticas y dinámicas descritas. Se incluyen en detalle para cada uno de los casos, los aportes del cajón, el grupo de pilas, la suma de ambos y sus porcentajes con respecto al valor total. Adicionalmente, se presentan los cocientes entre la rigidez obtenida en condiciones estáticas y la calculada en el escenario dinámico.

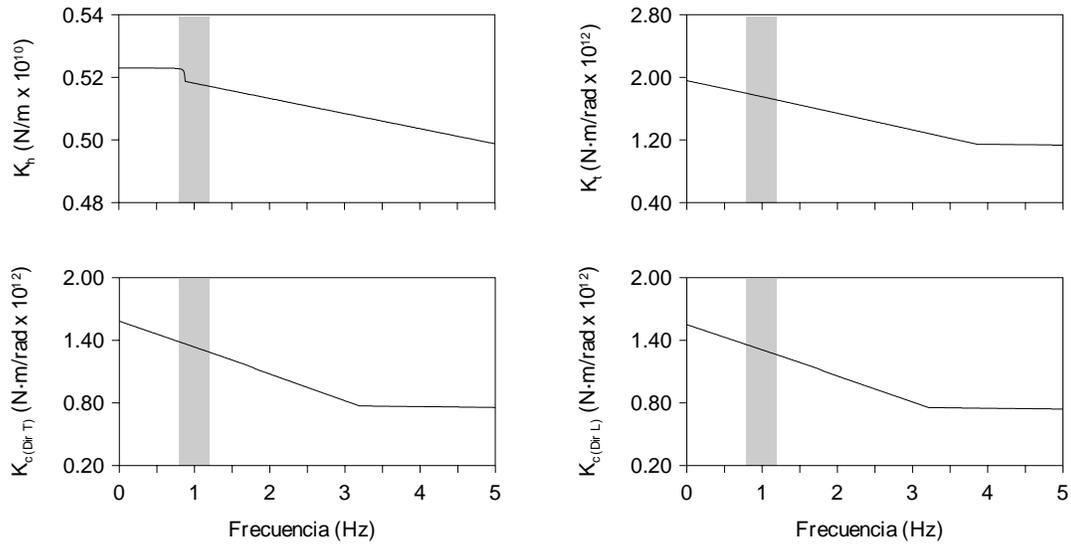
De la observación de éstos resultados interesa destacar las siguientes observaciones:

- Dadas las formulaciones en que se basan las ecuaciones presentadas en el capítulo tres, las rigideces obtenidas, tanto para las pilas como para el cajón, en el componente de traslación en las dos direcciones son iguales. Mientras que en el caso del cabeceo se observa que en general, los valores de rigidez en el componente T son menores que en el componente L en un 13 y 15 % para las condiciones estática y dinámica, respectivamente.
- Excepto en el caso de torsión en la base donde alcanza un aporte de 52 %, la rigidez del cajón es menor que la que aportan las pilas al total del conjunto, variando entre 30 y 44 %, con un valor medio de 35 % para las condiciones estáticas, y de 33 % para las condiciones dinámicas. Los aportes del grupo de pilas varían entre 56 y 70 %.
- Los factores de dinámicos del conjunto oscilan entre 0.91 para el caso del cabeceo en dirección T y 0.99 para los componentes de traslación en las dos direcciones. El valor promedio de este cociente se encuentra en 0.95.

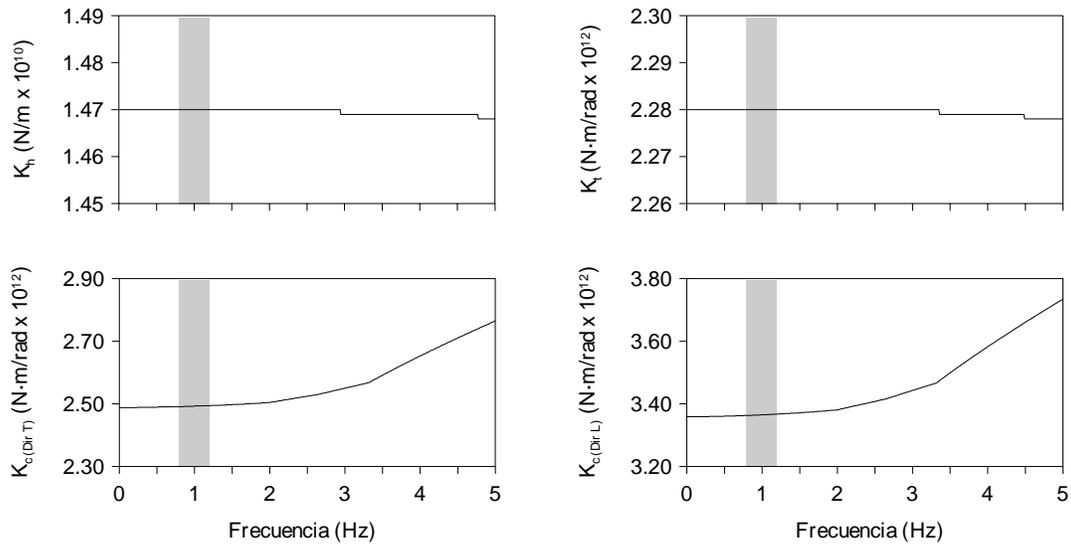
#### 5.2.4 Modelos analizados con el programa Dyna5

Ahora que se cuenta con resultados experimentales y normativos, se analizaron con el programa Dyna5 una serie de modelos básicos y una variedad de combinaciones a partir de estos, con el interés de buscar cual de ellos representaba mejor el comportamiento real del sistema de interacción.

Para estos modelos se tuvieron en cuenta distintas situaciones. Al igual que con el procedimiento normativo se analizaron casos para condiciones estáticas y dinámicas, pero además, gracias a las facilidades que otorga el programa, se tuvieron en cuenta tanto casos en los que se consideró el suelo de cimentación como un semiespacio homogéneo, como casos en los que se tenían en cuenta los estratos identificados por Lermo (2002).



**Fig 5.57 - Variación de las rigideces del cajón (Modelo CEe)**



**Fig 5.58 - Variación de las rigideces de las pilas (Modelo PpE)**

En una primera parte se obtuvieron los resultados de los modelos básicos que se enseñaron en el tercer capítulo, por medio de los cuales se estimaron los aportes de rigidez del cajón y el grupo de pilas, para condiciones de suelo homogéneo y con estratos, y considerando o no los efectos de grupo entre las pilas.

De igual manera que en el caso de las normas, para los modelos en los que se consideraron condiciones dinámicas se utilizó un valor de frecuencia de 1 Hz. Simplemente con el objetivo de ilustrar la influencia de optar por esta simplificación, en las figs 5.57 y 5.58 se ilustra la variación de las rigideces en los diferentes componentes de movimiento para dos de los modelos utilizados.

Posteriormente con el fin de estimar entonces las rigideces del conjunto total de la cimentación, de acuerdo a como se plantearon en las tablas 3.5 y 3.6, se calcularon diferentes combinaciones entre los modelos básicos aplicando conceptos como el planteado por Kobori (1991) para contemplar los efectos de grupo entre las pilas, el suelo y el cajón, o como el propuesto con las expresiones 3.116 y 3.117 para considerar los efectos de grupo pilas-suelo-pilas, para lo cual fue necesario estimar también las rigideces de cuatro modelos auxiliares.

En la tabla 5.17 se presentan los resultados obtenidos para los modelos básicos en condiciones estáticas, mientras que en la tabla 5.18 se enseñan los correspondientes a las condiciones dinámicas. Ambos, pueden verse también en la fig 5.59, en la que pueden destacarse las siguientes observaciones.

**Tabla 5.17 - Rigideces estáticas de la cimentación obtenidas con el programa Dyna5 para los modelos básicos**

Modelo	Rigideces Estáticas				
	Dirección T		Dirección L		Torsión
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )
CH	1.18	0.39	1.15	0.39	1.84
CE	1.54	0.51	1.51	0.51	1.90
CHe	1.21	0.40	1.19	0.40	1.89
CEe	1.58	0.52	1.55	0.52	1.96
PpH	1.42	1.19	1.91	1.19	1.85
PpE	2.49	1.47	3.36	1.47	2.28
PpH.G	0.70	0.28	0.75	0.28	0.81
PpE.G	1.29	0.55	1.40	0.55	1.25
PsH	1.46	1.21	1.96	1.21	1.96
PsE	2.56	1.52	3.45	1.52	2.49
CyPpH	1.54	1.23	2.03	1.23	2.33
CyPpE	2.61	1.51	3.48	1.51	2.78
CyPpH.G	0.82	0.32	0.87	0.32	1.29
CyPpE.G	1.42	0.59	1.52	0.59	1.75

**Tabla 5.18 - Rigideces dinámicas de la cimentación obtenidas con el programa Dyna5 para los modelos básicos**

Modelo	Rigideces Dinámicas				
	Dirección T		Dirección L		Torsión
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )
CH	0.99	0.39	0.97	0.39	1.64
CE	1.29	0.50	1.27	0.50	1.70
CHe	1.02	0.41	1.00	0.41	1.69
CEe	1.34	0.52	1.31	0.52	1.75
PpH	1.42	1.19	1.92	1.19	1.85
PpE	2.49	1.47	3.37	1.47	2.28
PpH.G	0.65	0.28	0.70	0.28	0.77
PpE.G	1.26	0.55	1.36	0.56	1.24
PsH	1.46	1.21	1.96	1.21	1.96
PsE	2.56	1.52	3.46	1.52	2.49
CyPpH	1.51	1.23	2.00	1.23	2.26
CyPpE	2.58	1.52	3.45	1.52	2.70
CyPpH.G	0.74	0.33	0.78	0.33	1.18
CyPpE.G	1.35	0.60	1.45	0.60	1.67

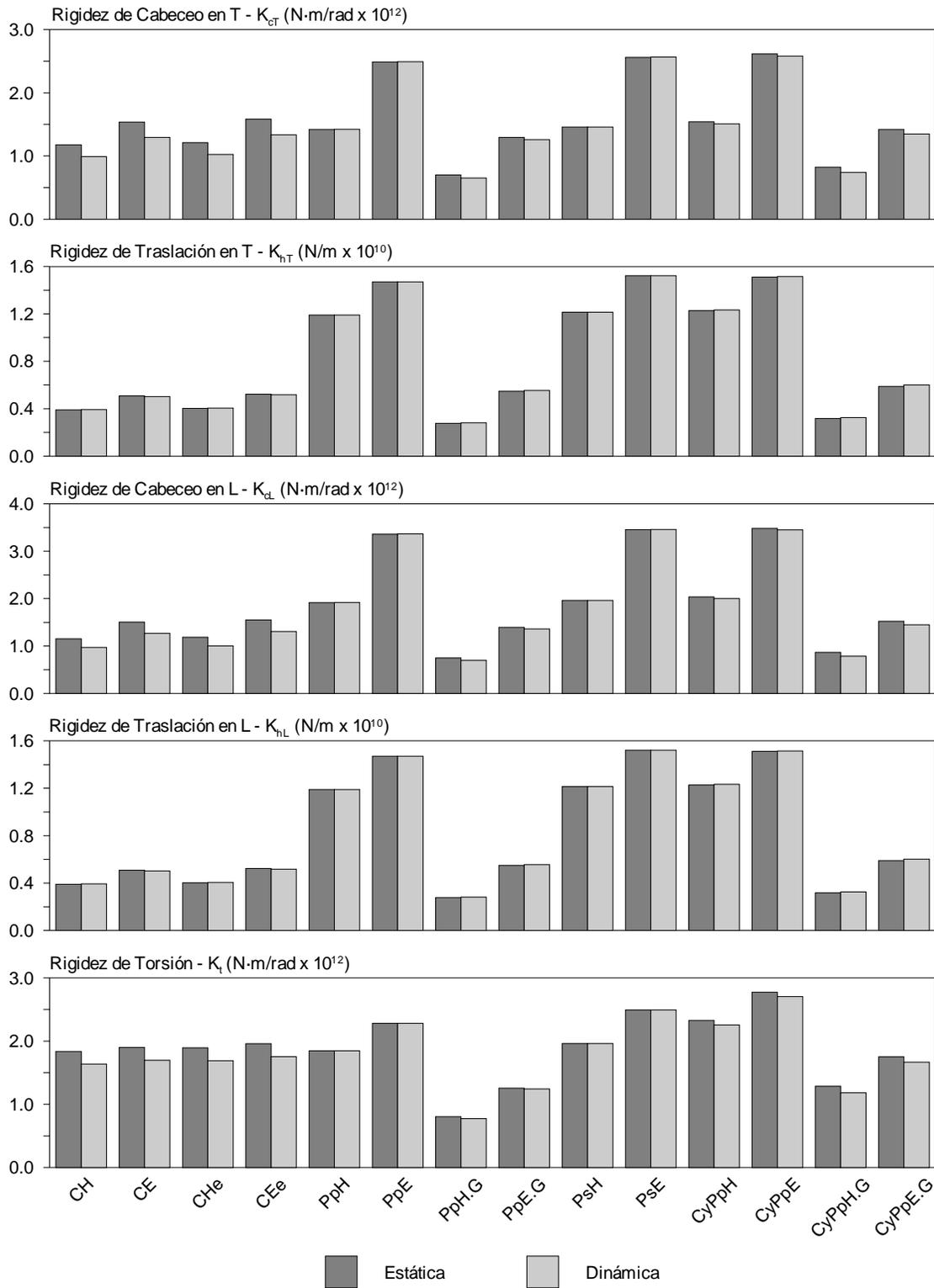


Fig 5.59 - Rigideces de la cimentación de los modelos básicos obtenidas con el programa Dyna5

- En general, con aquellos modelos que involucran los estratos del suelo (“E”) se obtienen mayores valores que los que calculados con los modelos en los que se considera que el cajón o las pilas se encuentran en un semiespacio homogéneo (“H”).
- En promedio se halla que las rigideces en traslación de los diferentes modelos del cajón (CH, CE, CHE y CEe) equivalen a un 35 % de las obtenidas para las pilas (PpH y PpE). Para el caso del cabeceo estas relaciones cambian considerablemente, de forma que al considerar los casos de suelo homogéneo, la rigidez del cajón es aproximadamente el 80 y 60 % de los valores de las pilas (en T y L), mientras que cuando se tienen en cuenta los estratos, las rigideces del cajón son un 60 y 45 % de las obtenidas para las pilas en las mismas direcciones. Por su parte, en el caso de la torsión, los aportes de pilas y cajón son relativamente similares.
- Para los componentes de traslación y cabeceo, la rigidez de las pilas calculada cuando se asume que todas estas tienen un diámetro promedio de 1.2 m (PpH y PpE) es prácticamente el mismo que cuando estas se calculan como la suma del aporte de cada una de ellas (PsH y PsE), con diferencias entre sí que no superan del 3 %. En cuanto al componente torsional las diferencias son ligeramente mayores, con discrepancias del 6 %.
- Los modelos de las pilas que consideran efectos de grupo (“G”) sufren reducciones que varían entre un 45 y un 75 % de aquellos valores obtenidos para los modelos en los que estos efectos no son contemplados.
- Finalmente, se debe resaltar que se encontró que los modelos CyPpH y CyPpE y sus dos respectivas variantes con efectos de grupo, no estiman adecuadamente las rigideces del conjunto compuesto por pilas y cajón, puesto que al menos para los dos primeros se esperaba obtener resultados similares a la suma de las rigideces calculadas con los modelos CH y PpH o PpE, cuando por el contrario los resultados son acaso superiores a los obtenidos con la simple participación de las pilas. Por lo tanto estos cuatro modelos se descartaron para lo que resta del trabajo.

Obtenidas las rigideces con los modelos básicos, y con el objetivo de aplicar los efectos de grupo en algunas de las combinaciones propuestas en las tablas 3.5 y 3.6, se procedió a estimar la influencia de los factores de grupo tal como se planteó en las ecs 3.116 y 3.117. Los resultados para cada uno de los componentes de movimiento considerando suelo homogéneo y con estratos, bajo condiciones estáticas y dinámicas se muestran en las tablas 5.19 y 5.20, respectivamente.

Para efectos prácticos, dado el intervalo de frecuencias en el cual trabaja el sistema en estudio, puede decirse que las diferencias entre el caso estático y el dinámico para los efectos de grupo son prácticamente

**Tabla 5.19 - Efectos de grupo estimados a partir de los modelos básicos en condiciones estáticas**

Modelo	Combinación	Efectos de grupo para los casos estáticos				
		Dirección T		Dirección L		Torsión
		$K_c$	$K_h$	$K_c$	$K_h$	$K_r$
EG <sub>H</sub>	PpH.G/PpH	0.49	0.23	0.39	0.23	0.44
EG <sub>E</sub>	PpE.G/PpE	0.52	0.37	0.42	0.37	0.55

**Tabla 5.20 - Efectos de grupo estimados a partir de los modelos básicos en condiciones dinámicas**

Modelo	Combinación	Efectos de grupo para los casos estáticos				
		Dirección T		Dirección L		Torsión
		$K_c$	$K_h$	$K_c$	$K_h$	$K_r$
EG <sub>H</sub>	PpH.G/PpH	0.46	0.24	0.36	0.24	0.42
EG <sub>E</sub>	PpE.G/PpE	0.51	0.38	0.40	0.38	0.55

despreciables. No obstante, debe mencionarse que en múltiples trabajos se ha explorado sobre la influencia de los efectos de grupo, en los cuales se ha encontrado que sus valores están íntimamente ligados con la variación en la frecuencia de la excitación. Como ejemplo puede citarse el estudio realizado por Kaynia y Kausel (1982).

En general se observa que los efectos de grupo de pilas tienen una mayor influencia en el modelo de suelo homogéneo que en el que se consideran los estratos del mismo. Además se puede resaltar que también influyen de manera más significativa en los componentes de traslación que en los de cabeceo o torsión. Mientras que finalmente, se observa que las reducciones que estos ocasionan son mayores en la dirección longitudinal que en la transversal.

Ahora bien, para la aplicación del procedimiento propuesto por Kobori (1991), cuyo modelo para contemplar los efectos de interacción pilas-suelo-cajón, se expuso en el capítulo tres (fig 3.16), fue necesario calcular la rigidez que aporta el suelo desplazado por las pilas en cada uno de los componentes de movimiento. En las tablas 5.21 y 5.22 se enseñan los resultados obtenidos para los modelos auxiliares, en condiciones estática y dinámica, respectivamente.

**Tabla 5.21 - Rigideces estáticas de la cimentación obtenidas con el programa Dyna5 para los modelos auxiliares**

Modelo	Rigideces Estáticas				
	Dirección T		Dirección L		Torsión
	$K_c$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	$K_c$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	$K_r$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )
SpH	0.17	0.40	0.23	0.40	0.61
SpE	0.18	0.41	0.24	0.41	0.63
SsH	0.18	0.40	0.25	0.40	0.65
SsE	0.19	0.42	0.26	0.42	0.67

**Tabla 5.22 - Rigideces dinámicas de la cimentación obtenidas con el programa Dyna5 para los modelos auxiliares**

Modelo	Rigideces Dinámicas				
	Dirección T		Dirección L		Torsión
	$K_c$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	$K_c$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	$K_r$ (N·m/rad x 10 <sup>12</sup> )
SpH	0.17	0.40	0.23	0.40	0.61
SpE	0.18	0.41	0.24	0.41	0.63
SsH	0.18	0.40	0.25	0.40	0.65
SsE	0.19	0.42	0.26	0.42	0.67

Calculadas entonces las rigideces correspondientes a los modelos básicos, detectada la influencia de los efectos de grupo en el conjunto de las pilas y estimado el aporte del suelo desplazado por las pilas mediante el uso de los modelos auxiliares, procede determinar la rigidez para cada uno de los cinco componentes de movimiento contemplados en el modelo de interacción, para las dieciséis combinaciones de modelos que se plantearon en el capítulo tres (tablas 3.5 y 3.6).

Los resultados obtenidos para las combinaciones propuestas con modelos en los que el suelo se considera homogéneo, para condiciones estáticas y dinámicas, se presentan en las tablas 5.23 y 5.24, respectivamente. Mientras que los calculados con aquellas combinaciones en las que se toman en cuenta los estratos, se presentan en las 5.25 y 5.26.

Estos mismos resultados aparecen en las figs 5.60 y 5.61. Adicionalmente, la fig 5.62 muestra una comparación entre los modelos de suelo homogéneo y los de estratos para el caso estático.

**Tabla 5.23 - Rigideces estáticas para las combinaciones propuestas con los modelos de suelo homogéneo**

Modelo	Combinación	Rigideces Estáticas				
		Dirección T		Dirección L		Torsión
		$K_c$ (N-m/rad x 10 <sup>12</sup> )	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	$K_c$ (N-m/rad x 10 <sup>12</sup> )	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	$K_r$ (N-m/rad x 10 <sup>12</sup> )
H1	CH+PpH	2.60	1.58	3.07	1.58	3.68
H2	CH+PpH.G	1.88	0.67	1.90	0.67	2.64
H3	CH+PpH-SpH	2.43	1.18	2.83	1.18	3.07
H4	CH+PpH.G-SpH	1.71	0.27	1.67	0.27	2.03
H5	CH+PsH	2.63	1.60	3.11	1.60	3.80
H6	CH+PsH-SsH	2.45	1.20	2.86	1.20	3.15
H7	CH+PsH-EG <sub>H</sub>	1.90	0.67	1.92	0.67	2.69
H8	CH+(PsH-SsH)-EG <sub>H</sub>	1.81	0.58	1.82	0.58	2.41
H9	CE+PpH	2.96	1.70	3.42	1.70	3.75
H10	CE+PpH.G	2.24	0.78	2.25	0.78	2.71
H11	CE+PpH-SpH	2.79	1.30	3.19	1.30	3.14
H12	CE+PpH.G-SpH	2.07	0.39	2.02	0.39	2.10
H13	CE+PsH	2.99	1.72	3.46	1.72	3.86
H14	CE+PsH-SsH	2.81	1.32	3.22	1.32	3.21
H15	CE+PsH-EG <sub>H</sub>	2.26	0.79	2.27	0.79	2.76
H16	CE+(PsH-SsH)-EG <sub>H</sub>	2.17	0.70	2.17	0.70	2.47

**Tabla 5.24 - Rigideces dinámicas para las combinaciones propuestas con los modelos de suelo homogéneo**

Modelo	Combinación	Rigideces Dinámicas				
		Dirección T		Dirección L		Torsión
		$K_c$ (N-m/rad x 10 <sup>12</sup> )	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	$K_c$ (N-m/rad x 10 <sup>12</sup> )	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	$K_r$ (N-m/rad x 10 <sup>12</sup> )
H1	CH+PpH	2.41	1.58	2.89	1.58	3.48
H2	CH+PpH.G	1.64	0.67	1.67	0.67	2.41
H3	CH+PpH-SpH	2.24	1.19	2.65	1.19	2.87
H4	CH+PpH.G-SpH	1.47	0.28	1.44	0.28	1.80
H5	CH+PsH	2.45	1.61	2.93	1.61	3.60
H6	CH+PsH-SsH	2.27	1.20	2.68	1.20	2.95
H7	CH+PsH-EG <sub>H</sub>	1.66	0.68	1.69	0.68	2.45
H8	CH+(PsH-SsH)-EG <sub>H</sub>	1.58	0.58	1.60	0.58	2.18
H9	CE+PpH	2.72	1.69	3.18	1.69	3.54
H10	CE+PpH.G	1.95	0.78	1.97	0.78	2.47
H11	CE+PpH-SpH	2.54	1.30	2.95	1.30	2.93
H12	CE+PpH.G-SpH	1.77	0.39	1.73	0.39	1.86
H13	CE+PsH	2.75	1.72	3.23	1.72	3.66
H14	CE+PsH-SsH	2.57	1.31	2.98	1.31	3.01
H15	CE+PsH-EG <sub>H</sub>	1.96	0.79	1.98	0.79	2.52
H16	CE+(PsH-SsH)-EG <sub>H</sub>	1.88	0.69	1.89	0.69	2.25

Para los resultados obtenidos con estos modelos interesa hacer las siguientes observaciones:

- En general los valores calculados con los modelos que consideran la estratigrafía del suelo son mayores que los encontrados con los que consideran el suelo homogéneo. Esta diferencia, en las rigideces de cabeceo es del orden de un 30 % el valor de las obtenidas para el caso con estratos, mientras que en las rigideces de traslación varían entre 15 y 50 %. Para el caso de la torsión se encuentran alrededor de un 15 %.
- Los mayores, en todos los componentes de movimiento, correspondieron a los modelos H9, H13, E9 y E13, que son aquellos que involucraron los modelos básicos de cajón embebido en estrato y los grupos de pilas considerando un diámetro promedio o analizando cada una por separado.

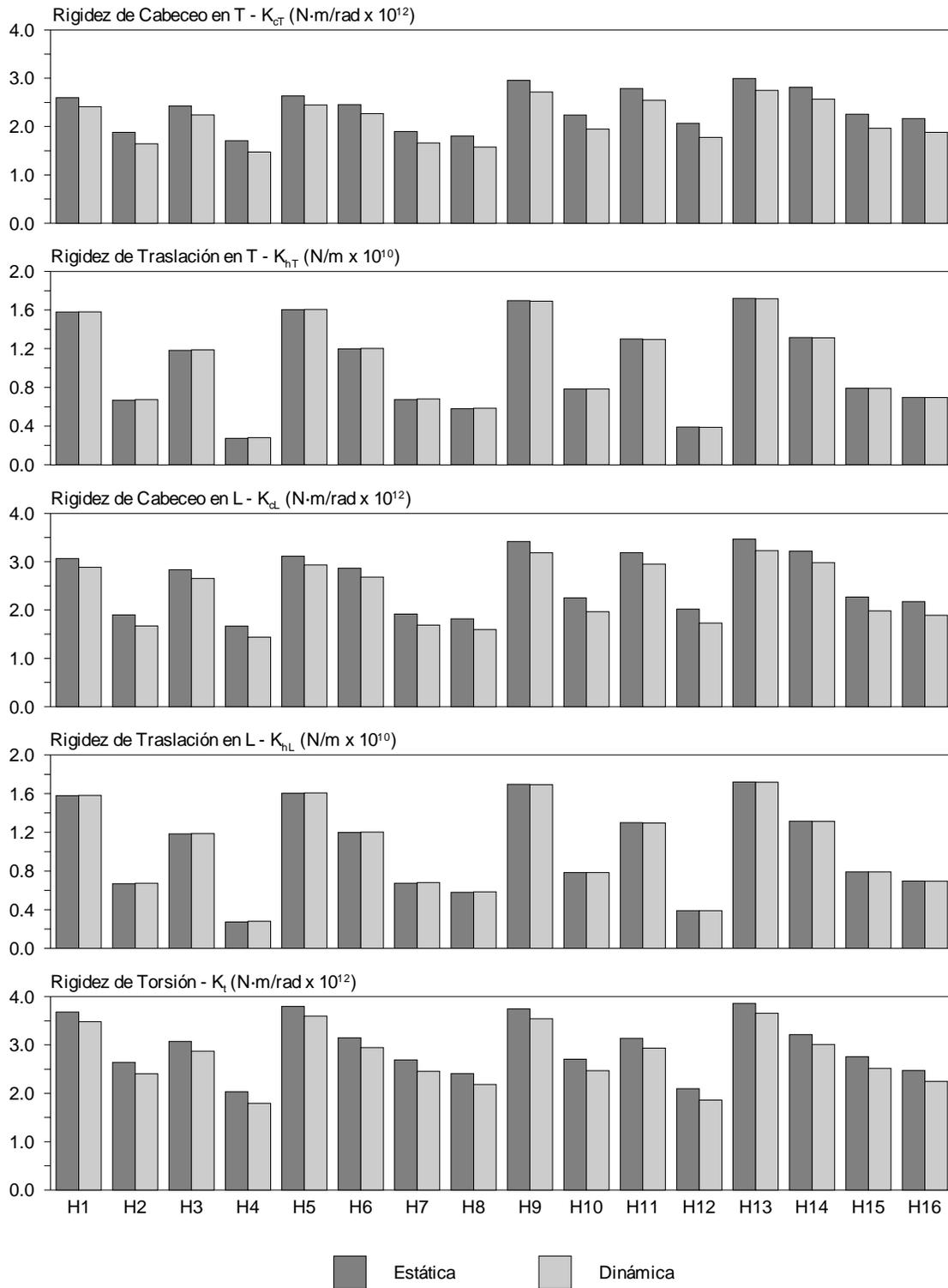
**Tabla 5.25 - Rigideces estáticas para las combinaciones propuestas con los casos de suelo con estratos**

Modelo	Combinación	Rigideces Estáticas				
		Dirección T		Dirección L		Torsión
		$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )
E1	CHe+PpE	3.70	1.87	4.55	1.87	4.17
E2	CHe+PpE.G	2.51	0.95	2.58	0.95	3.15
E3	CHe+PpE-SpE	3.52	1.47	4.30	1.47	3.55
E4	CHe+PpE.G-SpE	2.33	0.54	2.34	0.55	2.52
E5	CHe+PsE	3.77	1.92	4.64	1.92	4.38
E6	CHe+PsE-SsE	3.58	1.51	4.38	1.51	3.72
E7	CHe+PsE-EGE	2.54	0.97	2.62	0.97	3.26
E8	CHe+(PsE-SsE)-EGE	2.44	0.81	2.52	0.82	2.89
E9	CEe+PpE	4.07	1.99	4.91	1.99	4.24
E10	CEe+PpE.G	2.88	1.07	2.95	1.07	3.21
E11	CEe+PpE-SpE	3.89	1.59	4.67	1.59	3.61
E12	CEe+PpE.G-SpE	2.70	0.66	2.71	0.67	2.59
E13	CEe+PsE	4.14	2.04	5.00	2.04	4.45
E14	CEe+PsE-SsE	3.95	1.63	4.75	1.63	3.78
E15	CEe+PsE-EGE	2.91	1.09	2.99	1.09	3.33
E16	CEe+(PsE-SsE)-EGE	2.81	0.93	2.88	0.94	2.96

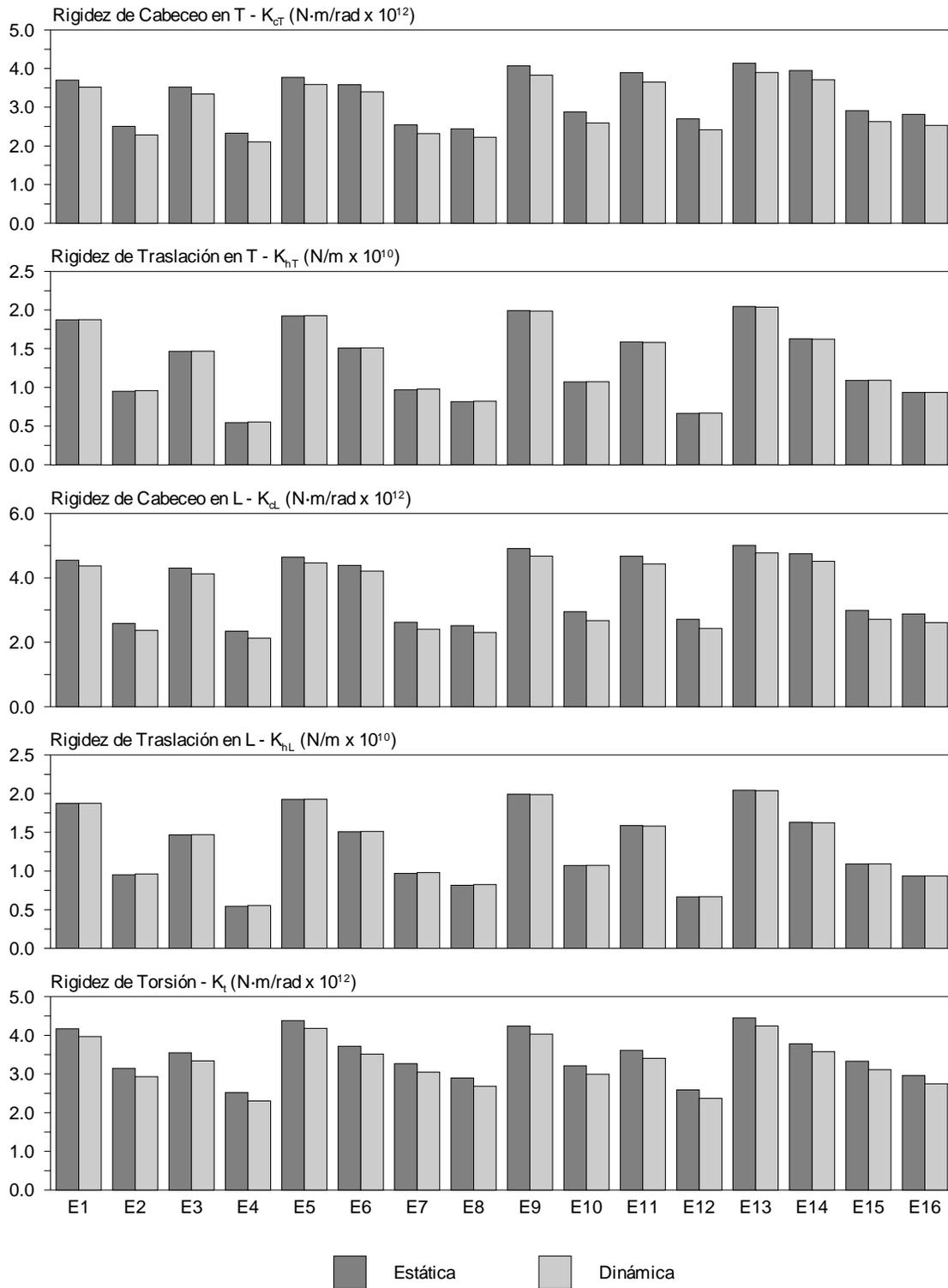
**Tabla 5.26 - Rigideces dinámicas para las combinaciones propuestas con los casos de suelo con estratos**

Modelo	Combinación	Rigideces Dinámicas				
		Dirección T		Dirección L		Torsión
		$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )
E1	CHe+PpE	3.52	1.88	4.37	1.88	3.97
E2	CHe+PpE.G	2.28	0.96	2.37	0.96	2.93
E3	CHe+PpE-SpE	3.34	1.47	4.13	1.47	3.34
E4	CHe+PpE.G-SpE	2.10	0.55	2.12	0.55	2.30
E5	CHe+PsE	3.59	1.93	4.46	1.93	4.18
E6	CHe+PsE-SsE	3.40	1.51	4.20	1.51	3.51
E7	CHe+PsE-EGE	2.32	0.98	2.40	0.98	3.05
E8	CHe+(PsE-SsE)-EGE	2.22	0.82	2.30	0.82	2.68
E9	CEe+PpE	3.83	1.99	4.67	1.99	4.03
E10	CEe+PpE.G	2.59	1.07	2.67	1.07	3.00
E11	CEe+PpE-SpE	3.65	1.58	4.43	1.58	3.41
E12	CEe+PpE.G-SpE	2.42	0.67	2.43	0.67	2.37
E13	CEe+PsE	3.90	2.04	4.77	2.04	4.24
E14	CEe+PsE-SsE	3.71	1.62	4.51	1.62	3.58
E15	CEe+PsE-EGE	2.63	1.09	2.71	1.09	3.11
E16	CEe+(PsE-SsE)-EGE	2.53	0.93	2.60	0.94	2.75

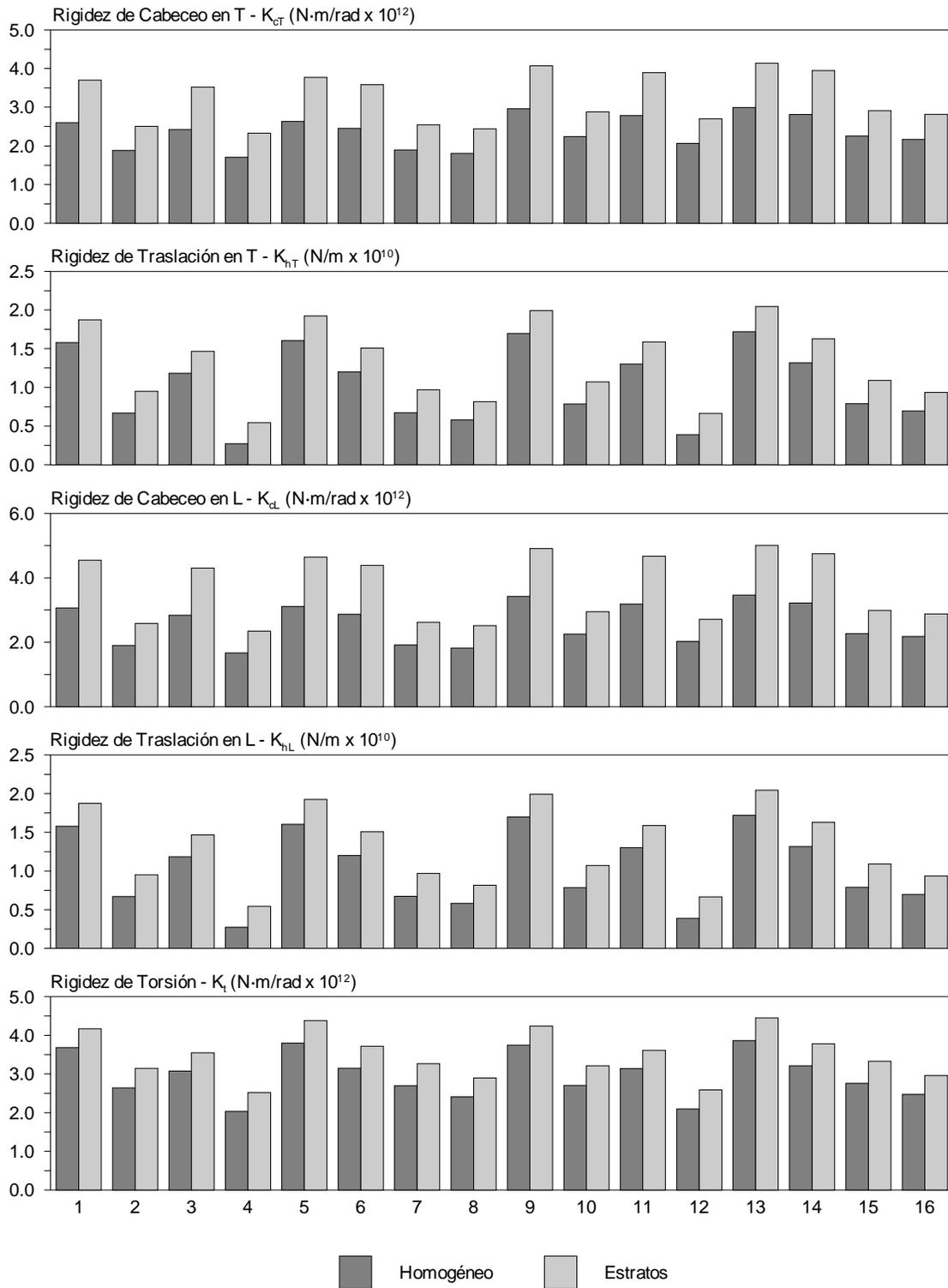
- En el extremo opuesto, los menores valores correspondieron al modelo H4, H12, E4 y E12, los cuales son fruto de combinar el aporte de cajón y pilas considerando tanto los efectos de grupo como los efectos de interacción entre las pilas, el suelo y el cajón de acuerdo con la propuesta de Kobori (1991).
- Al comparar los modelos que incluyen los efectos de grupo con respecto a aquellos en los que no son tenidos en cuenta, puede notarse que tal consideración afecta en mayor medida la rigidez de traslación que la de cabeceo. En la primera inducen a reducciones que varían entre 50 y 80 %, mientras que en la segunda ocasionan reducciones entre 20 y 40 %. Para la torsión, esta reducción está alrededor de 30 %.
- Por su parte, al compara los modelos que incluyen la propuesta de Kobori (1991) con aquellos que no hacen, se obtienen reducciones de 7, 20 y 15 % para los componentes de cabeceo, traslación y torsión, respectivamente.



**Fig 5.60 - Rigideces de la cimentación de las combinaciones propuestas con modelos de suelo homogéneo**



**Fig 5.61 - Rigideces de la cimentación de las combinaciones propuestas con modelos de suelo con estratos**



**Fig 5.62 - Comparación de las rigideces estáticas de las combinaciones propuestas entre los modelos que consideran suelo homogéneo y los que incluyen los estratos**

### 5.2.5 Comparaciones y comentarios

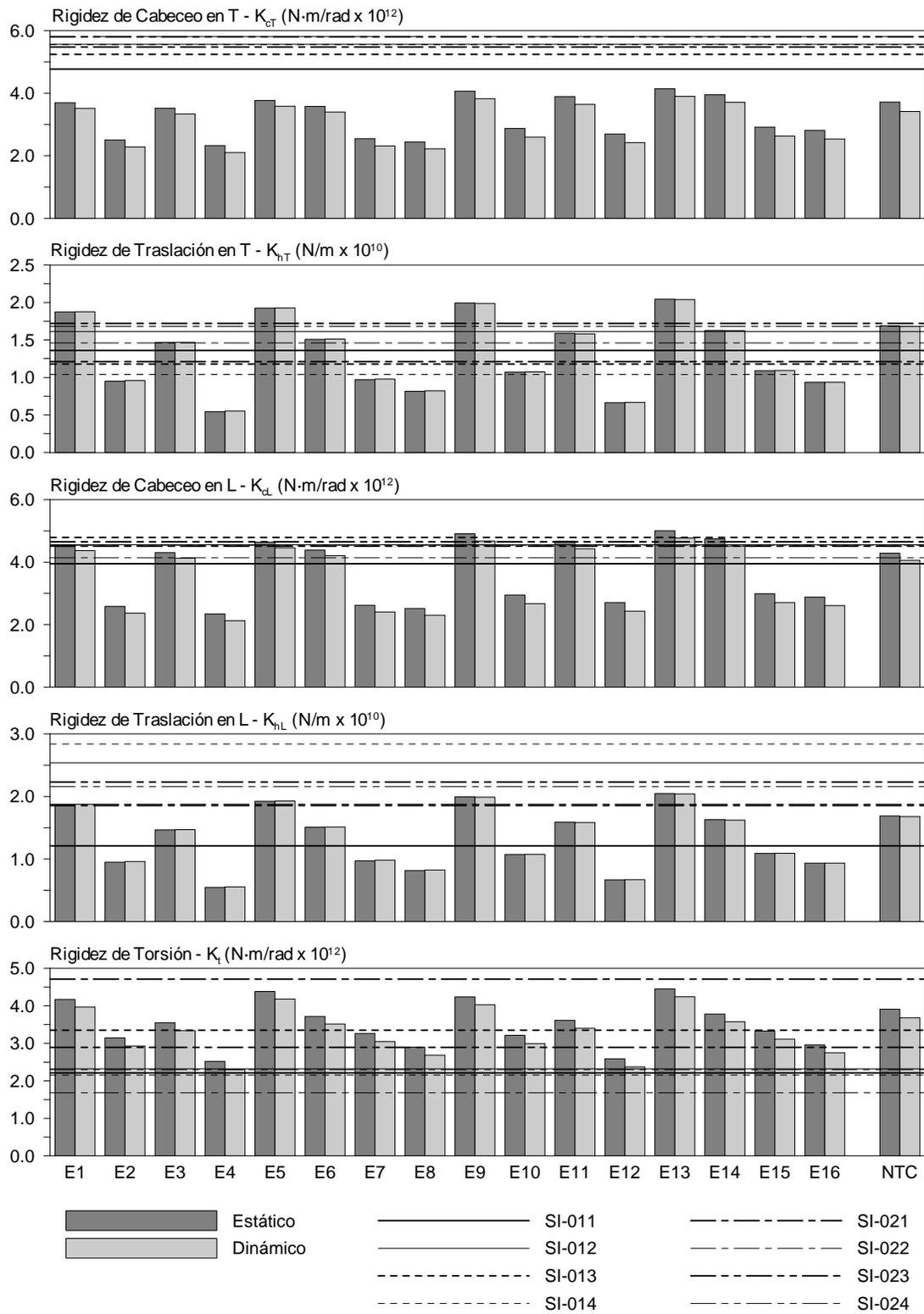
En la figura 5.63 se presenta una comparación entre los resultados obtenidos con el programa Dyna5 (Novak *et al.*, 1995) para los modelos combinados en los que se consideran el perfil de estratos del suelo de cimentación, los calculados de acuerdo con el procedimiento de las Normas Técnicas Complementarias (NTCDS-RCDF, 2000 y Gazetas, 1990) y los estimados con los ocho eventos seleccionados por medio del método de Luco (1980) para las rigideces de los movimientos de traslación, cabeceo y giro de la base. Las semejanzas y diferencias encontradas conducen a resaltar las siguientes observaciones:

- Los resultados obtenidos para todos los componentes de movimiento por el procedimiento normativo, tienden a ajustarse de mejor manera con aquellos modelos analizados en el programa Dyna5 en los que no se consideraron los efectos de grupo en pilas.
- Tanto el procedimiento normativo como los resultados obtenidos por el programa Dyna5, aun en aquellos modelos que no consideran los efectos de grupo en pilas, conducen a rigideces menores a las calculadas con el método simplificado de Luco para el movimiento por cabeceo de la base en el componente T.
- Para el movimiento por cabeceo en el componente L, se destaca que el intervalo que cubren los resultados obtenidos con el método de Luco, abarcan los valores alcanzados por el procedimiento de las normas NTCDS-RCDF (2000) y los estimados con el programa Dyna5 para los modelos que no consideran los efectos de grupo o aquellos que al menos consideran el efecto de interacción pilas-suelo-cajón.
- Las rigideces estimadas con el método de Luco para el movimiento por traslación en el componente T, oscilan dentro del margen que se define entre los modelos que consideran los efectos de grupo de pilas y los que no lo hacen.
- El mayor grado de dispersión se observa en la traslación del componente L, para el cual las rigideces obtenidas con el método de Luco varían desde 1.2 hasta  $2.8 \times 10^{10}$  N/m, abarcando desde los valores obtenidos con los modelos que consideran los efectos de grupo pilas-suelo-cajón, hasta valores superiores por mas del 50 % de los modelos que no consideran ningún efecto de grupo, o aquellos obtenidos con el procedimiento normativo.
- En cuanto a la torsión, caso en el que también se obtuvo una gran dispersión de resultados con el método de Luco, se puede comentar que al menos, estos se encuentran dentro del margen de los valores obtenidos por los demás métodos y que, a excepción del evento SI-021, las rigideces estimadas parecen concentrarse en mayor medida alrededor de las calculadas con los modelos en los que se consideran los efectos de grupo, tanto los de pilas como los del conjunto pilas-suelo-cajón.

Adicionalmente, con el objetivo de generar un concepto sobre el nivel de semejanza entre los métodos analíticos, en la tabla 5.27 se comparan los resultados en condiciones dinámicas de aquellos modelos elaborados en el programa Dyna5 que mejor representan el concepto de las normas NTCDS-RCDF (2000), con los resultados alcanzados con éstas mismas.

**Tabla 5.27 - Comparación entre los modelos H13, E13 y los obtenidos con NTCDS-RCDF (2000)**

Modelo	Combinación	Rigideces Dinámicas				
		Dirección T		Dirección L		Torsión
		$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )
H13	CE+PsH	2.75	1.72	3.23	1.72	3.66
E13	CEe+PsE	3.90	2.04	4.77	2.04	4.24
NTC	Totales	3.42	1.68	4.06	1.68	3.68



**Fig 5.63 - Comparación entre los resultados del programa Dyna5 para los modelos con estratos, los obtenidas con NTC-DS y los estimados para los eventos sísmicos con método de Luco**

En esta tabla se puede ver que para la traslación y la torsión en la base, el modelo H13 y el procedimiento normativo conducen a estimaciones similares, mientras que en los dos componentes de cabeceo, los resultados de NTCDS-RCDF (2000) representan un punto medio entre el modelo que considera el suelo homogéneo y el que toma en cuenta los estratos del suelo.

Por último, ya que de acuerdo con los métodos utilizados existe una relación directa entre las rigideces y los valores de frecuencia, en el caso del cabeceo resultaba interesante estimar las rigideces que se obtendrían con los valores de frecuencia límites que se identificaron en el análisis espectral ( $FT_c$ ) o en el análisis paramétrico modal. De manera que, dados los parámetros de masa y factores de participación modal (tabla 5.4) calculados para la aplicación del método de Luco (1980) y aplicando la ec 3.39, para valores de frecuencias de 1.3 y 3.0 Hz se obtendrían rigideces aproximadas de  $2.0 \times 10^{12}$  y  $7.0 \times 10^{12}$  N·m/rad, con lo que, para los valores más bajos de frecuencia asociados al movimiento de cabeceo, se llegaría a valores similares a aquellos obtenidos con los modelos en los que se tienen en cuenta los efectos de grupo en las pilas, mientras que en el caso contrario se estimarían rigideces bastante superiores a las de los modelos que no consideran efectos de grupo o a los resultados obtenidos con el procedimiento normativo.

## COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Se estudió la respuesta de dinámica y los efectos de interacción suelo-estructura (ISE) de un edificio recientemente instrumentado en la ciudad de Acapulco, para el cual se analizó una selección de ocho de los más de noventa sismos registrados hasta el momento, todos ellos de baja intensidad, más los resultados obtenidos con dos registros de vibración ambiental.

Para la identificación de las propiedades del sistema, cada uno de los registros fue analizado mediante un proceso espectral convencional por medio del cual se identificaron las frecuencias y formas modales del conjunto suelo-estructura. Adicionalmente, los amortiguamientos críticos del sistema fueron estimados por el método de amplificación dinámica y mediante un procedimiento de ajuste lineal de un modelo de varios grados de libertad.

De entre los ocho sismos registrados, se seleccionaron los dos eventos para los cuales se observaron mayores reducciones en las frecuencias fundamentales en el análisis espectral (SI-011 y SI-021), para ser sometidos a una serie de análisis que permitieran conocer la evolución de las propiedades del sistema durante su ocurrencia. Se aplicó un proceso espectral por ventanas para la estimación de las frecuencias y los amortiguamientos críticos, el procedimiento de cruces por cero para la valoración de la frecuencia fundamental y una técnica paramétrica modal que permitió estimar tanto frecuencias, como amortiguamientos críticos y factores de participación de cada uno de los modos.

Las variaciones observadas en el valor de las frecuencias entre evento y evento y a lo largo de los dos sismos seleccionados, con reducciones asociadas a la intensidad o a las máximas amplitudes en aceleración, además del análisis de las señales tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, indicaron la presencia de comportamientos no lineales en el sistema, aun ante eventos de baja intensidad como los registrados, posiblemente atribuibles a un reajuste inicial del sistema estructural mismo o de sus componentes, y a la evidente presencia de los efectos ISE, los cuales también presentan evidencias de un comportamiento no lineal en el sistema de interacción.

Es valioso resaltar los resultados obtenidos para amortiguamientos críticos mediante el procedimiento de ajuste lineal propuesto en el apéndice D. Si bien se sabe que éste es un parámetro inestable en los procedimientos de identificación de sistemas, a excepción hecha de las limitaciones propias del procedimiento espectral, el ajuste de esta nueva técnica con respecto a los resultados obtenidos mediante el análisis paramétrico modal, señalan que este método se constituye en un valioso aporte para facilitar una rápida aproximación a los valores de amortiguamiento de los modos fundamentales y superiores.

Ahora bien, pasando al problema de la caracterización de los efectos ISE, este fue abordado desde dos puntos de vista: la identificación de las frecuencias de los componentes de movimiento del sistema y la estimación de las rigideces asociadas a cada uno de ellos, entendiéndose por estos, los movimientos de la estructura con base empotrada en traslación y torsión, y los de cabeceo, traslación y torsión de la base misma, los cuales fueron estimados tanto mediante técnicas de identificación de sistemas paramétricas y no paramétricas, como mediante procedimientos normativos y el uso de un programa para el cálculo de la respuesta dinámica de cimentaciones.

Para la identificación de la frecuencia de la estructura cuando esta se considera con base empotrada, en general, en los resultados obtenidos por los diferentes procedimientos espectrales, es decir, mediante el método simplificado de Luco o mediante el cálculo de funciones de transferencia ( $FT_e$ ), bien fuera para un análisis de señales completas o por ventanas (en el caso de los eventos SI-011, SI-021 y SI-022), se observó la existencia de una influencia proveniente de los demás componentes de movimiento debido al acoplamiento propio entre ellos y a las limitaciones de los procedimientos espectrales.

Esta influencia, que dificultó el proceso de identificación y pudo alterar los valores estimados, fue superada mediante el análisis paramétrico modal. Este último permitió refinar dichos resultados para llegar a concluir que los cambios más significativos en la frecuencia fundamental de la estructura, y por lo tanto en su rigidez, se dieron durante las primeras ventanas de los eventos registrados, especialmente en el primero y más intenso de todos, y que pasadas estas fases su comportamiento era prácticamente lineal o con variaciones despreciables. Este cambio detectado en la fase intensa de los eventos se asocia con el reacomodo natural de los elementos estructurales del edificio y con las características propias de una estructura de su tipo.

Adicionalmente, interesó profundizar en el comportamiento de los movimientos propios de la cimentación. Mediante la aplicación del método simplificado de Luco se identificó que el movimiento que influía en mayor medida en la respuesta total del sistema, era el movimiento por cabeceo de la base, para el cual se estimaron aproximadamente participaciones de 15 y 30 % para los componentes T y L, respectivamente. Mientras que los movimientos de traslación y torsión en la base en ningún caso excedieron valores de consideración. Por lo tanto, y dada la baja calidad de las señales de traslación y torsión, la identificación de las frecuencias de los efectos ISE se centró en el componente de cabeceo.

En una primera etapa se analizaron las funciones de transferencia entre las señales verticales en puntos estratégicos del sótano buscando caracterizar el movimiento de cabeceo. Se detectó que las funciones de transferencia directas entre los costados y el centro estaban fuertemente influenciadas por el movimiento de traslación de la estructura, por lo que se obtuvieron mejores resultados haciendo uso del cociente  $FT_c$ . Al calcular esta función de transferencia para los ocho eventos seleccionados, se encontró que el movimiento de cabeceo no estaba definido por un único valor de frecuencia, sino que por el contrario se manifestaba en múltiples intervalos. Este mismo procedimiento fue aplicado en un análisis espectral por ventanas para algunos de los eventos seleccionados (SI-011, SI-021 y SI-022).

Se encontró entonces que los valores a los cuales conducía el método simplificado, en el caso del cabeceo, no necesariamente satisfacían el comportamiento encontrado en el análisis espectral, en el cual, para el análisis por ventanas, se detectó que los intervalos en los que se definían las ordenadas asociadas con el movimiento de cabeceo, variaban considerablemente a lo largo del tiempo, y se definían más claramente en el componente L que en el T.

Para comprender mejor este comportamiento se utilizó el método paramétrico modal, haciendo uso de modelos en una y dos componentes de movimiento. En un primer paso se observó también que el movimiento de cabeceo estaba influenciado por la traslación de la estructura, por lo que se recurrió a procesos de filtrado, logrando aislar la intervención de los modos fundamentales del sistema, a partir de lo cual fue posible identificar comportamientos similares a los que se detectaron en el análisis espectral por ventanas.

Lo anterior, permitió concluir que si bien el método simplificado de Luco es útil para obtener un concepto sobre el grado de participación de cada uno de los componentes del movimiento del sistema suelo-estructura, así como para llegar a una valoración preliminar sobre las posibles variaciones en la frecuencia de cabeceo, no es válido entender sus resultados como los únicos representativos de este movimiento.

Además, se encontró que el intervalo dentro del cual oscilan los múltiples valores de frecuencias de cabeceo se define más claramente en el componente L que en el T, logrando identificar para el primero un intervalo entre 1.5 y 3.0 Hz, mientras que para el segundo tal intervalo es mucho más amplio y por lo tanto la frecuencia del movimiento no puede definirse claramente. Este comportamiento parece asociarse con el hecho de que es en el componente L en el que la estructura tiene una mayor rigidez gracias a la presencia de los muros de concreto ubicados en esa dirección, y concuerda con que es justamente para el componente L para el cual los factores de participación identificados con el método simplificado de Luco son mayores. En el futuro podría estudiarse la existencia de una relación entre la estrechez del intervalo de frecuencias identificado y la rigidez de la superestructura.

También se estudiaron las rigideces efectivas de cada uno de los componentes de movimiento del conjunto suelo-estructura. En primer lugar, estas fueron estimadas a partir de los datos experimentales por medio del

método simplificado de Luco y posteriormente, puesto que se conocían las características del suelo y la cimentación, estas rigideces fueron valoradas con los procedimientos normativos y mediante los modelos analizados con el programa Dyna5, para los cuales se tuvieron en cuenta variantes tales como considerar condiciones de suelo homogéneo o con estratos, y tener o no en cuenta los efectos de grupo pilas-suelo-pilas y pilas-suelo-cajón.

Se encontró que en general las rigideces estimadas con modelos en los que se consideró el perfil de estratos del suelo eran mayores que si las obtenidas con los modelos en los que el suelo se asumía un suelo de características homogéneas. Además, se observó que al comparar las rigideces estimadas para condiciones estáticas y dinámicas, dado el intervalo de frecuencias dentro del cual se encuentran tanto la frecuencia característica del suelo de cimentación, como las frecuencias fundamentales del sistema, la variación entre ambas consideraciones no excedía del 10 %.

Al igual que en el caso de las frecuencias, los valores de rigidez estimados con el método simplificado de Luco para los componentes de movimiento por traslación y torsión de la base, variaron en gran medida entre evento y evento. De tal manera que no fue posible aclarar si ajustaban con los resultados obtenidos con el procedimiento normativo o con alguno de los modelos evaluados con el programa Dyna5.

Ahora bien, para las rigideces asociadas con el movimiento debido al cabeceo de la base, los valores calculados en el componente T mediante los dos métodos analíticos fueron inferiores a los obtenidos a partir de la información experimental, con diferencias hasta del 50 % cuando se comparan con los modelos en los que se consideran los efectos de grupo, y hasta del 30 % en relación a los modelos en los que no se incluyen dichos efectos. Mientras que en el componente L se observó que los valores estimados experimentalmente se ajustaron de manera adecuada a los estimados con los modelos en los que nos se consideraron los efectos de grupo pilas-suelo-pilas, o al menos con aquellos en los que únicamente se consideraron los efectos de grupo pilas-suelo-cajón, o bien con la rigidez calculada con el procedimiento reglamentario.

Lo anterior permite concluir que, al menos para el caso del edificio en estudio y de acuerdo con los resultados obtenidos con el método simplificado de Luco, los efectos de grupo pilas-suelo-pilas tienen poca influencia en la estimación de las rigideces de cabeceo. Aun cuando es preciso recordar que las rigideces estimadas por el método simplificado están asociadas a un valor único de frecuencia, lo cual, conforme a lo encontrado, no es estrictamente cierto. Atendiendo además, que solo en el componente L fue posible identificar un intervalo de frecuencias suficientemente bien definido.

Por lo tanto, esta conclusión no puede tomarse con absoluto rigor, ya que a pesar de que en dicho componente el movimiento se define de manera más clara, lo cierto es que tal valor de rigidez, al igual que la frecuencia con la cual se asocia, no es un único valor representativo del movimiento, y por lo tanto debe pensarse en el hecho de que así como se identificó que la frecuencia de cabeceo en L se ubicaba entre 1.3 y 3.0 Hz, entonces bien podría decirse que la rigidez asociada podría variar entre  $2.0 \times 10^{12}$  y  $7.0 \times 10^{12}$  N·m/rad, lo cual indicaría que, en el límite inferior, la rigidez por cabeceo en L coincidiría con el resultado obtenido para los modelos en los que sí se tienen en cuenta los efectos de grupo o, por el contrario, en el límite superior, se estimarían rigideces muy superiores, incluso con respecto a los modelos en los que no se tiene en cuenta ningún factor de reducción.

En conclusión, de acuerdo a las reducciones finales que se obtuvieron tanto en el sistema como en la estructura, contemplando las variaciones que se observan a lo largo de los sismos analizados y a los cambios detectados entre evento y evento, y de acuerdo con las características observadas en el análisis de los efectos ISE, principalmente sobre el movimiento de cabeceo de la base, se puede señalar que el edificio en estudio revela la presencia de comportamientos con características no lineales, detectables aun para eventos de baja intensidad como los registrados. Estos son atribuibles en primer lugar, a un reajuste natural de los elementos que conforman una estructura de su tipo, y cuyos efectos guardan una relación íntima con las amplitudes de la excitación, y en segundo lugar, a la influencia de los efectos ISE, presentes especialmente en el componente de cabeceo.

Lo anterior hace pensar que es necesario que en el futuro se realicen estudios similares en edificios instrumentados sobre los cuales se conozca acerca de la presencia de efectos ISE, de manera que trabajos posteriores puedan llegar a aportar a la práctica profesional recomendaciones específicas a cerca de cuáles deban ser las condiciones bajo las cuales convenga estimar las rigideces del sistema de cimentación por procedimientos analíticos como los propuestos en las normas o los que facilitan programas comerciales. La reunión de un mayor número de trabajos en esta línea, podrían conducir a la formulación de factores que obliguen a los diseñadores a evaluar los modelos de las estructuras no sólo ante valores únicos de rigidez, sino también ante los intervalos en los cuales se identifique que estas actúan.

Por último, el anterior trabajo sirve para establecer un primer estado de conocimiento sobre las propiedades dinámicas y de interacción del edificio en estudio. Se espera que su continuo estudio, en especial ante la llegada sismos de mayor intensidad, arroje resultados que permitan ser más contundentes sobre las propiedades del sistema de cimentación, y así poder contribuir a la mejora de la práctica profesional.

## APÉNDICE A

### PROCEDIMIENTO PARA LA GENERACIÓN DE SEÑALES

Debido a los usos y ocupación de las estructuras, es común que los instrumentos no puedan ubicarse en los lugares óptimos para los posteriores análisis de identificación de sistemas y efectos de interacción suelo-estructura. Es por ello que a menudo, ante la ausencia de los registros correspondientes a determinados puntos estratégicos, se recurre a realizar operaciones simples entre las señales con las que se cuenta.

Un caso frecuente es la ausencia de señales de traslación en el centro de algún nivel, lo que generalmente se acostumbra resolver efectuando promedios entre señales correspondientes a extremos opuestos. Sin embargo, las señales en los extremos poseen un componente de movimiento debido a la torsión tal que, en un análisis espectral o en el tiempo, implican amplitudes mayores y alteraciones en el contenido de frecuencias de la nueva señal.

De igual forma suelen faltar registros de movimiento vertical en determinados puntos de los niveles de planta baja o sótano, los cuales son valiosos para la mejor estimación de los efectos ISE. Es recurrente entonces, resolver esta ausencia de señales al centro o sobre los ejes centroidales que definen los componentes de movimiento, escogiendo pares de señales representativas de cada dirección, aun cuando se encuentren en las esquinas y por lo cual son movimientos fruto del acoplamiento entre las diferentes direcciones.

Tal es el caso del edificio SIS, el cual carece de instrumentos en algunos sitios de interés para la estimación de sus propiedades dinámicas y del comportamiento de la interacción.

Para resolver este detalle y con la intención de no incurrir en los errores señalados al proceder conforme se ha acostumbrado en otros casos, se desarrollaron procedimientos para la generación de señales verticales y de traslación basados en la hipótesis de que los diafragmas son infinitamente rígidos. Si bien dicho supuesto en rigor no es del todo cierto, se observó que la estimación era bastante mejor que el uso de promedios simples, anulando aceptablemente los efectos de torsión y acoplamiento.

El procedimiento que se desarrolla a continuación fue implementado en el programa Extrapolar (Taborda y Murià-Vila, 2002).

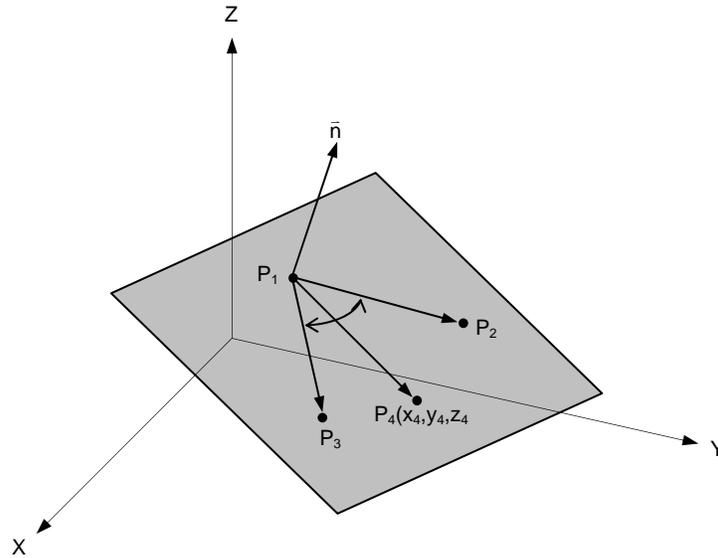
#### A.1 GENERACIÓN DE SEÑALES VERTICALES

Para la generación de señales verticales se parte del precepto de que se conocen tres señales verticales y las coordenadas de los instrumentos que las registran, es decir, su ubicación en el plano. Se desea entonces conocer la historia en el tiempo de un cuarto punto ubicado en una coordenada cualquiera en el plano.

Se tiene entonces que, para un instante de tiempo dado, las coordenadas en el espacio de los tres puntos conocidos están dadas por

$$\begin{aligned} P_1(x_1, y_1, z_1) \\ P_2(x_2, y_2, z_2) \\ P_3(x_3, y_3, z_3) \end{aligned} \tag{A.1}$$

donde se considera que las coordenadas  $x$  y  $y$  son constantes, y únicamente la coordenada  $z$  es considerada como una función del tiempo.



**Fig A.1 - Planteamiento para la ecuación de un plano en el espacio**

$$z_i = z_i(t) \tag{A.2}$$

Interesa pues conocer la historia del tiempo  $z_4(t)$  para el cuarto punto, del cual sólo se conocen sus coordenadas  $x_4$  y  $y_4$ .

Conocidas las coordenadas en los tres componentes para los puntos  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$ , es posible determinar para un instante de tiempo dado, la ecuación del plano que se define por estos tres puntos (fig A.1). De manera que se requiere conocer primero los vectores que se definen entre los puntos  $P_1$  y  $P_2$ , y  $P_1$  y  $P_3$ , los cuales están dados por las ecs A.3 y A.4, respectivamente.

$$\vec{a} = \overline{P_1P_2} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \tag{A.3}$$

$$\vec{b} = \overline{P_1P_3} = (x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1) \tag{A.4}$$

Por medio del producto cruzado entre estos dos vectores es posible encontrar entonces el vector que define el plano de interés, así

$$\vec{n} = \vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} \tag{A.5}$$

de manera que se obtiene

$$\begin{aligned} \vec{n} = & i[(y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1)] \\ & - j[(x_2 - x_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(x_3 - x_1)] \\ & + k[(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1)] \end{aligned} \tag{A.6}$$

Si se definen las constantes  $A$ ,  $B$  y  $C$ , como

$$A = (y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(y_3 - y_1) \quad (\text{A.7})$$

$$B = -[(x_2 - x_1)(z_3 - z_1) - (z_2 - z_1)(x_3 - x_1)] \quad (\text{A.8})$$

$$C = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) \quad (\text{A.9})$$

Entonces el vector que define el plano se puede expresar como

$$\vec{n} = (A, B, C) \quad (\text{A.10})$$

Adicionalmente, se conoce un vector cualquiera contenido en el plano y determinado por el punto  $P(x, y, z)$  y el punto  $P_1$  (ec A.11)

$$\overline{P_1P} = (x - x_1, y - y_1, z - z_1) \quad (\text{A.11})$$

Dado lo anterior, la ecuación del plano puede determinarse al igualar a cero el producto punto entre el vector que lo define con un vector cualquiera contenido en el mismo plano (ec A.10), tal como se presenta en las siguiente expresión.

$$\overline{P_1P} \cdot \vec{n} = 0 \quad (\text{A.13})$$

Si se remplazan las ecs A.10 y A.11 en la ec A.12, se tiene

$$(x - x_1, y - y_1, z - z_1) \cdot (A, B, C) = 0 \quad (\text{A.14})$$

lo cual equivale a

$$Ax + By + Cz + (-Ax_1 - By_1 - Cz_1) = 0 \quad (\text{A.15})$$

Si se define el término  $D$  como

$$D = -Ax_1 - By_1 - Cz_1 \quad (\text{A.16})$$

entonces la ecuación del plano finalmente puede expresarse de la siguiente manera.

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (\text{A.17})$$

Dado que las coordenadas de los puntos en  $z$  son funciones del tiempo, la ecuación del plano para un instante dado puede escribirse de nuevo como

$$A(t)x + B(t)y + Cz(t) + D(t) = 0 \quad (\text{A.18})$$

Nótese que  $C$  es un término únicamente dependiente de las coordenadas en el plano de los puntos conocidos y por lo tanto es una constante que no depende del tiempo.

Dado lo anterior, si se desea conocer la historia en el tiempo, para el componente en  $Z$ , de un cuarto punto  $P_4$  sobre cual se conocen sus coordenadas en el plano  $(x_4, y_4)$ , ésta estará dada por

$$z_4(t) = \frac{-D(t) - A(t)x_4 - B(t)y_4}{C} \quad (\text{A.19})$$

donde los términos a la derecha de la igualdad son conocidos en cualquier instante de tiempo  $t$  y están dados por las siguientes expresiones.

$$A(t) = (y_2 - y_1)(z_3(t) - z_1(t)) - (z_2(t) - z_1(t))(y_3 - y_1) \quad (\text{A.20})$$

$$B(t) = -((x_2 - x_1)(z_3(t) - z_1(t)) - (z_2(t) - z_1(t))(x_3 - x_1)) \quad (\text{A.21})$$

$$C = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (y_2 - y_1)(x_3 - x_1) \quad (\text{A.22})$$

$$D(t) = -A(t)x_1 - B(t)y_1 - Cz_1(t) \quad (\text{A.23})$$

De esta manera, conocida la ubicación e historias de tiempo en  $Z$  de tres puntos  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  en el plano, puede generarse la historia de movimiento de cualquier punto  $P_4$ .

## A.2 GENERACIÓN DE SEÑALES DE TRASLACIÓN

Para el caso de la generación de señales de traslación se conocen tres señales. Dos de ellas corresponden al movimiento de un mismo punto y la tercera pertenece al movimiento en dirección  $Y$  de un segundo punto. Para ambos puntos se conocen sus coordenadas iniciales en el plano. Se desean conocer las historias de movimiento en las direcciones  $X$  y  $Y$  de un tercer punto cualquiera.

La solución del problema se obtiene a partir de asumir que los tres puntos conforman entre sí un cuerpo rígido que puede ser representado como un triángulo (fig A.2).

Para el estado inicial ( $t_0$ ) se conocen las coordenadas de los tres puntos ( $A$ ,  $B$  y  $C$ ), es decir

$$\begin{aligned} x_a, y_a \\ x_b, y_b \\ x_c, y_c \end{aligned}$$

Para un instante de tiempo cualquiera ( $t$ ) se conocen totalmente los movimientos relativos al estado inicial en el punto  $A$ , y parcialmente en el punto  $B$

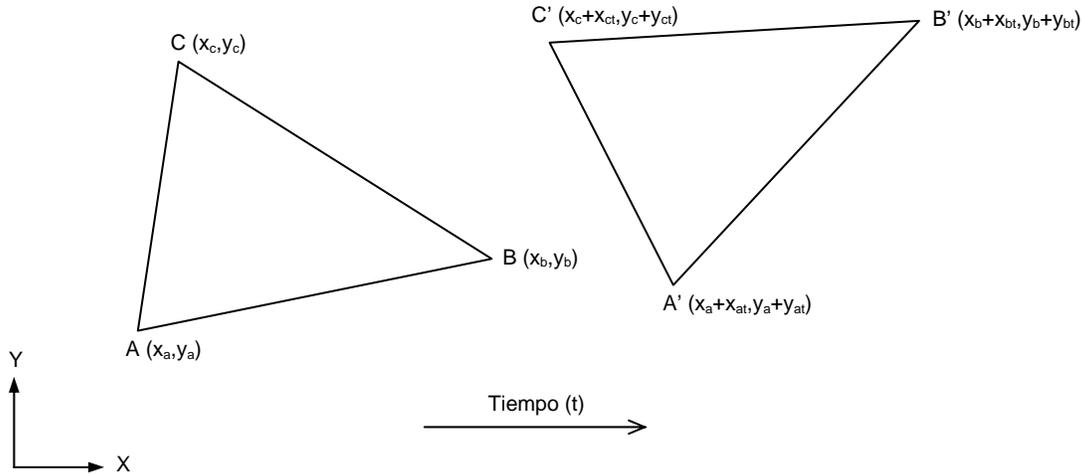
$$\begin{aligned} x_{at}, y_{at} \\ y_{bt} \end{aligned}$$

mientras que se desconoce el componente de movimiento en  $X$  para el punto  $B$ .

$$x_{bt}$$

Se desean conocer los movimientos relativos a su estado inicial del punto  $C$ .

$$x_{ct}, y_{ct}$$



**Fig A.2 - Planteamiento sobre el cambio de posición en el tiempo**

Para poder determinar las historias de movimiento en el punto  $C$ , se requiere primero conocer completamente el movimiento en el punto  $B$ . Esto se logra hallando para un instante dado, la intersección entre la recta que se define por el movimiento conocido  $y_{bt}$  y el círculo que forma por el giro de la recta entre los puntos  $A'$ ,  $B'$  y  $B''$  (fig A.3).

La ecuación de la recta está dada por

$$Y = y_b + y_{bt} \tag{A.24}$$

Para definir la ecuación del círculo se requiere conocer las coordenadas de su vértice y la dimensión de su radio. Estos están dados por las expresiones 5.25 y 5.26, respectivamente.

$$V(x_a + x_{at}, y_a + y_{at}) \tag{A.25}$$

$$r = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} \tag{A.26}$$

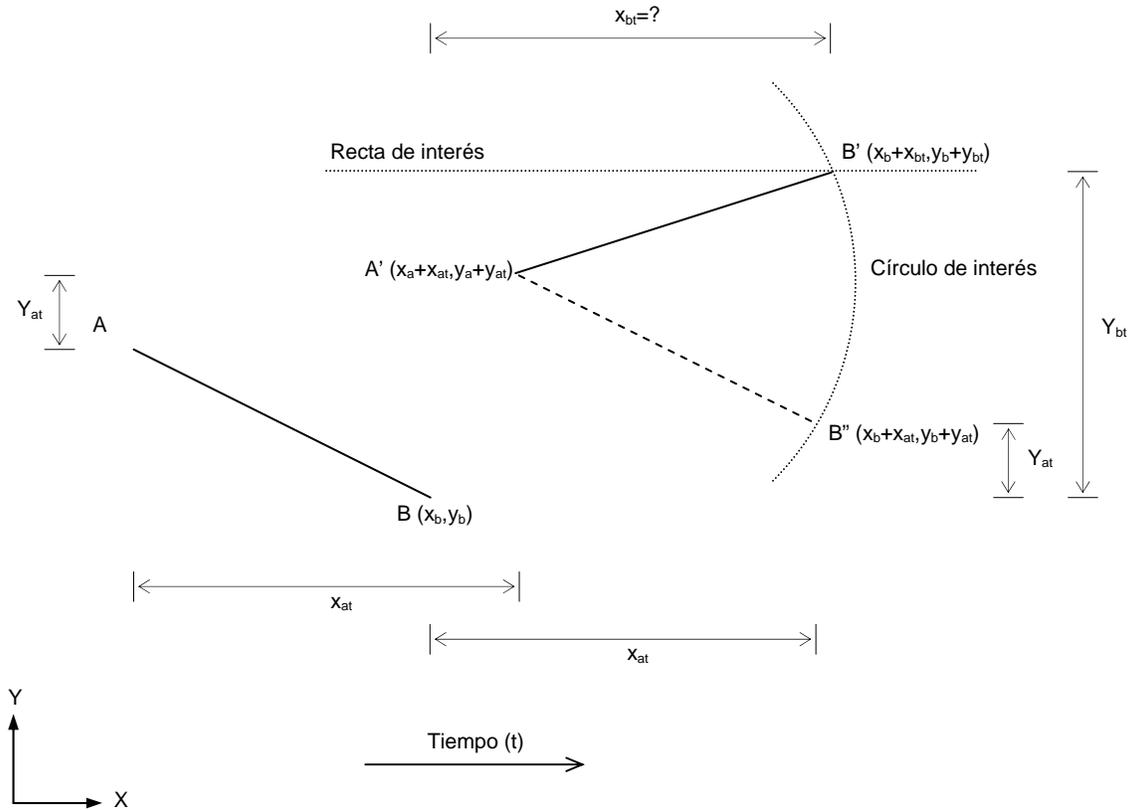
De forma que la ecuación del círculo queda definida como sigue.

$$\left( (x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 \right) = \left( X - (x_a + x_{at}) \right)^2 + \left( Y - (y_a + y_{at}) \right)^2 \tag{A.27}$$

Se sabe que las coordenadas en el punto  $B'$  son

$$X = x_b + x_{bt} \tag{A.28}$$

$$Y = y_b + y_{bt} \tag{A.29}$$



**Fig A.3 - Planteamiento para determinar totalmente el movimiento en el segundo punto (B)**

Una de las cuales es la misma ecuación de la recta de interés. De manera que, al remplazar las ecs A.28 y A.29 en la ecuación del círculo, se obtiene

$$\left( (x_b + x_{bt}) - (x_a + x_{at}) \right)^2 = (x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 - \left( (y_b + y_{bt}) - (y_a + y_{at}) \right)^2 \quad (A.30)$$

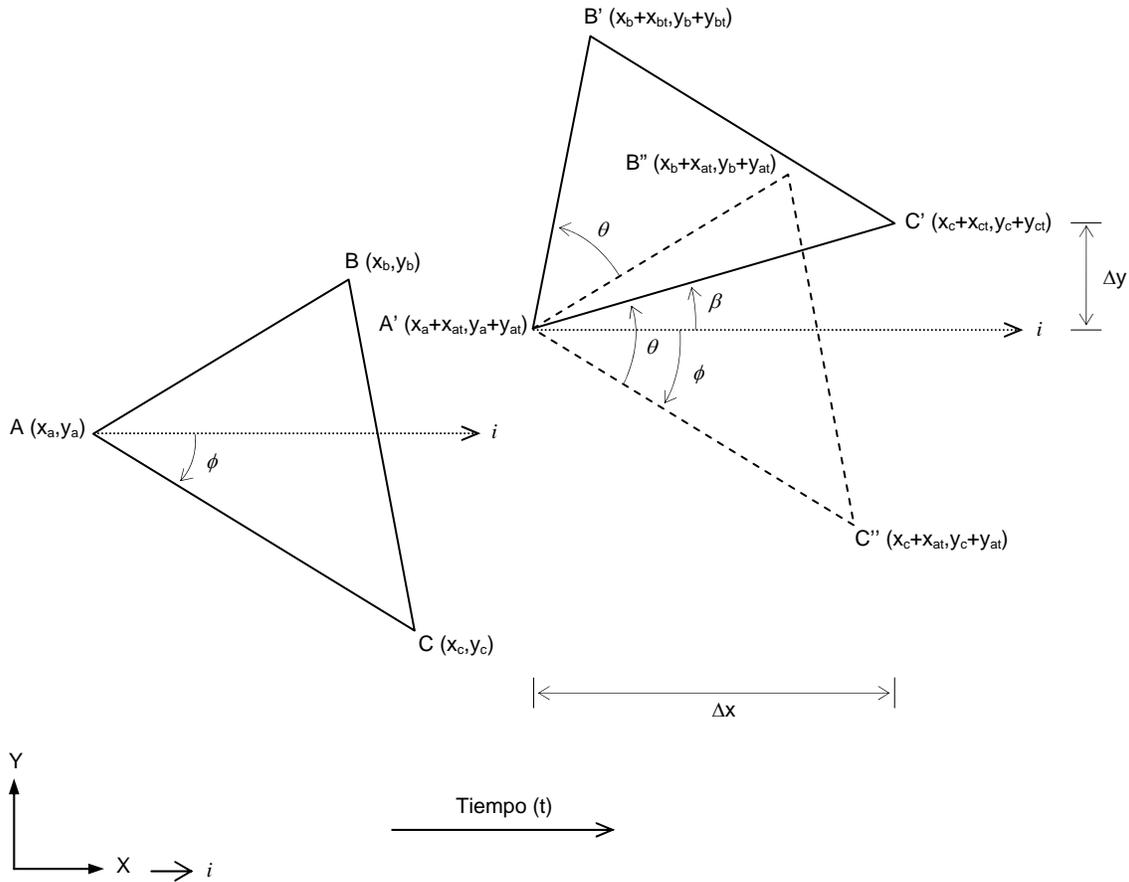
de donde se puede despejar el movimiento relativo en X del punto B, es decir

$$x_{bt} = \pm \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 - (y_b + y_{bt} - y_a - y_{at})^2} - x_b + x_a + x_{at} \quad (A.31)$$

De acuerdo con la expresión A.31, la historia del desplazamiento relativo del punto B tiene dos soluciones. Se ha observado que la solución deseada es aquella que esté asociada a un menor ángulo de giro.

Ahora que se conoce completamente el movimiento en el punto B, es decir, las coordenadas del punto B', interesa determinar el movimiento en el punto C, lo cual se logra si se conocen los movimientos relativos del punto C' ( $x_{ct}$  y  $y_{ct}$ ).

Para lograr esto se requiere poder determinar el giro del cuerpo rígido una vez que este se traslada, el cual está determinado por el ángulo  $\theta$  (fig A.4) y adicionalmente se deben conocer los ángulos relativos al eje X,  $\phi$  y  $\beta$ .



**Fig A.4 - Planteamiento para determinar el movimiento en el tercer punto (C)**

Para determinar los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  se recurrirá al producto punto entre los vectores que los definen. Sin embargo, dado que el producto punto es conmutativo, el signo del ángulo debe ser definido a partir del signo del producto cruz entre ambos vectores.

De manera que

$$\theta = (SGN_1) \cos^{-1} \left( \frac{\overline{A'B''} \cdot \overline{A'B'}}{\|\overline{A'B''}\| \|\overline{A'B'}\|} \right) \quad (A.32)$$

donde

$$SGN_1 = f_{Signo} (\overline{A'B''} \times \overline{A'B'}) \quad (A.33)$$

Para lo cual vale la pena señalar que

$$\|\overline{A'B''}\| \|\overline{A'B'}\| = \|\overline{AB}\|^2 \quad (A.34)$$

donde

$$\|\overline{AB}\| = (x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 \quad (\text{A.35})$$

De manera que siendo

$$\overline{A'B''} = (x_b + x_{at} - x_a - x_{at}, y_b + y_{at} - y_a - y_{at}) \quad (\text{A.36})$$

$$\overline{A'B'} = (x_b + x_{bt} - x_a - x_{at}, y_b + y_{bt} - y_a - y_{at}) \quad (\text{A.37})$$

Si se define

$$K_1 = \frac{\overline{A'B''} \cdot \overline{A'B'}}{\|\overline{A'B''}\| \|\overline{A'B'}\|} \quad (\text{A.38})$$

$$K_1 = \frac{(x_b - x_a)(x_b + x_{bt} - x_a - x_{at}) + (y_b - y_a)(y_b + y_{bt} - y_a - y_{at})}{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} \quad (\text{A.39})$$

y además se sabe que

$$\overline{A'B''} \times \overline{A'B'} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ (x_b - x_a) & (y_b - y_a) & 0 \\ (x_b + x_{bt} - x_a - x_{at}) & (y_b + y_{bt} - y_a - y_{at}) & 0 \end{vmatrix} \quad (\text{A.40})$$

$$\overline{A'B''} \times \overline{A'B'} = \vec{k} [(x_b - x_a)(y_b + y_{bt} - y_a - y_{at}) - (y_b - y_a)(x_b + x_{bt} - x_a - x_{at})] \quad (\text{A.41})$$

entonces

$$SGN_1 = f_{\text{Signo}} \left( (x_b - x_a)(y_b + y_{bt} - y_a - y_{at}) - (y_b - y_a)(x_b + x_{bt} - x_a - x_{at}) \right) \quad (\text{A.42})$$

De manera que el ángulo de giro del cuerpo rígido queda determinado por

$$\theta = (SGN_1) \cos^{-1}(K_1) \quad (\text{A.43})$$

Ahora entonces interesa conocer el ángulo  $\phi$ , cuyo valor y sentido se pueden determinar a partir del producto punto y el producto cruz entre los vectores que se definen entre los puntos A y C, y el eje X, así.

$$\phi = (SGN_2) \cos^{-1} \left( \frac{\vec{i} \cdot \overline{A'C''}}{\|\vec{i}\| \|\overline{A'C''}\|} \right) \quad (\text{A.43})$$

donde

$$SGN_2 = f_{\text{Signo}} (\vec{i} \times \overline{A'C'}) \quad (\text{A.44})$$

siendo

$$\bar{i} = (1, 0) \quad (\text{A.45})$$

$$\overline{A'C''} = \overline{AC} = (x_c - x_a, y_c - y_a) \quad (\text{A.46})$$

y

$$\|\overline{A'C''}\| = \|\overline{AC}\| = \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2} \quad (\text{A.47})$$

Si además se define

$$K_2 = \frac{\bar{i} \cdot \overline{A'C''}}{\|\bar{i}\| \|\overline{A'C''}\|} \quad (\text{A.48})$$

$$K_2 = \frac{x_c - x_a}{\sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2}} \quad (\text{A.49})$$

y el producto cruz entre los vectores está dado por

$$\bar{i} \times \overline{A'C''} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ 1 & 0 & 0 \\ x_c - x_a & y_c - y_a & 0 \end{vmatrix} \quad (\text{A.50})$$

$$i \times \overline{A'C''} = k[(y_c - y_a)] \quad (\text{A.51})$$

de manera que

$$SGN_2 = f_{\text{signo}}(y_c - y_a) \quad (\text{A.52})$$

Entonces el ángulo  $\phi$  queda determinado por

$$\phi = (SGN_2) \cos^{-1}(K_2) \quad (\text{A.53})$$

Conocidos  $\theta$  y  $\phi$ , el ángulo  $\beta$  está dado por

$$\beta = \theta + \phi \quad (\text{A.54})$$

a partir del cual se pueden hallar los términos  $\Delta x$  y  $\Delta y$  (ecs A.55 y A.56).

$$\Delta x = \cos \beta \cdot \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2} \quad (\text{A.55})$$

$$\Delta y = \text{sen} \beta \cdot \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2} \quad (\text{A.56})$$

De manera que las coordenadas del punto  $C'$  en un instante de tiempo  $t$  son

$$x_c + x_{ct} = x_a + x_{at} + \Delta x \quad (\text{A.57})$$

$$y_c + y_{ct} = y_a + y_{at} + \Delta y \quad (\text{A.58})$$

Por lo tanto, el movimiento relativo al estado inicial en un punto  $C$  cualquiera, para las dos direcciones  $X$  y  $Y$ , está definido por las expresiones A.59 y A.60.

$$x_{ct} = x_a + x_{at} + \Delta x - x_c \quad (\text{A.58})$$

$$y_{ct} = y_a + y_{at} + \Delta y - y_c \quad (\text{A.58})$$

APÉNDICE B

TABLAS DE ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

**Tabla B.1 - Frecuencias identificadas en el análisis espectral y amortiguamientos críticos estimados por el método de Taborda y Ordaz (2003) para el evento SI-011 a partir del análisis espectral por ventanas**

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)							
			0-20	10-30	20-40	30-50	40-60	50-70	60-80	
f (Hz)	T	1	0.854	0.832	0.806	0.781	0.732	0.781	0.781	
		2	2.954	2.832	2.783	2.563	2.588	2.637	2.637	
		3	5.249	5.151	4.800	4.541	4.761	4.663	4.639	
		4	7.886	7.251	7.100	7.178	7.056	7.129	7.080	
	L	1	1.099	0.977	1.025	1.025	1.025	1.001	1.025	
		2	3.857	3.760	3.711	3.687	3.613	3.589	3.711	
		3	8.691	8.472	8.081	7.837	7.495	7.750	7.900	
	R	1	1.538	1.343	1.270	1.318	1.343	1.318	1.294	
		2	4.272	4.126	4.126	3.955	3.760	3.857	3.882	
		3	6.300	5.830	6.100	6.300	6.400	6.300	6.300	
	ξ (%)	T	1	9.00	4.34	2.70	3.11	4.21	3.49	4.71
			2	3.08	5.60	4.65	1.48	2.25	2.11	3.25
3			2.37	3.80	4.00	2.60	2.20	3.03	3.31	
4			2.09	7.00	5.20	1.17	2.62	2.49	3.07	
L		1	1.08	6.15	4.90	3.21	3.40	3.39	1.86	
		2	3.56	4.20	2.71	5.73	4.25	4.05	4.15	
		3	1.74	2.09	5.27	2.34	5.30	4.37	6.48	

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)							
			70-90	80-100	90-110	100-120	110-130	120-140	130-150	
f (Hz)	T	1	0.781	0.781	0.781	0.806	0.806	0.781	0.781	
		2	2.637	2.710	2.612	2.783	2.710	2.734	2.637	
		3	4.663	4.785	4.834	4.858	4.907	4.663	4.663	
		4	6.982	7.031	7.031	7.178	7.129	7.300	6.982	
	L	1	0.977	1.025	1.001	1.001	1.050	0.977	0.977	
		2	3.687	3.662	3.760	3.735	3.711	3.687	3.687	
		3	8.203	7.764	7.617	8.154	8.057	8.081	8.203	
	R	1	1.318	1.343	1.343	1.343	1.318	1.367	1.318	
		2	3.882	3.955	4.028	4.175	3.833	3.931	4.199	
		3	6.000	6.400	6.200	6.270	6.290	6.290	6.540	
	ξ (%)	T	1	3.02	1.46	2.42	1.64	1.63	0.83	3.02
			2	2.50	2.97	0.65	4.23	2.81	0.68	2.50
3			3.30	3.40	3.30	2.05	3.54	2.17	3.30	
4			3.20	3.20	1.54	3.38	1.56	2.99	3.20	
L		1	3.07	2.98	4.50	4.10	2.90	3.45	3.07	
		2	2.36	2.78	4.43	1.98	2.75	4.27	2.36	
		3	5.01	3.72	7.62	3.47	4.61	5.70	5.01	

**Tabla B.2 - Frecuencias identificadas en el análisis espectral y amortiguamientos críticos estimados por el método de Taborda y Ordaz (2003) para el evento SI-021 a partir del análisis espectral por ventanas**

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)					
			0-20	10-30	20-40	30-50	40-60	
f (Hz)	T	1	0.830	0.830	0.806	0.806	0.806	
		2	2.808	2.637	2.588	2.588	2.612	
		3	5.225	4.736	4.492	4.663	4.834	
		4	7.300	7.129	7.153	7.080	7.178	
	L	1	1.050	1.025	1.074	1.025	1.025	
		2	4.028	3.638	3.638	3.760	3.687	
		3	8.423	7.617	7.617	7.544	7.642	
	R	1	1.367	1.392	1.294	1.343	1.318	
		2	4.102	4.102	4.077	3.833	4.028	
		3	6.298	5.835	5.835	6.152	6.152	
	ξ (%)	T	1	19.80	5.50	2.74	2.34	2.05
			2	3.47	2.40	2.63	2.81	1.85
3			4.51	1.04	1.57	2.60	2.20	
4			9.80	5.10	4.96	6.60	2.62	
L		1	6.74	1.79	3.88	2.10	0.70	
		2	4.42	5.24	4.70	4.46	2.46	
		3	3.51	2.52	2.73	4.76	3.56	

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)					
			50-70	60-80	70-90	80-100	90-110	
f (Hz)	T	1	0.806	0.806	0.806	0.854	0.781	
		2	2.661	2.661	2.783	2.783	2.734	
		3	4.834	4.688	4.712	4.517	4.858	
		4	6.860	6.860	7.056	6.738	7.300	
	L	1	1.025	1.050	1.050	1.050	1.025	
		2	3.760	3.760	3.784	3.857	3.687	
		3	7.813	7.422	7.983	7.837	8.032	
	R	1	1.343	1.294	1.343	1.416	1.416	
		2	4.053	4.077	4.199	4.102	4.077	
		3	5.957	5.908	5.883	6.103	6.128	
	ξ (%)	T	1	1.94	1.84	1.22	1.87	2.11
			2	2.17	1.88	1.26	2.40	1.39
3			2.66	1.73	1.15	1.29	2.33	
4			2.10	1.24	0.81	4.61	4.17	
L		1	0.61	0.67	1.00	2.73	2.32	
		2	2.79	3.35	2.66	3.86	3.07	
		3	6.35	6.70	4.63	3.12	10.50	

**Tabla B.3 - Frecuencias y amortiguamientos identificados con el modelo 3D-SIST para el evento SI-011 (Correa, 2003)**

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)					
			0-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
f (Hz)	T	1	0.878	0.819	0.792	0.787	0.785	0.788
		2	2.961	2.773	2.683	2.611	2.607	2.643
		3	5.013	4.937	4.865	4.752	4.818	4.751
		4	7.475	7.462	7.248	7.240	7.174	7.131
	L	1	1.113	1.023	0.988	0.986	0.989	0.994
		2	4.017	3.806	3.738	3.688	3.533	3.653
		3	8.249	8.589	7.704	7.898	7.619	7.720
		4	13.818	12.387	13.354	12.550	12.252	12.703
	R	1	1.525	1.302	1.311	1.320	1.316	1.284
		2	4.449	4.058	4.085	4.036	4.065	3.980
		3	7.053	6.893	7.053	6.920	6.820	6.290
		4	9.953	9.390	9.374	9.640	9.567	9.561
ξ (%)	T	1	0.12	1.32	2.53	1.85	1.81	1.69
		2	0.19	2.19	1.80	2.47	1.62	3.00
		3	0.00	3.42	2.56	2.83	3.19	2.29
		4	0.10	6.62	6.00	6.58	3.73	5.76
	L	1	0.58	0.84	2.36	2.91	2.31	1.63
		2	0.50	1.44	3.41	3.71	1.49	3.05
		3	0.00	4.79	3.18	7.32	6.00	6.42
		4	8.61	3.17	9.26	4.07	5.10	2.39
	R	1	1.50	1.00	0.96	2.79	1.17	2.00
		2	1.50	4.79	3.81	2.97	3.24	1.02
		3	0.00	1.00	1.94	6.00	6.41	6.00
		4	0.11	3.68	2.34	5.06	3.28	4.69
Error (%)	Azotea en T		47.46	31.66	23.28	12.53	5.62	10.69
	Azotea en L		54.58	33.62	16.19	12.62	7.54	23.68
	Azotea en R		97.49	56.79	43.70	34.76	17.08	26.21
	Total		61.35	37.97	23.33	14.07	7.02	18.50

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)						
			70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
f (Hz)	T	1	0.788	0.793	0.797	0.799	0.798	0.801	0.806
		2	2.646	2.649	2.605	2.680	2.640	2.669	2.685
		3	4.733	4.850	4.760	4.789	4.781	4.786	4.789
		4	7.061	7.154	7.395	7.157	7.124	7.159	7.288
	L	1	1.009	1.003	1.013	1.027	1.012	1.021	1.029
		2	3.665	3.676	3.714	3.775	3.738	3.751	3.732
		3	7.909	8.002	7.922	8.335	8.318	8.230	8.117
		4	11.996	12.759	12.955	12.720	11.737	11.739	12.625
	R	1	1.316	1.316	1.342	1.339	1.326	1.348	1.331
		2	4.040	4.079	4.079	4.138	4.117	4.118	4.177
		3	6.279	6.260	6.535	6.569	6.607	6.344	6.673
		4	9.285	9.602	10.380	9.516	9.694	9.589	9.472
ξ (%)	T	1	1.50	0.80	1.87	1.23	2.14	1.75	1.39
		2	1.00	1.32	0.73	1.00	3.83	2.30	2.29
		3	2.96	3.44	2.17	2.25	0.88	2.13	1.70
		4	2.43	3.73	4.16	2.39	3.00	3.96	2.69
	L	1	2.18	0.87	1.58	1.00	0.66	1.21	1.35
		2	2.30	2.38	2.00	2.49	3.21	2.55	4.44
		3	5.38	4.94	5.11	4.90	7.84	5.01	7.11
		4	5.01	7.85	5.49	1.37	1.48	2.16	5.20
	R	1	2.31	2.14	1.27	1.17	2.48	1.00	1.00
		2	1.26	2.06	1.25	2.02	1.12	2.00	1.26
		3	4.84	1.56	8.00	7.00	7.76	6.23	3.72
		4	2.79	3.83	4.49	1.76	4.71	3.34	2.99
Error (%)	Azotea en T		4.73	7.22	7.14	10.39	6.81	10.77	7.90
	Azotea en L		9.03	12.99	23.69	34.08	24.40	25.02	18.50
	Azotea en R		16.26	20.54	26.49	38.07	18.92	26.32	32.68
	Total		6.69	10.02	12.19	18.86	14.51	17.26	11.96

**Tabla B.4 - Factores de participación identificados con el modelo 3D-SIST para el evento SI-011 (Correa, 2003)**

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)					
			0-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70
FP (%)	T	1	76.48	68.87	81.04	94.15	98.72	95.35
		2	0.16	7.41	5.34	2.11	0.61	1.42
		3	0.03	8.29	5.57	1.15	0.05	0.66
		4	0.01	4.33	0.73	0.09	0.05	0.04
	L	1	65.49	36.44	82.00	94.23	95.97	82.58
		2	0.09	4.02	2.60	1.61	0.40	1.69
		3	1.17	1.78	0.28	0.11	0.02	0.06
		4	2.91	0.15	0.12	0.01	0.01	0.01
	R	1	0.21	1.91	9.74	11.64	9.34	13.00
		2	0.03	19.31	28.21	7.34	1.75	3.04
		3	0.05	2.11	3.86	0.18	0.16	0.20
		4	0.14	1.89	4.30	1.32	0.19	0.81

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)						
			70-80	80-90	90-100	100-110	110-120	120-130	130-140
FP (%)	T	1	98.81	97.55	97.45	95.71	97.40	96.61	97.39
		2	0.52	1.24	1.11	1.24	0.93	1.26	1.37
		3	0.25	0.37	0.50	1.01	0.21	0.28	0.38
		4	0.05	0.05	0.12	0.54	0.04	0.03	0.12
	L	1	93.05	93.52	79.65	63.63	77.69	79.81	88.29
		2	4.22	3.46	11.73	14.97	1.40	1.86	5.67
		3	0.07	0.07	0.17	0.98	0.00	0.05	0.86
		4	0.03	0.02	0.08	0.43	0.01	0.00	0.19
	R	1	8.75	13.15	9.97	19.82	7.68	7.67	9.86
		2	3.26	12.29	10.96	16.12	4.20	3.97	7.97
		3	0.88	0.21	0.38	0.82	0.04	0.04	0.15
		4	0.54	0.52	1.67	1.57	0.25	0.42	0.75

**Tabla B.5 - Frecuencias y amortiguamientos identificados con el modelo 3D-SIST para el evento SI-021 (Correa, 2003)**

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)				
			0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
f (Hz)	T	1	0.835	0.802	0.795	0.811	0.804
		2	2.749	2.754	2.651	2.584	2.623
		3	4.872	4.984	4.624	4.639	4.757
		4	7.390	7.315	6.953	7.426	7.220
	L	1	1.088	1.080	1.015	1.022	1.019
		2	3.783	3.843	3.633	3.668	3.627
		3	8.481	8.655	8.024	7.584	7.597
		4	12.453	11.149	11.219	11.771	11.477
	R	1	1.486	1.351	1.313	1.391	1.340
		2	4.268	4.170	4.046	4.019	4.084
		3	6.702	6.318	6.739	6.986	6.777
		4	9.756	10.075	9.257	9.125	9.033
ξ (%)	T	1	1.00	1.00	1.08	2.87	0.83
		2	1.00	1.00	0.54	4.61	1.70
		3	1.00	1.00	3.86	4.00	2.30
		4	1.00	2.41	5.01	2.68	2.58
	L	1	1.03	1.03	0.54	1.56	1.78
		2	1.00	1.00	5.09	1.46	5.63
		3	1.00	1.85	1.50	7.00	7.47
		4	1.00	1.00	2.36	3.08	5.41
	R	1	3.54	0.13	0.10	2.11	0.44
		2	1.00	0.13	1.84	3.08	1.29
		3	1.00	3.97	4.00	4.81	1.00
		4	1.00	7.22	4.05	1.89	1.00
Error (%)	Azotea en T		27.39	33.70	38.78	24.70	10.01
	Azotea en L		36.34	42.10	27.02	19.53	13.40
	Azotea en R		27.76	29.98	44.75	37.07	29.82
	Total		28.37	33.85	35.15	23.89	13.18

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)				
			50-60	60-70	70-80	80-90	80-100
f (Hz)	T	1	0.808	0.821	0.822	0.839	0.825
		2	2.654	2.700	2.668	2.638	2.701
		3	4.677	4.844	4.821	4.897	4.899
		4	7.225	7.224	7.165	7.467	7.415
	L	1	1.024	1.037	1.045	1.045	1.049
		2	3.695	3.701	3.757	3.821	3.879
		3	7.843	7.627	7.946	8.382	8.448
		4	11.791	12.068	12.201	12.339	12.430
	R	1	1.325	1.368	1.363	1.395	1.367
		2	4.052	3.977	4.160	4.164	4.174
		3	6.651	6.909	6.397	6.316	6.311
		4	9.086	9.138	9.224	9.651	9.703
ξ (%)	T	1	1.75	1.75	1.69	0.39	0.53
		2	1.77	0.97	1.63	4.26	2.36
		3	1.00	1.00	1.03	0.98	0.97
		4	1.00	2.00	2.21	3.12	3.00
	L	1	1.03	1.04	1.50	1.36	1.72
		2	2.73	1.58	1.90	2.50	1.07
		3	5.81	4.15	5.58	3.00	1.57
		4	7.00	5.41	5.09	3.00	3.00
	R	1	1.91	2.93	3.00	6.14	1.00
		2	1.13	0.62	1.43	3.08	2.77
		3	8.59	5.23	2.62	2.22	2.00
		4	1.00	1.89	3.47	2.37	2.78
Error (%)	Azotea en T		6.13	27.67	34.62	42.49	46.43
	Azotea en L		17.66	9.23	21.74	23.47	22.31
	Azotea en R		20.33	35.85	50.92	47.80	42.76
	Total		12.53	16.63	31.78	34.00	35.60

**Tabla B.6 - Factores de participación identificados con el modelo 3D-SIST para el evento SI-021 (Correa, 2003)**

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)				
			0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
FP (%)	T	1	92.29	64.20	45.58	81.94	95.91
		2	0.11	1.54	14.14	10.42	2.08
		3	0.01	15.76	6.35	0.51	0.10
		4	0.02	0.46	10.10	0.02	0.02
	L	1	82.53	20.90	22.41	89.08	97.49
		2	0.44	43.96	56.34	3.31	0.25
		3	0.08	3.16	0.56	0.07	0.01
		4	0.05	0.13	0.09	0.01	0.00
	R	1	0.04	0.01	3.40	23.64	27.50
		2	0.14	8.25	37.45	30.30	1.66
		3	0.03	1.75	1.48	1.08	0.07
		4	0.01	8.62	1.16	1.00	0.04

Parámetro	Dirección	Modo	Ventana (s)				
			50-60	60-70	70-80	80-90	80-100
FP (%)	T	1	98.17	84.93	71.42	63.72	63.80
		2	0.34	2.53	2.53	6.25	6.70
		3	0.05	1.02	4.24	4.50	3.39
		4	0.00	1.07	3.06	0.54	0.70
	L	1	89.02	97.15	83.91	86.86	90.34
		2	0.16	1.06	6.53	3.68	2.49
		3	0.01	0.08	2.33	0.00	0.01
		4	0.01	0.16	0.13	0.00	0.01
	R	1	21.51	56.75	35.15	37.79	45.24
		2	0.56	2.96	10.27	20.80	9.48
		3	0.34	0.82	0.61	0.23	0.25
		4	0.13	1.50	11.08	0.08	0.04

**Tabla B.7 - Frecuencias de estructura y cabeceo identificadas con los cocientes  $FT_e$  y  $FT_c$  para el evento SI-011**

Parámetro		Ventanas (s)						
		0-20	10-30	20-40	30-50	40-60	50-70	60-80
$f_1$ (Hz)	T	0.903	0.952	0.928	0.879	0.903	0.879	0.879
	L	1.416	1.245	1.245	1.172	1.147	1.172	1.147
$f_c$ (Hz)	T	0.781-1.172	1.274-1.709	1.025-1.782	1.196-2.173	1.074-1.685	0.854-1.514	1.05-2.393
		5.029-5.249	3.271-3.979	6.177-6.812	6.201-6.348	2.075-3.857	2.222-4.077	3.491-4.102
		7.764-7.935	4.494-6.812	-	-	4.98-6.641	5.005-6.567	4.956-5.64
	L	0.854-1.66	0.502-1.563	0.854-1.221	0.781-1.27	0.781-1.367	0.879-1.27	0.854-1.221
		4.056-4.956	1.695-3.125	1.27-2.979	1.611-2.954	1.44-3.003	1.782-3.003	1.27-3.271
		8.057-8.105	7.08-7.178	6.689-7.275	6.079-7.593	6.201-7.031	6.177-7.69	6.201-6.445

Parámetro		Ventanas (s)						
		70-90	80-100	90-110	100-120	110-130	120-140	130-150
$f_1$ (Hz)	T	0.854	0.854	0.854	0.903	0.952	0.879	0.879
	L	1.147	1.123	1.196	1.147	1.123	1.147	1.147
$f_c$ (Hz)	T	2.124-2.49	1.074-1.44	3.003-3.906	1.025-1.587	1.001-2.051	0.928-1.538	1.294-1.587
		3.32-4.224	1.685-1.807	4.517-4.907	2.954-3.857	2.979-3.809	2.979-5.029	3.247-4.297
		-	6.152-6.665	5.615-6.104	5.786-6.226	5.908-6.201	6.201-6.665	5.542-6.665
	L	0.732-1.294	0.708-0.903	0.732-0.952	0.806-1.367	0.854-1.343	0.806-3.369	0.854-3.54
		1.709-1.293	1.27-2.734	1.363-3.32	1.416-2.783	1.611-2.979	6.616-7.495	6.323-7.52
		6.763-7.275	6.519-7.349	6.299-8.398	7.52-7.593	6.836-7.251	9.082-9.131	9.204-9.521

Parámetro		Ventanas (s)						
		140-160	150-170	160-180	170-190	180-200	190-210	200-220
$f_1$ (Hz)	T	0.952	0.928	0.928	0.952	0.928	0.977	0.928
	L	1.196	1.147	1.147	1.172	1.172	1.172	1.245
$f_c$ (Hz)	T	3.589-3.882	1.245-3.027	1.27-2.179	1.05-1.611	1.196-1.611	0.928-3.931	1.343-1.587
		5.273-6.055	3.735-3.906	3.154-3.833	2.124-3.589	1.88-2.905	4.688-5.42	3.369-3.418
		8.154-8.276	5.811-6.714	6.372-5.567	4.517-6.714	3.125-4.346	6.25-7.007	5.347-6.958
	L	0.757-1.538	1.978-2.759	1.904-3.003	1.636-3.271	1.318-1.392	0.854-1.367	0.854-1.294
		1.66-2.612	5.713-5.835	3.955-4.199	3.955-4.346	2.1-3.32	1.636-3.394	1.636-3.052
		6.934-7.3	6.689-7.3	7.056-7.642	5.64-6.03	6.445-7.275	7.031-7.3	6.738-7.568

**Tabla B.8 - Frecuencias de estructura y cabeceo identificadas con los cocientes  $FT_e$  y  $FT_c$  para el evento SI-021**

Parámetro		Ventanas (s)				
		0-20	10-30	20-40	30-50	40-60
$f_1$ (Hz)	T	1.123	0.903	0.903	0.854	0.928
	L	1.44	1.147	1.123	1.196	1.147
$f_c$ (Hz)	T	1.147-1.953	1.123-1.807	1.05-2.271	3.076-3.613	1.05-1.514
		4.224-5.273	3.809-5.2	3.54-5.225	3.979-5.078	2.93-5.176
		6.787-7.275	5.957-6.738	6.201-6.738	6.494-6.665	5.597-6.641
	L	0.903-1.416	1.392-3.052	1.44-1.831	1.245-1.733	2.222-2.539
		1.66-2.148	6.787-6.958	2.075-2.93	2.319-3.223	6.47-7.837
		2.63-3.32	8.157-8.887	6.787-6.958	4.761-7.813	-

Parámetro		Ventanas (s)				
		50-70	60-80	70-90	80-100	90-110
$f_1$ (Hz)	T	1.001	1.05	1.001	0.977	1.099
	L	1.123	1.123	1.147	1.147	1.147
$f_c$ (Hz)	T	1.367-2.295	1.343-2.393	1.074-2.271	1.001-1.514	1.318-1.953
		2.881-4.028	2.979-4.712	4.028-4.834	3.076-5.371	3.198-6.787
		4.639-5.2	5.713-6.47	6.03-6.396	-	-
	L	1.88-3.174	1.538-3.198	1.855-3.027	2.026-3.345	1.636-3.101
		7.129-7.495	6.812-7.593	5.444-5.615	5.493-5.981	6.982-8.057
		-	-	6.714-7.617	7.788-8.008	-

**Tabla B.9 - Frecuencias de estructura y cabeceo identificadas con los cocientes  $FT_e$  y  $FT_c$  para el evento SI-022**

Parámetro		Ventanas (s)				
		0-20	10-30	20-40	30-50	40-60
$f_1$ (Hz)	T	1.001	1.05	1.074	0.928	1.001
	L	1.221	1.196	1.196	1.172	1.172
$f_c$ (Hz)	T	0.635-1.489	1.538-1.782	3.467-5.591	1.074-2.271	1.123-1.563
		2.734-3.369	2.808-5.811	-	3.638-4.077	2.1-3.784
		4.761-5.225	9.033-9.375	-	-	4.614-5.347
	L	0.586-1.318	1.245-2.271	1.367-2.856	1.27-1.367	1.318-3.198
		2.271-2.319	2.832-2.954	7.031-7.153	2.148-2.979	7.617-7.813
		3.955-4.248	7.739-7.861	7.544-7.935	6.812-7.959	9.399-9.595

Parámetro		Ventanas (s)				
		50-70	60-80	70-90	80-100	90-110
$f_1$ (Hz)	T	0.977	0.952	0.903	0.879	0.928
	L	1.196	1.245	1.196	1.147	1.196
$f_c$ (Hz)	T	1.074-1.416	1.123-1.465	1.294-1.489	2.295-4.785	1.343-1.807
		2.344-3.027	3.711-6.494	3.076-5.591	7.642-7.715	3.613-4.272
		3.589-5.347	-	-	-	5.957-6.03
	L	2.1-3.345	1.367-2.808	1.367-3.223	1.465-3.174	1.855-3.394
		6.03-7.007	-	-	4.639-7.764	5.591-6.006
		-	-	-	-	7.593-7.788

**Tabla B.10 - Cociente entre las frecuencias fundamentales de la estructura y el sistema para el evento SI-011**

Parámetro		Ventanas (s)						
		0-20	10-30	20-40	30-50	40-60	50-70	60-80
$f_1/\bar{f}_1$ (Hz)	T	1.06	1.15	1.15	1.13	1.23	1.13	1.13
	L	1.29	1.27	1.21	1.14	1.12	1.17	1.12

Parámetro		Ventanas (s)						
		70-90	80-100	90-110	100-120	110-130	120-140	130-150
$f_1/\bar{f}_1$ (Hz)	T	1.13	1.09	1.09	1.16	1.18	1.09	1.13
	L	1.15	1.15	1.17	1.15	1.12	1.09	1.17

Parámetro		Ventanas (s)						
		140-160	150-170	160-180	170-190	180-200	190-210	200-220
$f_1/\bar{f}_1$ (Hz)	T	1.15	1.12	1.15	1.18	1.31	1.14	1.19
	L	1.19	1.12	1.04	1.14	1.12	1.12	1.19

**Tabla B.11 - Cociente entre las frecuencias fundamentales de la estructura y el sistema para el evento SI-021**

Parámetro		Ventanas (s)				
		0-20	10-30	20-40	30-50	40-60
$f_1/\bar{f}_1$ (Hz)	T	1.35	1.09	1.12	1.06	1.15
	L	1.37	1.12	1.05	1.17	1.12

Parámetro		Ventanas (s)				
		50-70	60-80	70-90	80-100	90-110
$f_1/\bar{f}_1$ (Hz)	T	1.24	1.30	1.24	1.14	1.41
	L	1.10	1.07	1.09	1.09	1.12

**Tabla B.12 - Cociente entre las frecuencias fundamentales de la estructura y el sistema para el evento SI-022**

Parámetro		Ventanas (s)				
		0-20	10-30	20-40	30-50	40-60
$f_1/\bar{f}_1$ (Hz)	T	1.21	1.23	1.29	1.15	1.21
	L	1.11	1.19	1.09	1.09	1.12

Parámetro		Ventanas (s)				
		50-70	60-80	70-90	80-100	90-110
$f_1/\bar{f}_1$ (Hz)	T	1.11	1.15	1.16	1.06	1.15
	L	1.17	1.19	1.11	1.09	1.11

**Tabla B.13 - Parámetros estimados con el método de Luco para el evento SI-011**

Parámetro		Ventanas (s)						
		0-20	10-30	20-40	30-50	40-60	50-70	60-80
T	$\bar{f}_1$ (Hz)	0.854	0.830	0.806	0.781	0.732	0.781	0.781
	$f_1$ (Hz)		1.065	0.879	0.854	0.818	0.860	0.871
	$f_c$ (Hz)		2.686	2.469	2.339	2.329	2.527	2.471
	$f_h$ (Hz)			3.459	3.413	2.331	2.766	2.521
	$f_1/\bar{f}_1$		1.28	1.09	1.09	1.12	1.10	1.12
	$H\Phi_{rx}/X_T^{az}$ (%)		14.12	15.75	16.50	14.63	14.14	14.78
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)			3.75	3.62	6.82	5.51	6.63
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )		5.95	5.02	4.51	4.47	5.26	5.03
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )			1.03	1.01	0.47	0.66	0.55
L	$\bar{f}_1$ (Hz)	1.099	0.977	1.025	1.025	1.025	1.001	1.025
	$f_1$ (Hz)	1.449	1.250	1.275	1.235	1.202	1.166	1.184
	$f_c$ (Hz)	1.776	1.937	2.074	2.076	2.278	2.279	2.274
	$f_h$ (Hz)		2.651	3.113	3.984	3.886	3.781	4.770
	$f_1/\bar{f}_1$	1.32	1.28	1.24	1.20	1.17	1.16	1.15
	$H\Phi_{ry}/X_T^{az}$ (%)		37.15	35.74	35.66	29.62	28.20	29.73
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	2.78	8.85	7.08	4.32	4.54	4.57	3.02
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	2.59	3.08	3.54	3.54	4.27	4.27	4.25
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )		0.66	0.91	1.50	1.42	1.35	2.14
R	$\bar{f}_{1t}$ (Hz)	1.538	1.343	1.270	1.318	1.343	1.318	1.294
	$f_{1t}$ (Hz)	1.543		1.464	1.403	1.556	1.436	1.573
	$f_r$ (Hz)			2.551	3.846	2.657	3.328	2.275
	$f_{1t}/\bar{f}_{1t}$	1.00		1.15	1.06	1.16	1.09	1.22
	$\Phi_{rz}^{so}/\Phi_{rz}^{az}$ (%)			17.15	8.14	17.69	10.87	22.40
	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )			0.64	1.46	0.70	1.09	0.51

Se omitieron aquellos valores que afectaban la estimación por incoherencias entre las amplitudes medidas en los espectros de amplitudes de Fourier. Este es un problema normal en las primeras ventanas, donde las amplitudes son muy bajas, lo cual afecta el proceso espectral de las señales.

Tabla B.13 - Parámetros estimados con el método de Luco para el evento SI-011 (continuación)

Parámetro		Ventanas (s)						
		70-90	80-100	90-110	100-120	110-130	120-140	130-150
T	$\bar{f}_1$ (Hz)	0.757	0.781	0.781	0.781	0.806	0.806	0.781
	$f_1$ (Hz)	0.827	0.852	0.838	0.850	0.866	0.870	0.837
	$f_c$ (Hz)	2.464	2.566	2.551	2.527	2.526	2.560	2.492
	$f_h$ (Hz)	2.892	3.033	4.033	3.190	4.507	3.841	4.524
	$f_1/\bar{f}_1$	1.09	1.09	1.07	1.09	1.07	1.08	1.07
	$H\Phi_{rx}/X_T^{az}$ (%)	13.95	13.70	13.87	14.13	15.04	14.64	14.54
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	4.73	4.58	2.59	4.14	2.21	3.04	2.06
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	5.00	5.43	5.36	5.26	5.26	5.40	5.12
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	0.72	0.79	1.40	0.88	1.75	1.27	1.77
L	$\bar{f}_1$ (Hz)	1.001	0.977	1.025	1.001	1.001	1.050	0.977
	$f_1$ (Hz)	1.147	1.132	1.190	1.209	1.174	1.209	1.156
	$f_c$ (Hz)	2.314	2.240	2.320	2.170	2.336	2.334	2.190
	$f_h$ (Hz)	4.443	3.827	4.109	3.134	3.350	5.056	3.303
	$f_1/\bar{f}_1$	1.15	1.16	1.16	1.21	1.17	1.15	1.18
	$H\Phi_{ry}/X_T^{az}$ (%)	27.36	27.79	28.56	31.11	26.84	29.58	29.08
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	3.31	4.25	4.06	6.66	5.82	2.81	5.70
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	4.40	4.12	4.42	3.87	4.49	4.48	3.94
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	1.86	1.38	1.59	0.93	1.06	2.41	1.03
R	$\bar{f}_{1t}$ (Hz)	1.318	1.343	1.343	1.343	1.318	1.367	1.318
	$f_{1t}$ (Hz)	1.420	1.470	1.464	1.467	1.636	1.572	1.515
	$f_r$ (Hz)	3.548	3.296	3.375	3.328	2.227	2.768	2.677
	$f_{1t}/\bar{f}_{1t}$	1.08	1.10	1.09	1.09	1.24	1.15	1.15
	$\Phi_{rz}^{so}/\Phi_{rz}^{az}$ (%)	9.56	11.49	10.96	11.27	24.27	16.89	16.80
	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	1.24	1.07	1.13	1.09	0.49	0.76	0.71

Tabla B.13 - Parámetros estimados con el método de Luco para el evento SI-011 (continuación)

Parámetro		Ventanas (s)						
		140-160	150-170	160-180	170-190	180-200	190-210	200-220
T	$\bar{f}_1$ (Hz)	0.830	0.830	0.806	0.806	0.708	0.854	0.781
	$f_1$ (Hz)	0.901	0.888	0.866	0.863	0.776	0.933	0.850
	$f_c$ (Hz)	2.633	2.651	2.583	2.601	2.272	2.617	2.493
	$f_h$ (Hz)	3.668	4.946	4.193	4.458	2.673	3.678	3.292
	$f_1/\bar{f}_1$	1.09	1.07	1.07	1.07	1.10	1.09	1.09
	$H\Phi_{rx}/X_T^{az}$ (%)	14.70	14.49	14.39	14.19	14.36	15.76	14.52
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	3.54	1.94	2.55	2.26	4.84	3.73	3.89
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	5.71	5.79	5.50	5.57	4.25	5.65	5.12
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	1.16	2.11	1.52	1.72	0.62	1.17	0.94
L	$\bar{f}_1$ (Hz)	1.001	1.025	1.099	1.025	1.050	1.050	1.050
	$f_1$ (Hz)	1.136	1.162	1.265	1.196	1.203	1.203	1.210
	$f_c$ (Hz)	2.280	2.364	2.453	2.341	2.360	2.385	2.396
	$f_h$ (Hz)	5.686	5.685	5.142	3.808	5.215	5.000	4.453
	$f_1/\bar{f}_1$	1.14	1.13	1.15	1.17	1.15	1.15	1.15
	$H\Phi_{ry}/X_T^{az}$ (%)	28.18	27.50	29.32	28.06	28.93	28.33	28.07
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	2.02	2.12	2.98	4.73	2.64	2.88	3.63
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	4.27	4.59	4.95	4.50	4.58	4.68	4.72
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	3.05	3.05	2.49	1.37	2.56	2.36	1.87
R	$\bar{f}_{1t}$ (Hz)	1.465	1.343	1.392	1.392	1.367	1.416	1.416
	$f_{1t}$ (Hz)	1.562	1.402	1.466	1.507	1.408	1.481	1.476
	$f_r$ (Hz)	4.217	4.652	4.415	3.629	5.731	4.846	5.036
	$f_{1t}/\bar{f}_{1t}$	1.07	1.04	1.05	1.08	1.03	1.05	1.04
	$\Phi_{rz}^{so}/\Phi_{rz}^{az}$ (%)	8.35	5.77	6.88	10.18	3.94	5.91	5.47
	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	1.76	2.14	1.93	1.30	3.24	2.32	2.51

Tabla B.14 - Parámetros estimados con el método de Luco para el evento SI-021

Parámetro		Ventanas (s)				
		0-20	10-30	20-40	30-50	40-60
T	$\bar{f}_1$ (Hz)	0.830	0.830	0.806	0.806	0.806
	$f_1$ (Hz)		0.968	0.880	0.914	0.869
	$f_c$ (Hz)		2.225	2.386	2.616	2.590
	$f_h$ (Hz)		2.349	3.670	2.256	3.887
	$f_1/\bar{f}_1$		1.17	1.09	1.13	1.08
	$H\Phi_{rx}/X_T^{az}$ (%)		20.57	16.86	14.03	14.31
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)		8.61	3.32	8.79	2.96
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )		4.08	4.69	5.64	5.53
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )		0.48	1.17	0.44	1.31
L	$\bar{f}_1$ (Hz)	1.050	1.025	1.074	1.025	1.025
	$f_1$ (Hz)	1.341	1.173	1.268	1.174	1.156
	$f_c$ (Hz)	2.192	2.345	2.385	2.354	2.363
	$f_h$ (Hz)	2.646	4.864	3.805	4.691	6.504
	$f_1/\bar{f}_1$	1.28	1.14	1.18	1.15	1.13
	$H\Phi_{ry}/X_T^{az}$ (%)	33.57	27.98	29.68	27.76	27.55
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	10.32	2.91	5.23	3.13	1.63
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	3.95	4.53	4.68	4.56	4.60
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	0.66	2.22	1.36	2.06	3.96
R	$\bar{f}_{1t}$ (Hz)	1.709	1.318	1.343	1.367	1.343
	$f_{1t}$ (Hz)		1.366	1.379	1.454	1.385
	$f_r$ (Hz)	1.696	5.031	5.932	4.010	5.475
	$f_{1t}/\bar{f}_{1t}$		1.04	1.03	1.06	1.03
	$\Phi_{rz}^{so}/\Phi_{rz}^{az}$ (%)		4.77	3.56	8.07	4.17
	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )		2.44	3.40	1.55	2.89

Se omitieron aquellos valores que afectaban la estimación por incoherencias entre las amplitudes medidas en los espectros de amplitudes de Fourier. Este es un problema normal en las primeras ventanas, donde las amplitudes son muy bajas, lo cual afecta el proceso espectral de las señales.

Tabla B.14 - Parámetros estimados con el método de Luco para el evento SI-021 (continuación)

Parámetro		Ventanas (s)				
		50-70	60-80	70-90	80-100	90-110
T	$\bar{f}_1$ (Hz)	0.806	0.806	0.806	0.854	0.781
	$f_1$ (Hz)	0.862	0.873	0.868	0.930	0.846
	$f_c$ (Hz)	2.605	2.586	2.541	2.544	2.504
	$f_h$ (Hz)	4.621	3.566	4.189	4.119	3.468
	$f_1/\bar{f}_1$	1.07	1.08	1.08	1.09	1.08
	$H\Phi_{rx}/X_T^{az}$ (%)	14.15	14.36	14.86	16.68	14.39
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	2.10	3.52	2.55	2.97	3.50
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	5.59	5.51	5.32	5.33	5.17
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	1.85	1.10	1.52	1.47	1.04
L	$\bar{f}_1$ (Hz)	1.025	1.050	1.050	1.050	1.025
	$f_1$ (Hz)	1.155	1.181	1.196	1.215	1.193
	$f_c$ (Hz)	2.380	2.392	2.358	2.380	2.334
	$f_h$ (Hz)	6.370	8.094	5.928	4.345	3.943
	$f_1/\bar{f}_1$	1.13	1.12	1.14	1.16	1.16
	$H\Phi_{ry}/X_T^{az}$ (%)	27.17	28.20	29.02	28.47	28.25
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	1.70	1.10	2.06	3.83	4.43
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	4.66	4.71	4.57	4.66	4.48
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	3.80	6.14	3.29	1.77	1.46
R	$\bar{f}_{1t}$ (Hz)	1.343	1.367	1.343	1.392	1.416
	$f_{1t}$ (Hz)	1.375	1.475	1.423	1.490	1.519
	$f_r$ (Hz)	6.218	3.645	4.061	3.896	3.913
	$f_{1t}/\bar{f}_{1t}$	1.02	1.08	1.06	1.07	1.07
	$\Phi_{rz}^{so}/\Phi_{rz}^{az}$ (%)	3.24	9.77	7.59	8.86	9.09
	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	3.73	1.28	1.59	1.47	1.48

Tabla B.15 - Parámetros estimados con el método de Luco para el evento SI-022

Parámetro		Ventanas (s)				
		0-20	10-30	20-40	30-50	40-60
T	$\bar{f}_1$ (Hz)	0.830	0.854	0.830	0.806	0.830
	$f_1$ (Hz)	0.989	1.063	0.906	0.867	0.893
	$f_c$ (Hz)	1.672	2.581	2.696	2.652	2.648
	$f_h$ (Hz)	3.744		3.248	3.842	4.238
	$f_1/\bar{f}_1$	1.19	1.24	1.09	1.08	1.08
	$H\Phi_{rx}/X_T^{az}$ (%)		16.13	13.95	13.58	14.46
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	3.39	16.84	4.50	3.03	2.64
	$K_c$ (N-m/rad x 10 <sup>12</sup> )		5.49	5.99	5.79	5.77
	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	1.20		0.91	1.27	1.54
L	$\bar{f}_1$ (Hz)	1.099	1.001	1.099	1.074	1.050
	$f_1$ (Hz)	1.366	1.172	1.408	1.284	1.200
	$f_c$ (Hz)	1.942	2.196	2.031	2.246	2.413
	$f_h$ (Hz)	6.011	3.989	3.491	4.027	4.946
	$f_1/\bar{f}_1$	1.24	1.17	1.28	1.20	1.14
	$H\Phi_{ry}/X_T^{az}$ (%)	46.87	30.44	42.86	33.52	27.72
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	2.20	4.14	6.52	4.68	2.96
	$K_c$ (N-m/rad x 10 <sup>12</sup> )	3.11	3.97	3.40	4.15	4.79
	$K_h$ (N/m x 10 <sup>10</sup> )	3.37	1.48	1.14	1.51	2.28
R	$\bar{f}_{tt}$ (Hz)	1.440	1.343	1.318	1.245	1.270
	$f_{tt}$ (Hz)	1.579	1.699	1.559	1.460	1.410
	$f_r$ (Hz)	3.514	2.192	2.471	2.385	2.920
	$f_{tt}/\bar{f}_{tt}$	1.10	1.27	1.18	1.17	1.11
	$\Phi_{rz}^{so}/\Phi_{rz}^{az}$ (%)	11.58	25.85	19.61	18.78	13.02
	$K_r$ (N-m/rad x 10 <sup>12</sup> )	1.24	0.48	0.61	0.57	0.85

Se omitieron aquellos valores que afectaban la estimación por incoherencias entre las amplitudes medidas en los espectros de amplitudes de Fourier. Este es un problema normal en las primeras ventanas, donde las amplitudes son muy bajas, lo cual afecta el proceso espectral de las señales.

Tabla B.15 - Parámetros estimados con el método de Luco para el evento SI-022 (continuación)

Parámetro		Ventanas (s)				
		50-70	60-80	70-90	80-100	90-110
T	$\bar{f}_1$ (Hz)	0.879	0.830	0.781	0.830	0.806
	$f_1$ (Hz)	0.970	0.890	0.834	0.887	0.878
	$f_c$ (Hz)	2.637	2.695	2.527	2.629	2.460
	$f_h$ (Hz)	3.355	4.376	4.785	5.229	3.592
	$f_1/\bar{f}_1$	1.10	1.07	1.07	1.07	1.09
	$H\Phi_{rx}/X_T^{az}$ (%)	16.34	13.96	14.07	14.67	15.79
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	4.73	2.48	1.84	1.74	3.47
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	5.73	5.98	5.26	5.69	4.98
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	0.97	1.65	1.97	2.35	1.11
L	$\bar{f}_1$ (Hz)	1.025	1.050	1.074	1.050	1.074
	$f_1$ (Hz)	1.185	1.215	1.241	1.187	1.217
	$f_c$ (Hz)	2.368	2.367	2.425	2.412	2.457
	$f_h$ (Hz)	4.061	4.429	4.601	6.206	6.211
	$f_1/\bar{f}_1$	1.16	1.16	1.16	1.13	1.13
	$H\Phi_{ry}/X_T^{az}$ (%)	27.47	28.81	28.74	27.75	27.99
	$X_T^{so}/X_T^{az}$ (%)	4.20	3.70	3.59	1.88	1.97
	$K_c$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	4.61	4.61	4.84	4.79	4.97
	$K_h$ (N/m x $10^{10}$ )	1.54	1.83	1.97	3.59	3.60
R	$\bar{f}_{tt}$ (Hz)	1.343	1.367	1.343	1.318	1.367
	$f_{tt}$ (Hz)	1.375	1.421	1.377	1.388	1.426
	$f_r$ (Hz)	6.252	5.020	6.086	4.211	4.804
	$f_{tt}/\bar{f}_{tt}$	1.02	1.04	1.03	1.05	1.04
	$\Phi_{rz}^{so}/\Phi_{rz}^{az}$ (%)	3.18	5.11	3.35	6.75	5.58
	$K_r$ (N-m/rad x $10^{12}$ )	3.91	2.52	3.71	1.78	2.31

**Tabla B.16 - Parámetros de la estructura identificados con los modelos 1D-EST, 2D-EST y 3D-EST para el evento SI-011**

Dirección	Parámetro	Modelo	Ventanas (s)						
			0-20	10-30	20-40	30-50	40-60	50-70	60-80
T	f <sub>1</sub>	1D <sub>T</sub> -EST	1.060	1.004	0.872	0.888	0.904	0.884	0.885
		2D-EST		1.010	0.908	0.889	0.882	0.895	0.882
		3D-EST		0.980	0.876	0.889	0.881	0.894	0.882
	FP (%)	1D <sub>T</sub> -EST	33.02	70.65	41.32	72.49	93.20	95.77	92.38
		2D-EST		71.03	42.30	73.43	83.64	96.50	88.15
		3D-EST		69.09	41.58	73.34	82.77	96.24	87.54
	Error (%)	1D <sub>T</sub> -EST	81.84	54.17	76.60	52.45	26.08	20.56	27.61
		2D-EST		51.10	75.88	51.22	23.94	14.35	22.78
		3D-EST		52.70	75.70	51.02	24.37	14.12	23.03
L	f <sub>1</sub>	1D <sub>L</sub> -EST	1.521	1.401	1.332	1.195	1.131	1.172	1.135
		2D-EST		1.390	1.329	1.207	1.209	1.173	1.179
		3D-EST		1.410	1.343	1.205	1.210	1.177	1.179
	FP (%)	1D <sub>L</sub> -EST	75.13	87.54	44.79	67.10	89.39	88.13	91.87
		2D-EST		86.98	45.09	68.19	68.06	86.47	66.49
		3D-EST		88.35	45.06	68.21	66.62	87.18	65.24
	Error (%)	1D <sub>L</sub> -EST	49.87	35.29	74.30	57.36	32.57	34.45	28.51
		2D-EST		40.12	74.10	56.23	32.92	23.55	32.79
		3D-EST		37.35	74.09	53.05	33.45	19.95	32.93
R	f <sub>1</sub>	3D-EST		1.480	1.455	1.394	1.381	1.365	1.355
	FP (%)	3D-EST		3.79	0.58	4.97	3.99	5.22	8.04
	Error (%)	3D-EST		92.09	98.81	91.04	42.64	30.81	43.55
Error Total		2D-EST		56.78	74.65	53.90	28.43	16.99	27.33
		3D-EST		82.47	80.27	59.28	29.80	17.01	28.69

Dirección	Parámetro	Modelo	Ventanas (s)						
			70-90	80-100	90-110	100-120	110-130	120-140	130-150
T	f <sub>1</sub>	1D <sub>T</sub> -EST	0.866	0.880	0.878	0.872	0.871	0.881	0.892
		2D-EST	0.870	0.884	0.873	0.868	0.896	0.899	0.895
		3D-EST	0.872	0.884	0.873	0.868	0.899	0.903	0.895
	FP (%)	1D <sub>T</sub> -EST	97.79	96.05	96.24	93.87	96.90	92.65	96.42
		2D-EST	98.20	96.51	96.64	94.00	96.22	92.46	96.47
		3D-EST	98.11	96.48	96.63	94.00	95.82	91.95	96.44
	Error (%)	1D <sub>T</sub> -EST	14.86	19.88	19.39	24.76	17.62	27.12	18.92
		2D-EST	12.79	17.20	18.30	24.08	14.83	24.29	18.52
		3D-EST	12.79	17.02	18.28	23.81	14.82	33.84	18.47
L	f <sub>1</sub>	1D <sub>L</sub> -EST	1.215	1.169	1.200	1.181	1.189	1.177	1.134
		2D-EST	1.190	1.167	1.179	1.175	1.245	1.255	1.241
		3D-EST	1.174	1.169	1.179	1.178	1.238	1.254	1.238
	FP (%)	1D <sub>L</sub> -EST	76.08	80.54	64.80	52.00	90.73	78.05	61.58
		2D-EST	78.06	81.92	66.34	53.11	73.30	76.28	66.24
		3D-EST	77.71	82.81	66.42	53.07	71.91	75.39	66.19
	Error (%)	1D <sub>L</sub> -EST	48.90	44.12	59.33	69.28	30.45	46.85	61.99
		2D-EST	42.82	41.27	58.02	68.40	27.52	37.02	54.08
		3D-EST	39.18	36.42	57.50	65.99	27.79	24.54	45.13
R	f <sub>1</sub>	3D-EST	1.346	1.348	1.371	1.372	1.379	1.386	1.385
	FP (%)	3D-EST	3.55	8.36	7.72	14.90	3.11	10.70	6.94
	Error (%)	3D-EST	46.71	53.57	57.07	69.21	45.38	53.96	49.90
Error Total		2D-EST	21.44	24.90	26.58	35.12	18.79	29.29	25.46
		3D-EST	22.71	26.18	29.56	38.89	21.61	30.66	25.68

**Tabla B.16 - Parámetros de la estructura identificados con los modelos 1D-EST, 2D-EST y 3D-EST para el evento SI-011 (continuación)**

Dirección	Parámetro	Modelo	Ventanas (s)						
			140-160	150-170	160-180	170-190	180-200	190-210	200-220
T	f <sub>1</sub>	1D <sub>T</sub> -EST	0.893	0.856	0.838	0.878	0.892	0.906	0.872
		2D-EST	0.898	0.850	0.833	0.887	0.887	0.910	0.903
		3D-EST	0.898	0.852	0.829	0.885	0.890	0.912	0.900
	FP (%)	1D <sub>T</sub> -EST	97.42	74.77	68.95	89.90	89.81	81.46	95.96
		2D-EST	97.22	75.84	69.55	89.29	92.38	82.02	93.55
		3D-EST	97.08	75.64	69.52	89.23	93.41	81.49	92.74
	Error (%)	1D <sub>T</sub> -EST	16.07	50.23	55.73	31.78	31.91	43.06	20.11
		2D-EST	15.10	49.13	54.69	32.02	24.04	41.60	18.33
		3D-EST	14.95	49.14	54.65	31.99	22.24	40.74	18.52
L	f <sub>1</sub>	1D <sub>L</sub> -EST	1.187	1.222	1.204	1.154	1.229	1.206	1.247
		2D-EST	1.198	1.232	1.194	1.182	1.141	1.218	1.266
		3D-EST	1.200	1.231	1.207	1.183	1.145	1.223	1.268
	FP (%)	1D <sub>L</sub> -EST	77.58	75.62	45.11	65.12	86.21	72.93	88.14
		2D-EST	77.53	76.24	46.17	58.53	70.15	73.42	83.21
		3D-EST	77.14	76.17	46.02	58.31	72.45	73.46	82.00
	Error (%)	1D <sub>L</sub> -EST	47.35	49.37	74.09	59.06	37.13	52.03	34.44
		2D-EST	38.78	48.40	73.28	58.54	45.58	51.45	31.60
		3D-EST	32.64	48.23	71.74	58.57	42.98	49.03	31.45
R	f <sub>1</sub>	3D-EST	1.387	1.391	1.390	1.388	1.399	1.405	1.409
	FP (%)	3D-EST	3.58	3.77	6.91	14.30	14.75	27.23	9.46
	Error (%)	3D-EST	40.62	85.30	92.26	83.14	70.68	72.75	63.56
Error Total		2D-EST	21.42	48.84	63.28	42.57	34.02	47.57	24.97
		3D-EST	21.35	53.83	67.74	50.87	36.23	49.52	29.05

**Tabla B.17 - Parámetros de la estructura identificados con los modelos 1D-EST, 2D-EST y 3D-EST para el evento SI-021**

Dirección	Parámetro	Modelo	Ventanas (s)				
			0-20	10-30	20-40	30-50	40-60
T	f <sub>1</sub>	1D <sub>T</sub> -EST	0.920	0.912	0.880	0.893	0.875
		2D-EST	0.903	0.883	0.880	0.889	0.898
		3D-EST	0.910	0.881	0.881	0.891	0.901
	FP (%)	1D <sub>T</sub> -EST	36.47	46.02	40.68	76.72	88.77
		2D-EST	40.32	51.81	41.08	66.53	94.12
		3D-EST	38.52	54.45	41.02	77.34	94.44
	Error (%)	1D <sub>T</sub> -EST	79.70	73.47	77.02	48.25	33.51
		2D-EST	77.75	73.14	76.76	46.54	20.74
		3D-EST	76.97	73.16	76.66	45.42	20.27
L	f <sub>1</sub>	1D <sub>L</sub> -EST	1.253	1.182	1.201	1.175	1.161
		2D-EST	1.227	1.199	1.204	1.230	1.139
		3D-EST	1.252	1.199	1.205	1.198	1.130
	FP (%)	1D <sub>L</sub> -EST	81.94	57.65	22.77	81.27	93.44
		2D-EST	81.10	70.98	24.22	80.09	95.57
		3D-EST	79.89	70.55	24.19	81.93	95.83
	Error (%)	1D <sub>L</sub> -EST	42.50	65.07	87.88	43.28	25.62
		2D-EST	45.23	63.60	86.96	39.70	20.95
		3D-EST	44.46	63.58	86.58	40.84	18.60
R	f <sub>1</sub>	3D-EST	1.379	1.377	1.362	1.372	1.361
	FP (%)	3D-EST	0.27	0.02	1.26	12.38	15.35
	Error (%)	3D-EST	98.79	96.37	97.40	87.48	29.91
Error Total		2D-EST	61.62	67.80	84.23	43.35	20.86
		3D-EST	69.88	75.34	87.42	51.60	20.06

**Tabla B.17 - Parámetros de la estructura identificados con los modelos 1D-EST, 2D-EST y 3D-EST para el evento SI-021 (continuación)**

Dirección	Parámetro	Modelo	Ventanas (s)				
			50-70	60-80	70-90	80-100	90-110
T	f <sub>1</sub>	1D <sub>T</sub> -EST	0.852	0.883	0.920	0.892	0.917
		2D-EST	0.892	0.891	0.894	0.911	0.901
		3D-EST	0.901	0.895	0.893	0.909	0.898
	FP (%)	1D <sub>T</sub> -EST	97.85	76.73	67.45	71.96	77.15
		2D-EST	95.72	81.55	50.30	68.68	76.30
		3D-EST	94.78	81.68	50.48	68.92	76.17
	Error (%)	1D <sub>T</sub> -EST	14.65	48.24	57.06	52.95	47.80
		2D-EST	11.39	38.22	59.55	46.03	46.33
		3D-EST	10.74	37.68	52.27	45.99	45.43
L	f <sub>1</sub>	1D <sub>L</sub> -EST	1.170	1.170	1.249	1.240	1.219
		2D-EST	1.254	1.220	1.213	1.258	1.241
		3D-EST	1.265	1.214	1.215	1.256	1.232
	FP (%)	1D <sub>L</sub> -EST	95.50	93.15	67.20	84.45	76.77
		2D-EST	83.14	93.95	65.58	83.79	53.28
		3D-EST	81.13	94.24	65.64	83.95	52.74
	Error (%)	1D <sub>L</sub> -EST	21.20	26.18	57.27	39.43	48.20
		2D-EST	13.72	22.77	56.43	38.00	47.27
		3D-EST	14.11	20.99	55.67	36.76	47.54
R	f <sub>1</sub>	3D-EST	1.381	1.389	1.373	1.410	1.430
	FP (%)	3D-EST	14.59	33.88	0.57	4.70	28.30
	Error (%)	3D-EST	18.91	50.40	96.68	91.31	66.76
Error Total		2D-EST	12.20	27.19	57.79	41.39	46.70
		3D-EST	12.52	28.04	63.52	49.69	48.89

**Tabla B.18 - Parámetros de la estructura identificados con los modelos 1D-EST, 2D-EST y 3D-EST para el evento SI-022**

Dirección	Parámetro	Modelo	Ventanas (s)				
			0-20	10-30	20-40	30-50	40-60
T	f <sub>1</sub>	1D <sub>T</sub> -EST	0.968	0.918	0.905	0.864	0.893
		2D-EST	0.901	0.900	0.900	0.859	0.899
		3D-EST	0.898	0.900	0.890	0.865	0.900
	FP (%)	1D <sub>T</sub> -EST	73.37	72.84	47.31	62.41	87.54
		2D-EST	35.49	73.71	33.89	62.76	89.21
		3D-EST	30.05	73.51	35.52	62.41	88.66
	Error (%)	1D <sub>T</sub> -EST	51.60	52.10	72.63	61.31	35.28
		2D-EST	64.26	51.26	73.38	60.44	28.91
		3D-EST	65.90	51.21	72.66	60.45	28.58
L	f <sub>1</sub>	1D <sub>L</sub> -EST	1.239	1.249	1.248	1.219	1.163
		2D-EST	1.216	1.194	1.162	1.222	1.172
		3D-EST	1.201	1.261	1.170	1.224	1.176
	FP (%)	1D <sub>L</sub> -EST	83.38	87.78	38.92	38.92	88.21
		2D-EST	78.35	90.68	37.12	38.62	85.78
		3D-EST	77.32	86.31	37.48	38.98	84.79
	Error (%)	1D <sub>L</sub> -EST	40.77	34.96	78.15	78.16	34.34
		2D-EST	42.33	30.50	78.00	78.32	32.82
		3D-EST	65.90	36.54	77.96	78.06	33.01
R	f <sub>1</sub>	3D-EST	1.420	1.451	1.446	1.466	1.438
	FP (%)	3D-EST	1.41	1.25	0.05	0.69	17.14
	Error (%)	3D-EST	98.60	98.97	98.39	95.60	63.53
Error Total		2D-EST	51.95	37.63	76.58	69.70	30.55
		3D-EST	42.21	46.31	82.17	75.16	34.65

**Tabla B.18 - Parámetros de la estructura identificados con los modelos 1D-EST, 2D-EST y 3D-EST para el evento SI-022 (continuación)**

Dirección	Parámetro	Modelo	Ventanas (s)				
			50-70	60-80	70-90	80-100	90-110
T	f <sub>1</sub>	1D <sub>T</sub> -EST	0.915	0.874	0.866	0.889	0.865
		2D-EST	0.937	0.892	0.867	0.906	0.905
		3D-EST	0.933	0.897	0.877	0.907	0.904
	FP (%)	1D <sub>T</sub> -EST	90.36	97.91	98.30	96.98	83.57
		2D-EST	67.01	97.86	64.71	82.75	90.00
		3D-EST	73.55	97.63	98.25	96.96	90.03
	Error (%)	1D <sub>T</sub> -EST	31.04	14.45	13.06	17.39	40.53
		2D-EST	49.64	13.04	12.95	14.85	30.65
		3D-EST	41.34	12.74	12.60	14.65	30.65
L	f <sub>1</sub>	1D <sub>L</sub> -EST	1.197	1.156	1.152	1.182	1.276
		2D-EST	1.206	1.181	1.158	1.241	1.273
		3D-EST	1.206	1.182	1.178	1.243	1.271
	FP (%)	1D <sub>L</sub> -EST	90.20	86.99	62.63	84.30	97.72
		2D-EST	29.17	87.66	98.29	97.15	97.72
		3D-EST	36.65	87.22	62.64	82.34	97.72
	Error (%)	1D <sub>L</sub> -EST	31.30	36.07	61.13	39.64	15.10
		2D-EST	52.38	29.32	53.55	32.20	14.36
		3D-EST	50.25	25.96	49.19	31.10	14.40
R	f <sub>1</sub>	3D-EST	1.411	1.408	1.423	1.425	1.428
	FP (%)	3D-EST	17.10	7.08	21.70	5.16	11.73
	Error (%)	3D-EST	61.50	40.52	35.97	55.33	55.88
Error Total		2D-EST	50.98	17.57	17.53	19.98	20.06
		3D-EST	47.14	18.76	18.95	23.87	22.69

**Tabla B.19 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo 1D<sub>T</sub>-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**

	Ventanas (s)													
	0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.456	9.38	3.471	1.58	0.646	2.33	0.599	3.65	0.864	73.48	0.603	1.42	0.598	6.40
2	1.987	0.97	7.415	15.84	2.280	1.08	0.813	20.11	1.097	4.99	0.770	34.40	0.778	31.26
3	2.200	0.91			3.583	3.16	0.956	3.06	1.239	1.58	0.844	29.04	0.876	30.23
4	2.451	1.03			4.368	2.71	1.290	1.47	2.481	2.93	0.998	7.62	1.060	1.53
5	3.371	1.70			7.404	27.04	1.785	2.53	3.777	1.02	2.118	0.52	1.474	1.00
6	3.649	1.90					2.219	9.15	7.595	0.70	2.401	0.75	1.977	1.44
7	4.365	1.95					3.862	2.93			7.028	0.46	3.062	1.05
8							4.439	0.02					4.528	0.01
9														
10														
FP <sub>Total</sub>	17.84		17.42		36.31		44.87		84.69		74.21		73.45	
Error	90.66		90.82		78.88		74.27		39.15		30.98		51.32	

	Ventanas (s)													
	70-80		80-90		90-100		100-110		110-120		120-130		130-140	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.791	82.53	0.636	6.49	0.797	76.49	0.775	42.07	0.802	83.83	0.806	68.93	0.798	75.62
2	0.902	1.86	0.704	8.04	0.968	1.69	0.860	2.37	1.015	1.35	1.165	1.84	0.944	1.99
3	1.198	1.19	0.835	59.61	2.030	0.80	1.185	1.04	1.184	0.80	2.079	1.22	1.051	1.14
4	1.966	0.70	0.967	2.43	2.368	0.96	2.313	1.84	2.380	0.77	3.268	1.25	1.202	0.89
5			1.901	1.11	4.189	0.69			3.895	0.73	3.951	0.75	3.063	1.53
6			2.199	0.91	4.746	1.02			6.113	0.39	4.508	0.91	4.798	0.87
7			3.150	0.65	4.881	0.63								
8														
9														
10														
FP <sub>Total</sub>	86.28		79.26		82.28		47.32		87.87		74.90		82.04	
Error	37.05		45.39		42.20		70.58		34.83		50.10		42.38	

	Ventanas (s)													
	150-160		160-170		170-180		180-190		190-200		200-210		210-220	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.814	85.40	0.562	1.53	0.804	13.88	0.797	28.27	0.816	52.65	0.611	1.24	0.800	62.24
2	0.911	1.26	0.809	25.46	2.119	0.57	0.891	1.59	0.943	3.67	0.714	2.58	1.002	2.98
3	1.114	1.79	4.154	5.57	3.072	2.93	0.960	1.31	2.047	1.02	0.875	13.92	1.354	0.89
4	1.549	0.69	4.644	23.91	3.330	2.65	1.769	1.75	2.345	0.61	0.951	3.63	3.154	1.71
5	3.117	0.78	5.119	4.19	4.038	2.11	2.368	0.81	3.386	2.64	1.160	1.09	3.722	3.62
6			6.741	4.89	4.857	36.24	3.194	4.78	4.839	3.30	1.383	1.09	4.407	0.78
7					5.389	2.79	3.901	8.41	6.616	2.27	1.698	1.61		
8					5.976	0.03	4.370	0.09			2.204	0.01		
9											3.555	0.02		
10											4.206	0.02		
FP <sub>Total</sub>	89.92		65.55		63.90		56.00		66.16		31.08		72.23	
Error	31.74		58.70		60.08		66.34		58.17		83.02		52.70	

**Tabla B.20 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo 2D-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**

	Ventanas (s)													
	0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.749	8.79	0.686	0.40	0.659	2.30	0.808	14.45	0.847	49.24	0.787	53.84	0.836	27.65
2	2.412	2.62	1.861	0.56	1.002	0.06	0.867	5.98	0.862	15.53	0.905	12.60	0.985	0.29
3	5.587	1.78	7.901	12.01	1.792	0.06	1.075	0.03	0.930	16.55	0.987	11.82	1.084	0.45
4	8.334	1.92			3.541	2.29	1.790	2.77	1.033	0.03	1.053	0.75	1.218	0.26
5					4.364	2.30	2.149	6.26	1.270	2.99	1.208	1.10	0.748	26.40
6					5.027	2.34	6.048	6.50	2.557	2.37	7.556	0.08	1.911	1.83
7					5.790	0.06	6.498	2.52	3.786	1.27	8.531	1.12	3.119	1.10
8					6.429	0.07	7.589	0.00	7.074	0.01			4.733	0.02
9					7.418	0.26	7.017	0.03					7.264	0.00
10					7.740	0.01	7.754	0.02						
FP <sub>Total</sub>	15.11		12.96		42.85		44.13		88.53		81.31		60.31	
Error	92.18		93.25		74.68		75.53		51.43		36.84		45.64	

	Ventanas (s)													
	70-80		80-90		90-100		100-110		110-120		120-130		130-140	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.791	82.48	0.823	56.12	0.797	76.41	0.774	38.98	0.943	1.07	0.799	57.93	0.798	75.55
2	0.977	0.02	0.894	0.29	0.993	0.07	0.861	1.62	0.786	70.32	0.979	0.00	1.017	0.09
3	1.143	1.44	1.038	0.00	1.125	0.18	1.018	0.04	1.071	0.00	1.127	0.01	1.153	0.06
4	1.269	0.00	1.154	0.34	1.777	0.21	1.148	1.15	1.232	0.76	1.432	0.05	1.293	0.19
5	2.027	0.29	1.306	0.00	2.228	0.56	1.234	0.15	2.081	0.30	1.892	1.37	2.331	0.00
6	6.331	1.76	2.005	0.19	5.337	0.15	2.051	0.11	3.436	0.15	4.733	1.38	3.084	1.56
7	7.036	1.22	3.746	2.31	6.706	0.51	3.557	1.05	7.698	0.11	7.323	0.21	6.086	0.00
8	7.637	0.00	4.553	0.01	7.640	0.00	4.879	0.02			8.035	0.00	6.862	0.01
9	8.559	0.01	7.169	0.01	7.725	0.01	7.058	0.12					7.294	0.02
10			7.714	0.00			7.873	0.03						
FP <sub>Total</sub>	88.32		61.72		79.10		60.32		72.72		60.97		80.27	
Error	34.06		57.68		46.38		61.74		45.76		52.51		44.14	

	Ventanas (s)													
	150-160		160-170		170-180		180-190		190-200		200-210		210-220	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.818	86.33	0.810	0.08	0.806	13.64	0.751	4.84	1.015	4.24	0.740	4.45	0.993	0.05
2	0.945	0.02	0.815	25.91	0.761	0.16	0.808	17.41	0.830	47.96	0.748	0.06	0.794	53.20
3	1.085	0.16	1.025	0.01	0.975	0.10	0.964	0.89	1.159	0.51	0.830	8.67	0.853	1.71
4	1.147	1.01	3.631	0.11	2.170	0.23	1.050	0.15	1.383	1.88	0.899	6.31	1.104	0.95
5	1.749	0.25	4.183	5.65	3.084	3.19	3.182	5.03	2.558	3.57	0.974	0.49	3.745	4.56
6	2.264	0.03	5.953	1.00	3.600	0.00	3.895	8.35	3.965	1.18	1.710	0.17	6.136	0.08
7	2.490	0.27	6.304	2.11	4.857	36.74	4.378	6.57	4.840	3.33	5.234	2.57	7.718	0.49
8	3.825	0.02	7.496	0.02	5.504	0.05	4.946	0.12	7.766	0.01	6.834	0.02		
9	7.721	0.00	8.031	0.00	6.184	0.00	5.553	0.03			7.580	0.00		
10					8.218	0.00	7.775	0.02						
FP <sub>Total</sub>	90.02		36.51		58.99		60.48		63.87		25.17		61.04	
Error	30.76		76.16		63.84		57.36		59.88		82.84		55.20	

**Tabla B.21 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo 2D-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**

	Ventanas (s)													
	0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		25-30		30-35	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.757	12.26	0.742	5.02	0.710	5.80	0.764	0.29	6.904	2.50	0.753	2.89	0.845	21.30
2	2.421	5.18	2.323	1.07	1.882	1.86	5.211	13.46	7.571	1.84	1.004	0.12	1.089	1.49
3	5.546	6.37	3.918	4.21	2.381	0.11	8.001	0.85	8.058	5.30	4.008	0.08	2.159	12.40
4	6.043	3.24	8.518	0.71	7.026	0.49	10.51	7.85	9.227	3.59	5.011	1.89	5.998	8.46
5	10.18	0.67	10.00	0.00	8.575	1.75	11.00	0.00	13.57	3.92	5.795	0.00	7.026	4.76
6					9.680	2.63			16.82	36.76	7.516	25.32	7.607	0.61
7					9.985	3.10			10.01	0.01	7.816	5.72	7.915	4.39
8					8.042	0.02					10.52	0.00	8.619	0.03
9											14.73	0.07	8.914	0.00
10														
FP <sub>Total</sub>	27.71		11.01		18.15		22.45		53.92		42.82		56.89	
Error	82.47		94.36		90.50		86.20		67.88		75.07		65.61	

	Ventanas (s)													
	35-40		40-45		45-50		50-55		55-60		60-65		65-70	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.732	26.03	0.850	45.21	0.856	83.55	0.651	0.36	0.798	90.10	0.989	5.87	0.794	84.77
2	0.897	1.32	0.843	25.18	0.922	0.45	0.758	50.90	1.013	2.24	0.902	26.83	0.862	0.77
3	1.077	0.40	1.062	3.72	1.170	7.12	0.870	12.41	1.199	0.81	0.665	15.97	1.128	0.31
4	2.177	14.82	2.349	5.87	1.914	0.36	1.051	14.73	2.345	0.96	1.934	7.43	1.890	0.08
5	3.132	4.10	7.066	1.57			2.531	0.18	2.595	0.05	3.556	3.56	2.384	0.92
6	5.130	6.14	9.431	0.50			6.284	0.11	8.557	0.56	4.662	2.00	3.118	1.03
7	8.843	7.32	0.694	0.34			8.555	2.07			4.792	2.80	4.539	2.21
8	8.485	0.02					5.001	0.00			5.986	0.02	7.244	0.00
9											6.747	0.04	11.08	0.00
10											7.053	0.01		
FP <sub>Total</sub>	61.78		82.39		91.48		81.00		94.71		74.06		90.23	
Error	61.75		42.53		29.90		42.71		23.12		48.92		29.21	

	Ventanas (s)													
	70-75		75-80		80-85		85-90		90-95		95-100		100-105	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	1.009	0.01	0.862	67.15	0.586	4.17	0.814	81.74	0.799	87.33	0.698	3.06	0.771	26.23
2	0.775	83.35	0.755	13.57	0.843	36.21	1.004	1.49	0.944	0.06	0.837	54.46	0.902	0.05
3	1.242	1.83	0.981	5.13	0.881	9.97	2.420	1.17	1.099	1.15	1.047	0.17	1.102	0.22
4	1.991	1.53	1.180	0.92	1.052	1.62	3.668	1.65	2.377	0.87	1.104	1.59	2.291	0.86
5	6.347	1.83	1.996	0.07	1.215	1.11	4.642	1.76	4.617	0.49	1.819	0.87	4.484	2.52
6	7.059	1.87	2.366	0.00	1.901	0.05	7.204	0.02	5.598	0.04	2.373	1.55	6.299	2.57
7	7.790	0.03	4.863	0.67	2.093	0.65			7.687	0.21	2.953	1.42	7.056	20.74
8	8.727	0.01	7.430	0.01	2.418	0.04			9.430	0.00	5.520	0.00	7.876	0.05
9	10.50	0.00	8.191	0.01	3.154	0.02			10.53	0.00	6.871	0.02	8.609	0.00
10					3.802	0.03			8.895	0.01	8.931	0.01	9.098	0.01
FP <sub>Total</sub>	91.53		88.73		68.68		87.83		91.33		66.87		65.02	
Error	25.14		33.50		48.80		32.54		29.13		56.57		59.07	

**Tabla B.21 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo 2D-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s (continuación)**

	Ventanas (s)													
	105-110		110-115		115-120		120-125		125-130		130-135		135-140	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.796	70.35	0.785	77.33	0.771	46.15	0.747	45.50	0.796	73.22	0.799	89.61	0.818	60.27
2	1.025	0.09	0.911	2.28	0.928	23.99	0.919	13.25	0.879	0.36	0.910	0.01	1.038	0.28
3	2.004	0.00	1.195	0.51	1.062	10.83	1.231	1.33	0.986	0.00	1.130	0.50	1.301	0.12
4	2.370	2.76	2.089	0.52	3.642	2.82	2.060	0.39	2.043	0.68	2.205	0.00	3.044	3.21
5	5.699	3.11	2.360	0.83	9.135	0.00	2.755	4.62	3.358	1.60	7.713	0.23	6.193	0.01
6	7.472	0.34	3.867	0.19			5.050	1.31	4.611	1.92	2.942	0.92	7.221	6.14
7	8.905	0.01	4.080	1.20			6.678	1.17	8.723	0.24			7.734	0.05
8	9.773	0.00	7.775	0.00			4.384	0.01					8.688	0.00
9	10.17	0.01	8.462	0.02			8.510	0.01					9.940	0.02
10	3.168	0.02	5.999	0.00									10.97	0.00
FP <sub>Total</sub>	79.27		84.65		83.79		69.60		78.03		91.26		72.63	
Error	47.55		31.05		33.81		49.35		46.73		29.46		52.15	

	Ventanas (s)													
	140-145		145-150		150-155		155-160		160-165		165-170		170-175	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.814	57.16	0.813	92.17	0.827	65.08	0.791	21.42	0.805	15.03	0.754	5.87	0.889	12.26
2	1.043	0.13	0.902	0.01	1.024	0.48	1.012	0.72	1.040	0.01	0.889	5.78	1.018	2.75
3	2.244	0.07	1.104	0.76	9.021	4.23	4.197	5.08	2.000	0.00	3.998	12.04	3.514	1.41
4	4.831	1.30	1.462	0.22	0.907	0.00	7.596	5.16	2.193	0.45	4.731	27.67	3.788	11.79
5	7.736	1.09	2.447	0.52			8.007	0.00	3.057	4.28	5.447	1.79	4.477	17.74
6							8.997	0.02	4.879	43.77	7.334	4.71	4.976	12.32
7							9.499	0.45	6.097	0.02	8.318	2.65	5.423	3.80
8							10.90	0.00	8.028	0.00	10.18	0.00	7.669	0.04
9							14.40	0.03	8.638	0.01	4.253	0.01	9.107	0.01
10									9.054	0.00			6.130	0.02
FP <sub>Total</sub>	59.76		93.68		69.79		35.61		66.63		61.83		69.37	
Error	41.48		24.96		54.77		75.83		57.18		59.70		55.01	

	Ventanas (s)													
	175-180		180-185		185-190		190-195		195-200		200-205		205-210	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.784	52.28	0.816	59.40	1.025	13.37	0.750	0.00	0.750	10.69	0.820	62.08	0.801	60.28
2	1.015	1.83	1.018	4.77	0.886	15.09	0.801	12.46	0.972	9.39	0.970	0.09	1.017	1.20
3	1.968	0.02	2.608	3.95	3.121	4.48	0.967	4.14	1.157	2.71	2.545	0.13	5.002	4.67
4	3.914	12.83	4.728	2.95	3.838	2.25	1.242	4.28	3.622	4.77	3.119	2.56	9.915	0.37
5	5.176	1.89	6.616	2.67	4.966	4.37	2.248	1.53	6.782	2.18	7.925	0.05		
6	7.172	2.11	7.464	2.55	7.839	0.07	5.240	8.29	7.625	8.50	8.925	0.87		
7	8.690	1.61	10.00	0.00	8.739	1.70	7.505	2.20	9.108	0.00	8.496	1.91		
8					9.245	0.04	8.836	0.04	9.988	0.01	10.74	0.02		
9					14.87	0.02	10.11	0.00	10.94	0.02	1.106	0.00		
10									12.82	0.01				
FP <sub>Total</sub>	72.57		76.31		47.32		37.02		45.47		69.96		66.52	
Error	52.77		48.67		70.09		78.29		73.27		54.70		53.31	

**Tabla B.22 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo 1D<sub>L</sub>-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**

	Ventanas (s)													
	0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.753	10.24	0.718	6.27	0.704	1.82	0.789	12.48	0.920	66.59	0.923	29.98	0.737	2.39
2	0.950	0.03	1.800	1.20	1.101	1.30	1.074	25.98	1.019	14.10	1.041	55.04	0.985	81.05
3	1.122	1.24			1.627	1.04	1.295	1.83	1.556	1.34	1.632	2.05	1.090	2.22
4	2.025	0.45			1.998	1.51	2.120	5.08	1.802	0.55	2.146	0.23	1.971	0.33
5	2.173	0.33			2.417	0.82	2.239	0.45	2.182	0.19	3.345	0.14	2.231	0.16
6	2.292	0.27			3.496	0.85	3.111	2.61	3.743	0.07	4.092	0.04	2.456	0.23
7	2.560	0.50			3.997	1.17	3.499	0.33					3.265	0.14
8	2.934	0.00			4.956	0.04	4.680	0.01						
9														
10														
FP <sub>Total</sub>	13.40		7.47		12.04		49.62		82.85		87.49		86.52	
Error	93.03		96.12		93.51		70.12		41.41		35.37		36.96	

	Ventanas (s)													
	70-80		80-90		90-100		100-110		110-120		120-130		130-140	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.977	71.60	0.873	38.05	0.993	40.06	0.795	8.07	0.945	74.73	0.983	74.99	0.884	4.80
2	1.085	2.58	1.036	36.09	1.122	4.88	0.872	1.24	1.080	13.85	1.131	9.77	1.012	46.39
3	1.884	0.64	1.211	2.88	1.392	0.37	0.986	4.17	1.241	1.52	1.430	1.19	1.168	3.55
4	2.717	0.52	2.054	1.42	1.579	0.39	1.078	8.33	2.073	1.05	1.928	0.80	1.320	1.09
5	3.975	0.33	2.221	0.57	2.083	1.23	1.321	1.75	3.492	1.03	2.183	0.44	2.333	1.54
6	4.444	0.22	3.467	0.66	2.593	0.96	2.030	1.43			2.473	0.88		
7			4.345	0.32	6.111	1.64	3.105	0.74						
8					7.612	0.01	4.033	0.01						
9														
10														
FP <sub>Total</sub>	75.88		80.00		50.80		26.43		92.19		88.06		57.37	
Error	49.11		44.74		70.14		83.91		30.98		36.47		64.26	

	Ventanas (s)													
	150-160		160-170		170-180		180-190		190-200		200-210		210-220	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.775	6.65	1.025	56.08	0.822	7.00	0.623	1.25	1.015	74.84	0.734	1.72	1.122	75.46
2	0.670	21.87	2.071	0.37	0.970	17.28	0.734	2.99	1.178	1.75	0.976	44.49	3.010	2.10
3	0.899	26.85	2.317	0.13	1.111	1.40	0.970	37.65	2.367	1.38	2.135	1.15	4.596	1.26
4	1.111	26.43	3.611	1.93	2.157	2.50	1.063	7.23	3.454	0.58				
5	1.301	1.53	4.289	2.58	4.349	1.46	1.645	5.22						
6	1.709	1.26					1.830	1.24						
7	2.265	1.41					2.366	1.27						
8							5.001	0.02						
9														
10														
FP <sub>Total</sub>	86.00		61.09		29.63		59.03		78.55		47.35		78.83	
Error	39.11		62.47		84.05		64.97		46.31		71.71		46.01	

**Tabla B.23 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo 2D-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**

	Ventanas (s)													
	0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.749	10.20	0.686	6.42	0.659	1.73	0.808	11.28	0.847	35.94	0.787	16.52	0.836	10.11
2	2.412	0.77	1.861	1.57	1.002	1.35	0.867	9.49	0.862	5.84	0.905	24.79	0.985	74.75
3	5.587	1.19	7.901	36.50	1.792	1.56	1.075	23.58	0.930	33.56	0.987	22.76	1.084	3.81
4	8.334	0.86			3.541	0.68	1.790	0.00	1.033	9.58	1.053	19.92	1.218	1.08
5					4.364	1.48	2.149	4.82	1.270	1.82	1.208	1.36	0.748	1.29
6					5.027	3.09	6.048	0.02	2.557	0.00	7.556	1.68	1.911	0.00
7					5.790	9.38	6.498	0.01	3.786	0.09	8.531	0.00	3.119	0.00
8					6.429	0.01	7.589	0.11	7.074	0.01			4.733	0.00
9					7.418	0.00	7.017	0.02					7.264	0.01
10					7.740	0.09	7.754	0.00						
FP <sub>Total</sub>	13.02		44.50		29.15		61.99		87.70		87.04		91.78	
Error	93.24		74.42		84.28		60.09		30.69		46.04		36.56	

	Ventanas (s)													
	70-80		80-90		90-100		100-110		110-120		120-130		130-140	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.791	0.00	0.823	18.63	0.797	0.00	0.774	8.25	0.943	74.25	0.799	1.58	0.798	0.00
2	0.977	71.61	0.894	23.92	0.993	40.05	0.861	3.49	0.786	6.78	0.979	77.31	1.017	49.46
3	1.143	1.37	1.038	38.29	1.125	5.15	1.018	14.40	1.071	13.83	1.127	10.73	1.153	7.18
4	1.269	2.62	1.154	3.57	1.777	1.04	1.148	0.07	1.232	1.88	1.432	1.20	1.293	2.46
5	2.027	1.25	1.306	0.95	2.228	1.09	1.234	2.02	2.081	1.22	1.892	0.53	2.331	1.87
6	6.331	0.15	2.005	1.21	5.337	1.51	2.051	1.37	3.436	1.00	4.733	0.00	3.084	0.43
7	7.036	0.24	3.746	0.02	6.706	2.10	3.557	0.14	7.698	0.81	7.323	0.28	6.086	2.18
8	7.637	0.01	4.553	0.00	7.640	0.01	4.879	0.00			8.035	0.00	6.862	0.01
9	8.559	0.00	7.169	0.00	7.725	0.01	7.058	0.03					7.294	0.00
10			7.714	0.01			7.873	0.01						
FP <sub>Total</sub>	78.27		87.85		52.96		34.41		99.78		91.69		64.22	
Error	46.89		43.07		69.63		84.18		34.56		37.71		63.22	

	Ventanas (s)													
	150-160		160-170		170-180		180-190		190-200		200-210		210-220	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.818	0.00	0.810	5.86	0.806	1.51	0.751	5.53	1.015	74.79	0.740	0.34	0.993	75.50
2	0.945	61.46	0.815	0.90	0.761	5.16	0.808	2.00	0.830	0.89	0.748	1.87	0.794	2.48
3	1.085	21.45	1.025	56.08	0.975	13.42	0.964	35.57	1.159	1.89	0.830	5.97	0.853	5.38
4	1.147	1.84	3.631	2.11	2.170	2.51	1.050	6.34	1.383	0.72	0.899	0.06	1.104	1.82
5	1.749	1.58	4.183	1.77	3.084	0.11	3.182	2.48	2.558	1.28	0.974	44.94	3.745	0.32
6	2.264	3.27	5.953	0.57	3.600	3.40	3.895	0.30	3.965	0.00	1.710	1.13	6.136	1.24
7	2.490	1.25	6.304	0.64	4.857	0.00	4.378	0.00	4.840	0.00	5.234	0.09	7.718	0.75
8	3.825	0.00	7.496	0.00	5.504	0.04	4.946	0.01	7.766	0.01	6.834	0.04		
9	7.721	0.00	8.031	0.02	6.184	0.04	5.553	0.00			7.580	0.02		
10					8.218	0.04	7.775	0.01						
FP <sub>Total</sub>	91.24		69.96		38.08		54.42		80.54		60.36		87.48	
Error	40.23		58.69		77.06		70.14		44.25		64.60		40.46	

**Tabla B.24 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo 2D-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**

	Ventanas (s)													
	0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		25-30		30-35	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.757	7.84	0.742	13.83	0.710	10.32	0.764	6.25	6.904	4.31	0.753	2.40	0.845	9.89
2	2.421	0.78	2.323	0.77	1.882	1.97	5.211	5.88	7.571	2.05	1.004	2.49	1.089	8.28
3	5.546	1.34	3.918	0.35	2.381	1.27	8.001	24.76	8.058	12.41	4.008	3.00	2.159	9.47
4	6.043	1.69	8.518	1.54	7.026	1.66	10.51	0.23	9.227	11.00	5.011	5.36	5.998	0.00
5	10.18	2.86	10.00	0.64	8.575	5.79	11.00	0.27	13.57	7.51	5.795	10.39	7.026	4.95
6					9.680	4.09			16.82	0.23	7.516	6.71	7.607	19.42
7					9.985	1.27			10.01	4.07	7.816	5.07	7.915	1.62
8					8.042	0.01					10.52	0.10	8.619	0.05
9											14.73	0.03	8.914	0.03
10														
FP <sub>Total</sub>	14.51		17.14		27.78		37.40		41.57		48.95		62.31	
Error	94.52		91.03		84.98		80.30		75.59		72.19		61.44	

	Ventanas (s)													
	35-40		40-45		45-50		50-55		55-60		60-65		65-70	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.732	0.30	0.850	39.16	0.856	0.02	0.651	9.13	0.798	12.99	0.989	89.87	0.794	2.68
2	0.897	56.57	0.843	16.88	0.922	93.85	0.758	10.89	1.013	77.21	0.902	0.00	0.862	60.01
3	1.077	22.79	1.062	22.86	1.170	1.05	0.870	14.33	1.199	0.92	0.665	0.51	1.128	18.89
4	2.177	0.73	2.349	0.00	1.914	0.42	1.051	44.43	2.345	0.01	1.934	0.15	1.890	1.92
5	3.132	0.15	7.066	2.94			2.531	3.21	2.595	0.99	3.556	0.02	2.384	0.00
6	5.130	0.23	9.431	1.66			6.284	2.16	8.557	0.03	4.662	0.42	3.118	0.12
7	8.843	0.79	0.694	5.42			8.555	0.00			4.792	0.45	4.539	0.01
8	8.485	0.00					5.001	0.00			5.986	0.00	7.244	0.01
9											6.747	0.01	11.08	0.01
10											7.053	0.00		
FP <sub>Total</sub>	81.83		88.93		95.34		84.27		92.17		94.22		85.27	
Error	36.84		36.27		21.03		34.69		27.90		24.86		29.04	

	Ventanas (s)													
	70-75		75-80		80-85		85-90		90-95		95-100		100-105	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	1.009	84.77	0.862	51.94	0.586	4.55	0.814	4.68	0.799	0.00	0.698	0.00	0.771	3.56
2	0.775	6.45	0.755	9.75	0.843	48.37	1.004	85.25	0.944	67.91	0.837	19.04	0.902	9.38
3	1.242	0.75	0.981	14.45	0.881	2.84	2.420	0.25	1.099	0.02	1.047	22.77	1.102	7.83
4	1.991	0.02	1.180	3.94	1.052	23.62	3.668	0.24	2.377	2.51	1.104	0.10	2.291	1.18
5	6.347	0.00	1.996	1.90	1.215	1.25	4.642	0.00	4.617	1.08	1.819	1.69	4.484	0.64
6	7.059	0.54	2.366	1.38	1.901	1.30	7.204	1.03	5.598	1.19	2.373	0.38	6.299	1.79
7	7.790	1.81	4.863	1.27	2.093	2.63			7.687	2.03	2.953	0.40	7.056	5.39
8	8.727	0.01	7.430	0.01	2.418	0.00			9.430	0.03	5.520	0.02	7.876	0.01
9	10.50	0.01	8.191	0.00	3.154	0.00			10.53	0.03	6.871	0.03	8.609	0.03
10					3.802	0.00			8.895	0.00	8.931	0.02	9.098	0.06
FP <sub>Total</sub>	95.72		86.17		88.93		91.46		80.71		73.17		71.41	
Error	33.79		36.29		39.39		37.93		44.08		53.15		54.51	

**Tabla B.24 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo 2D-CAB para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s (continuación)**

	Ventanas (s)													
	105-110		110-115		115-120		120-125		125-130		130-135		135-140	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.796	6.97	0.785	4.21	0.771	2.25	0.747	6.28	0.796	0.00	0.799	0.00	0.818	0.06
2	1.025	32.16	0.911	74.16	0.928	80.58	0.919	61.42	0.879	1.33	0.910	72.09	1.038	42.55
3	2.004	3.16	1.195	8.88	1.062	13.27	1.231	18.73	0.986	82.24	1.130	10.31	1.301	5.51
4	2.370	0.00	2.089	2.44	3.642	0.00	2.060	1.24	2.043	2.05	2.205	1.36	3.044	0.17
5	5.699	2.79	2.360	1.18	9.135	0.26	2.755	0.00	3.358	0.01	7.713	1.41	6.193	4.68
6	7.472	3.64	3.867	3.10			5.050	0.07	4.611	0.00	2.942	0.17	7.221	1.83
7	8.905	4.47	4.080	0.16			6.678	0.01	8.723	1.10			7.734	4.30
8	9.773	0.06	7.775	0.01			4.384	0.00					8.688	0.02
9	10.17	0.04	8.462	0.00			8.510	0.00					9.940	0.03
10	3.168	0.00	5.999	0.00									10.97	0.08
FP <sub>Total</sub>	62.94		96.12		96.36		87.84		86.73		85.33		71.88	
Error	60.22		40.11		32.74		35.30		36.45		40.76		53.20	

	Ventanas (s)													
	140-145		145-150		150-155		155-160		160-165		165-170		170-175	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.814	14.23	0.813	0.26	0.827	0.00	0.791	1.52	0.805	0.20	0.754	2.21	0.889	30.83
2	1.043	60.64	0.902	69.03	1.024	87.71	1.012	36.78	1.040	18.88	0.889	34.64	1.018	2.51
3	2.244	9.69	1.104	22.01	9.021	1.52	4.197	3.51	2.000	3.24	3.998	0.00	3.514	10.01
4	4.831	0.24	1.462	1.69	0.907	0.92	7.596	0.01	2.193	2.26	4.731	0.00	3.788	0.00
5	7.736	0.32	2.447	2.23			8.007	3.41	3.057	0.97	5.447	8.90	4.477	1.96
6							8.997	7.60	4.879	1.33	7.334	4.01	4.976	0.69
7							9.499	3.68	6.097	6.94	8.318	4.75	5.423	0.00
8							10.90	0.12	8.028	0.03	10.18	0.03	7.669	0.02
9							14.40	0.04	8.638	0.04	4.253	0.01	9.107	0.08
10									9.054	0.05			6.130	0.01
FP <sub>Total</sub>	85.13		95.22		90.15		72.60		56.67		58.66		56.64	
Error	56.89		28.17		31.39		55.76		66.34		67.64		65.84	

	Ventanas (s)													
	175-180		180-185		185-190		190-195		195-200		200-205		205-210	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	0.784	12.12	0.816	0.19	1.025	74.21	0.750	3.71	0.750	6.39	0.820	0.00	0.801	2.17
2	1.015	65.51	1.018	77.57	0.886	0.65	0.801	0.27	0.972	21.78	0.970	54.84	1.017	85.30
3	1.968	3.55	2.608	1.72	3.121	0.02	0.967	77.80	1.157	2.32	2.545	2.88	5.002	0.01
4	3.914	0.00	4.728	0.00	3.838	0.09	1.242	0.35	3.622	0.47	3.119	0.22	9.915	1.11
5	5.176	1.92	6.616	0.14	4.966	0.03	2.248	1.24	6.782	9.44	7.925	2.11		
6	7.172	0.01	7.464	0.40	7.839	4.96	5.240	0.30	7.625	0.26	8.925	2.23		
7	8.690	0.32	10.00	0.55	8.739	1.25	7.505	1.60	9.108	5.84	8.496	1.55		
8					9.245	0.01	8.836	0.00	9.988	0.06	10.74	0.01		
9					14.87	0.02	10.11	0.01	10.94	0.08	1.106	0.07		
10									12.82	0.02				
FP <sub>Total</sub>	83.43		80.57		84.24		86.60		64.01		70.96		88.60	
Error	45.34		44.00		41.01		37.11		61.11		39.07		37.22	

**Tabla B.25 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo  $1D_T-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**

	Ventanas (s)													
	0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.299	2.84	2.000	4.48	2.009	1.60	1.762	6.28	2.537	19.88	2.395	11.23	1.967	6.00
2	3.652	3.58	4.086	7.01	3.581	5.99	2.229	13.94	3.017	1.37	2.910	4.33	3.032	5.67
3	4.400	3.74	6.620	2.15	4.369	4.93	3.873	4.90	3.802	8.87	4.135	1.36	3.965	3.12
4	5.129	7.69	6.998	1.27	5.957	2.04	4.436	3.70	4.475	2.36	4.562	3.52	4.514	4.01
5	5.900	3.82	7.476	58.77	6.413	13.43	5.007	2.87	4.966	2.50	5.534	1.65	4.748	12.49
6	6.300	17.73	8.038	1.78	7.362	38.15	6.072	10.27	5.717	2.22	6.617	2.70	4.865	3.34
7	6.642	2.28	8.572	1.16	7.917	3.84	6.501	3.53	6.523	2.57	7.036	7.43	5.948	4.43
8	6.977	0.04			8.810	0.03	7.034	0.06	7.062	0.06	7.471	0.03	6.731	0.07
9	7.991	0.01					7.507	0.07	7.608	0.04	8.523	0.11	8.605	0.06
10	8.319	0.06					8.461	0.11	8.522	0.04	8.282	0.01	7.536	0.04
<b>FP<sub>Total</sub></b>	53.25		76.61		72.63		70.20		53.85		47.85		57.22	
<b>Error</b>	68.97		48.34		52.29		55.40		67.96		72.56		64.71	

	Ventanas (s)													
	70-80		80-90		90-100		100-110		110-120		120-130		130-140	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.018	5.74	1.880	4.74	2.028	5.85	2.327	4.67	2.383	6.92	2.086	6.14	1.969	2.26
2	2.373	3.24	2.192	6.99	2.208	3.28	3.197	2.18	2.772	4.16	2.390	2.56	3.081	11.47
3	3.067	5.00	3.131	4.13	2.372	5.38	3.708	2.66	2.931	3.11	2.807	11.18	3.617	5.84
4	4.811	5.41	3.758	13.05	4.184	4.72	4.890	4.22	3.875	9.42	3.091	5.65	4.817	8.30
5	5.856	5.85	3.992	3.23	4.738	7.08	5.077	4.89	3.997	3.48	3.648	5.15	5.139	3.72
6	6.053	3.90	4.512	8.61	4.895	3.93	7.136	29.43	4.326	3.36	3.959	5.26	5.723	2.02
7	6.447	10.80	5.972	5.87	6.376	9.35	7.888	4.64	5.130	3.49	4.502	3.50	6.853	7.91
8	7.149	0.09	6.691	0.03	7.175	0.10	8.332	0.02	6.641	0.05	5.006	0.06	7.296	0.16
9	8.532	0.07	7.643	0.04	7.446	0.03	3.949	0.01	7.189	0.06	6.602	0.03	7.539	0.03
10	2.627	0.02	8.637	0.03	8.847	0.05	4.506	0.03	8.588	0.05	8.527	0.03	8.154	0.02
<b>FP<sub>Total</sub></b>	58.19		56.83		57.75		59.23		49.67		50.76		62.25	
<b>Error</b>	64.96		66.11		65.63		63.26		71.05		70.04		61.86	

	Ventanas (s)													
	150-160		160-170		170-180		180-190		190-200		200-210		210-220	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.175	4.65	4.190	8.61	3.035	3.95	3.189	7.96	2.347	1.33	2.212	2.63	3.180	4.97
2	2.459	6.34	4.638	37.88	3.323	3.44	3.902	14.04	3.124	9.37	3.600	5.03	3.748	21.17
3	3.190	14.01	5.131	8.58	3.861	3.07	4.369	15.07	3.972	4.92	4.225	4.73	4.296	3.93
4	3.820	16.08	6.697	12.18	4.858	45.09	4.976	15.68	4.394	2.72	4.459	3.93	4.534	5.19
5	4.136	5.15	7.473	1.27	5.260	2.12	5.427	5.24	4.836	16.16	4.872	7.69	5.000	9.19
6	4.791	5.79	8.732	5.45	5.515	6.63	6.162	3.03	5.503	1.79	5.212	2.92	5.559	2.38
7	5.929	2.14			6.430	3.15	6.355	1.44	6.619	10.30	5.359	2.94	6.147	2.72
8	6.362	0.03			7.177	0.03	7.011	0.03	7.000	0.02	6.660	0.13	6.571	0.04
9	7.059	0.03			7.602	0.02	7.544	0.02	7.431	0.07	7.078	0.03	7.008	0.03
10	7.752	0.05			8.578	0.01	7.741	0.02	8.359	0.05	7.629	0.11	7.702	0.05
<b>FP<sub>Total</sub></b>	65.86		73.96		72.86		69.02		60.09		56.72		61.25	
<b>Error</b>	58.60		49.40		51.77		55.42		63.00		64.08		61.40	

**Tabla B.26 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo  $1D_T-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**

	Ventanas (s)													
	0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		25-30		30-35	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.500	3.33	2.585	9.86	3.100	3.11	2.809	18.50	0.839	13.04	3.569	8.18	2.151	21.49
2	3.403	10.47	2.889	2.82	3.500	3.14	5.465	1.36	4.778	1.05	4.364	5.93	2.404	1.76
3	3.800	5.31	3.492	3.56	4.000	4.23	5.900	2.05	5.816	1.53	6.425	10.43	3.491	5.17
4	4.400	2.19	3.990	10.67	4.500	3.92	6.665	2.81	6.262	7.31	7.236	38.03	3.926	3.09
5	5.120	16.14	4.513	9.72	4.800	3.26	7.460	3.89	6.587	6.80	7.496	3.93	4.436	2.06
6	6.000	2.94	5.933	2.31	5.250	13.16	7.553	57.05	6.951	3.35	7.913	5.27	6.035	13.70
7	6.500	8.99	6.431	5.63	6.000	11.85	8.124	1.28	7.601	38.91	8.346	4.72	6.624	5.49
8	6.997	0.06	8.352	0.05	6.288	0.04			7.862	0.01	9.119	0.02	7.094	0.08
9	7.464	0.04	6.793	0.03	6.923	0.07			8.336	0.02	2.006	0.02	7.521	0.06
10	8.316	0.06	7.300	0.02	8.045	0.09			9.126	0.08	2.293	0.02	8.288	0.12
<b>FP<sub>Total</sub></b>	67.46		56.67		66.60		86.94		84.84		83.30		82.45	
<b>Error</b>	54.41		65.79		56.23		36.02		37.91		41.84		42.70	

	Ventanas (s)													
	35-40		40-45		45-50		50-55		55-60		60-65		65-70	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.256	15.85	2.394	29.04	1.903	5.16	1.813	3.77	2.331	31.85	1.952	10.12	2.010	6.00
2	3.164	6.57	2.953	4.29	2.617	25.07	2.113	10.00	2.626	2.97	3.058	4.65	2.467	4.37
3	3.698	4.94	3.765	10.76	3.070	3.96	2.421	7.29	2.908	4.72	3.570	8.32	3.134	13.50
4	4.123	6.57	5.004	5.95	3.502	4.87	2.852	11.88	3.659	2.76	3.998	3.55	4.037	5.25
5	4.789	5.53	5.324	1.26	3.977	3.46	3.260	2.17	4.122	4.67	4.710	20.02	4.508	22.42
6	5.091	14.22	5.711	3.84	4.521	7.85	4.577	3.12	4.990	3.82	5.927	5.36	5.563	6.94
7	5.714	3.36	6.540	3.27	5.315	3.85	5.606	4.49	6.357	4.50	6.771	14.06	6.037	5.50
8	6.197	0.05	7.039	0.09	6.430	0.04	6.535	0.07	7.208	0.09	7.013	0.03	7.004	0.05
9	7.581	0.05	7.592	0.05	7.483	0.08	7.049	0.11	7.583	0.05	7.492	0.04	7.525	0.05
10	8.759	0.10	8.627	0.03	8.519	0.07	8.550	0.14	8.081	0.05	8.636	0.10	8.172	0.04
<b>FP<sub>Total</sub></b>	79.07		78.67		76.18		77.29		78.06		82.95		83.91	
<b>Error</b>	45.92		46.47		48.15		47.00		45.58		42.79		42.04	

	Ventanas (s)													
	70-75		75-80		80-85		85-90		90-95		95-100		100-105	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.018	12.19	2.073	4.03	2.267	8.40	1.982	6.65	2.332	13.30	2.003	6.73	2.274	3.72
2	2.284	3.35	2.319	8.21	2.617	4.06	2.295	9.59	2.622	7.29	2.233	4.71	4.037	2.21
3	2.764	4.97	2.689	3.01	3.181	7.13	2.944	3.93	3.006	4.67	2.402	4.44	4.459	5.85
4	3.142	4.95	3.549	9.51	3.783	17.00	3.709	11.90	3.697	5.99	2.946	8.05	4.992	5.74
5	4.132	3.12	3.824	4.95	4.767	7.61	3.972	11.13	4.124	8.97	4.717	9.72	5.471	5.61
6	4.991	3.33	4.817	16.40	5.945	10.30	4.617	14.66	4.808	8.92	4.965	5.33	6.380	4.64
7	5.794	9.17	5.614	2.45	6.710	5.44	4.932	5.12	6.368	4.59	5.611	4.60	6.777	2.60
8	6.567	0.16	6.213	0.21	7.123	0.09	5.562	0.05	7.137	0.12	6.460	0.11	7.080	0.41
9	7.259	0.14	7.638	0.04	7.682	0.04	6.847	0.04	7.622	0.04	6.665	0.04	7.305	0.02
10	8.545	0.08	8.422	0.07	8.847	0.04	7.080	0.05	8.891	0.07	7.458	0.10	8.590	0.08
<b>FP<sub>Total</sub></b>	80.46		81.35		84.11		80.62		78.99		72.05		84.14	
<b>Error</b>	44.49		43.91		39.86		44.73		44.60		52.06		39.98	

**Tabla B.26 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo  $1D_T-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s (continuación)**

	Ventanas (s)													
	105-110		110-115		115-120		120-125		125-130		130-135		135-140	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.104	4.94	2.336	12.59	1.696	3.20	1.930	13.05	2.054	6.61	1.992	2.64	1.800	1.23
2	2.385	13.25	3.368	5.52	2.304	8.25	2.412	6.06	2.286	10.09	2.298	6.32	2.186	4.15
3	3.168	4.99	3.674	5.87	2.645	1.89	2.820	16.25	2.461	4.26	2.700	3.75	3.042	17.44
4	3.725	34.47	4.019	10.34	3.101	18.74	3.146	7.33	2.999	3.93	3.203	12.41	3.353	3.22
5	4.162	3.76	5.202	5.65	3.820	18.54	3.556	3.93	3.393	6.08	3.615	9.68	5.114	7.65
6	5.199	6.86	5.478	4.00	4.440	7.91	3.782	7.98	3.955	12.86	4.798	23.16	6.749	8.79
7	6.336	6.72	6.215	7.85	4.991	4.00	4.728	10.31	4.625	15.26	5.688	5.19	7.230	27.95
8	6.642	0.03	7.293	0.08	6.390	0.08	5.044	0.07	5.541	0.08	6.002	0.02	7.602	0.03
9	7.375	0.02	7.769	0.04	7.447	0.07	6.525	0.03	6.338	0.04	7.063	0.06	8.263	0.04
10	7.586	0.02	8.557	0.09	8.634	0.04	8.519	0.02	8.541	0.03	8.755	0.02	9.890	0.03
<b>FP<sub>Total</sub></b>	85.39		76.53		82.77		80.04		76.61		76.28		82.49	
<b>Error</b>	37.49		49.79		41.47		44.78		47.54		49.00		42.34	

	Ventanas (s)													
	140-145		145-150		150-155		155-160		160-165		165-170		170-175	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	1.681	2.50	2.111	8.57	1.894	14.94	3.399	1.54	3.052	5.58	3.455	2.87	1.881	1.32
2	2.300	4.34	2.399	8.05	3.085	3.08	4.179	9.35	3.319	2.25	4.002	14.89	3.135	9.35
3	2.561	1.58	3.028	14.45	3.484	4.47	4.409	2.86	3.719	3.24	4.600	9.37	3.818	13.10
4	3.218	21.79	3.401	3.41	3.956	2.44	4.665	48.11	3.983	2.08	4.947	39.30	4.374	11.38
5	3.734	12.29	3.805	14.76	4.429	4.00	4.988	2.50	4.378	2.45	5.138	4.13	4.621	6.26
6	4.188	12.52	4.202	3.67	5.001	3.81	5.144	1.35	4.883	56.14	5.767	9.46	4.856	25.64
7	4.853	4.41	4.440	5.73	6.531	5.01	5.604	1.46	5.435	8.45	7.063	8.66	5.334	4.23
8	5.202	0.04	4.996	0.03	7.200	0.04	6.630	0.13	6.398	0.05	8.445	0.03	6.087	0.04
9	6.353	0.05	5.890	0.04	7.737	0.12	8.735	0.06	8.726	0.02	6.697	0.03	6.979	0.02
10	7.727	0.09	6.589	0.03	8.901	0.24	7.496	0.02	5.864	0.03			7.610	0.05
<b>FP<sub>Total</sub></b>	80.27		71.16		79.02		87.96		89.07		94.49		84.17	
<b>Error</b>	45.26		53.46		45.57		30.39		32.88		35.81		40.52	

	Ventanas (s)													
	175-180		180-185		185-190		190-195		195-200		200-205		205-210	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.958	2.58	2.445	2.09	3.121	12.07	2.515	3.03	2.501	3.35	3.140	5.20	3.196	3.95
2	3.352	8.22	3.076	16.99	3.845	5.92	3.495	8.32	3.602	8.31	3.737	29.42	3.772	16.62
3	3.586	5.00	3.576	2.45	4.958	10.07	3.670	4.14	4.433	5.72	4.623	7.34	4.109	2.80
4	3.919	34.72	3.995	5.15	5.564	1.85	4.188	9.13	5.202	4.15	5.001	4.97	4.503	4.84
5	5.151	7.36	4.418	7.82	6.466	9.86	4.612	4.21	5.967	4.92	5.560	3.44	4.955	20.58
6	5.866	3.10	4.823	16.32	7.053	17.02	4.829	6.60	6.598	14.98	6.538	4.48	5.639	7.49
7	6.304	6.58	6.630	14.77	7.337	5.76	5.301	16.42	7.123	9.03	7.000	6.56	6.631	5.76
8	6.713	0.05	7.078	0.02	7.608	0.03	6.639	0.06	7.512	0.11	7.423	0.05	7.740	0.08
9	7.817	0.05	7.431	0.11	7.817	0.05	7.436	0.06	7.709	0.06	8.350	0.08	8.612	0.05
10	8.696	0.03	8.146	0.04	8.592	0.08	8.948	0.04	8.928	0.03	8.908	0.04	6.106	0.02
<b>FP<sub>Total</sub></b>	83.39		81.99		79.13		69.70		74.15		79.94		77.80	
<b>Error</b>	40.71		42.56		45.89		55.36		49.91		44.54		46.07	

**Tabla B.27 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-9.0)</sub> para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**

	Ventanas (s)													
	0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		25-30		30-35	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.200	0.00	2.000	0.00	3.000	0.00	2.484	1.42	1.543	10.02	2.081	1.09	1.830	5.66
2	3.002	0.00	2.200	0.00	3.399	1.18	4.101	13.75	6.320	8.59	2.334	1.53	2.172	16.32
3	3.672	2.35	2.529	8.31	4.804	1.30	5.800	0.00	6.463	0.21	3.536	5.18	2.461	0.42
4	4.000	0.00	3.087	0.05	5.307	15.01	6.143	0.68	6.538	2.15	4.150	0.90	3.931	2.78
5	4.790	0.44	3.937	10.41	5.500	0.00	6.400	0.00	6.887	5.83	4.451	3.08	4.373	2.87
6	5.000	0.00	3.942	1.65	6.166	13.64	6.849	13.24	7.468	2.13	5.027	5.39	5.258	0.06
7	5.188	3.80	4.695	0.04	6.636	5.19	7.729	0.52	7.698	36.62	5.805	0.13	6.028	12.88
8	5.549	0.07	5.851	0.03	7.000	0.00	8.060	0.47	8.088	0.00	6.456	0.17	6.629	0.04
9	5.886	0.01	7.203	0.00	8.054	0.01	8.589	0.02	8.556	0.03	7.458	0.31	7.023	0.06
10	6.503	0.00	7.764	0.04	8.713	0.01	8.238	0.01	9.255	0.06	7.640	0.00	7.502	0.10
FP <sub>Total</sub>	21.64		30.51		51.18		79.94		75.00		72.92		75.30	
Error	78.99		80.38		66.18		43.73		44.82		51.18		49.78	

	Ventanas (s)													
	35-40		40-45		45-50		50-55		55-60		60-65		65-70	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.238	15.40	1.625	0.00	1.833	3.60	1.980	5.48	2.149	0.00	1.963	10.05	1.938	2.50
2	2.795	0.00	2.008	0.73	2.202	0.77	2.090	8.58	2.338	31.28	2.385	0.03	2.383	6.70
3	3.132	6.86	2.376	29.03	2.646	17.04	2.464	0.55	2.551	3.58	3.052	4.40	3.175	13.31
4	3.750	4.68	3.752	11.80	2.825	4.66	2.818	10.50	2.941	3.76	3.566	8.37	3.304	0.89
5	4.493	7.88	4.989	5.92	3.947	5.48	4.026	0.44	4.409	4.68	4.001	0.20	3.722	7.17
6	5.209	12.28	5.541	1.90	4.369	1.99	4.608	0.07	4.713	0.87	4.694	18.15	4.191	4.86
7	5.636	1.02	6.063	2.51	4.583	9.03	5.922	2.71	4.952	4.26	4.836	0.29	4.533	21.03
8	6.200	0.02	7.089	0.06	5.938	0.01	6.523	0.07	5.617	0.00	5.995	0.03	5.650	0.02
9	6.765	0.03	7.347	0.01	6.270	0.06	6.968	0.04	6.388	0.05	6.759	0.13	5.995	0.07
10	7.593	0.02	7.623	0.06	6.825	0.03	7.513	0.03	6.845	0.00	7.011	0.03	6.970	0.02
FP <sub>Total</sub>	70.14		67.90		72.96		59.34		74.93		75.29		75.78	
Error	53.47		56.63		49.54		54.06		49.85		47.76		47.60	

	Ventanas (s)													
	70-75		75-80		80-85		85-90		90-95		95-100		100-105	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.025	11.83	2.000	0.99	2.016	0.89	1.216	0.73	2.315	9.93	2.154	0.08	2.271	1.81
2	2.732	4.45	2.354	0.24	2.139	4.30	1.930	6.31	2.600	0.29	2.379	6.75	3.183	0.28
3	3.184	2.35	2.659	2.62	2.179	0.02	2.362	7.17	3.109	1.15	2.911	5.62	4.955	6.54
4	3.258	1.54	3.867	8.22	2.645	11.71	3.344	2.30	4.303	1.33	4.324	0.07	5.259	1.31
5	4.116	2.36	4.750	1.74	3.426	0.82	3.563	0.24	4.792	8.08	4.846	3.07	6.215	2.42
6	4.683	0.18	4.840	14.79	3.797	16.15	3.711	12.30	5.566	0.44	5.298	0.60	6.676	6.07
7	5.304	0.01	5.485	0.02	4.729	6.97	3.965	10.51	7.191	13.09	5.539	4.82	6.974	0.04
8	5.769	0.10	6.209	0.22	5.632	0.00	4.618	0.15	7.498	0.00	6.126	0.08	7.082	0.41
9	6.075	0.00	6.925	0.00	5.915	0.07	5.231	0.01	7.744	0.01	6.578	0.00	7.882	0.04
10	6.226	0.04	7.302	0.01	6.830	0.00	7.132	0.00	8.923	0.04	7.421	0.12	8.453	0.06
FP <sub>Total</sub>	63.71		59.97		63.84		62.72		56.14		41.74		72.88	
Error	59.42		61.55		57.07		60.23		62.49		70.32		49.58	

**Tabla B.27 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-9.0)</sub> para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s (continuación)**

	Ventanas (s)													
	105-110		110-115		115-120		120-125		125-130		130-135		135-140	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.006	0.00	2.094	4.47	1.822	0.51	1.921	12.67	1.853	3.13	2.000	0.00	2.201	0.00
2	3.703	35.41	2.373	6.73	2.001	0.00	2.204	0.00	2.042	5.71	2.147	2.81	2.499	0.00
3	4.021	2.49	2.696	0.02	2.275	5.95	2.498	0.01	2.356	4.22	2.378	2.19	3.056	17.18
4	5.897	0.84	3.611	4.05	2.683	1.29	2.789	20.41	2.525	0.08	2.671	4.52	3.335	1.61
5	7.497	1.69	3.645	7.38	3.101	23.85	3.148	8.27	2.942	4.84	3.593	20.60	3.596	0.86
6	8.877	0.03	4.066	12.57	3.259	0.25	3.489	0.00	3.342	9.75	3.802	0.00	5.143	7.49
7	10.11	0.38	5.513	4.21	3.797	14.90	3.736	2.14	3.603	4.43	4.200	0.00	6.140	0.04
8	2.335	0.13	6.288	0.05	3.997	0.00	4.011	0.00	4.367	0.03	4.798	0.15	6.721	0.08
9	2.503	0.02	7.290	0.08	4.387	0.06	4.728	0.10	4.816	0.16	5.057	0.04	7.216	0.28
10	5.220	0.08	7.777	0.01	5.096	0.01	5.027	0.08	5.567	0.07	5.712	0.05	7.447	0.00
FP <sub>Total</sub>	73.69		64.22		73.90		68.65		68.83		64.65		67.93	
Error	51.00		59.42		50.80		52.31		53.65		55.10		56.57	

	Ventanas (s)													
	140-145		145-150		150-155		155-160		160-165		165-170		170-175	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.198	3.66	2.173	3.29	1.873	13.23	2.069	3.33	2.004	0.21	1.990	0.00	2.043	0.00
2	2.501	0.00	2.458	10.63	1.996	0.02	3.536	0.70	3.045	6.11	3.522	1.56	3.157	5.20
3	3.168	12.90	3.018	15.28	3.471	4.94	4.208	7.71	3.714	2.58	3.965	13.87	3.513	2.64
4	3.799	0.00	3.826	1.87	4.491	4.20	4.661	44.64	4.005	0.02	4.011	0.00	3.771	14.23
5	3.783	23.38	3.836	5.32	5.923	2.20	5.513	0.06	4.602	0.65	4.523	0.23	4.424	25.00
6	4.780	11.23	3.978	3.35	7.368	9.78	5.906	0.22	4.880	55.14	4.810	38.91	4.606	0.00
7	6.363	3.48	4.308	8.17	7.987	0.08	6.462	10.34	5.482	8.80	5.455	4.18	4.978	18.28
8	7.178	0.02	4.917	0.01	8.937	0.24	7.646	0.03	6.076	0.00	7.027	0.06	5.374	0.05
9	7.739	0.08	6.200	0.00	2.402	0.00	7.852	0.00	6.420	0.04	7.318	0.05	6.006	0.00
10	7.932	0.00	7.063	0.00			8.003	0.00	7.672	0.01	7.748	0.00	6.087	0.04
FP <sub>Total</sub>	66.95		51.79		58.34		74.82		81.81		71.77		81.39	
Error	56.33		61.03		64.35		41.75		41.50		52.17		42.06	

	Ventanas (s)													
	175-180		180-185		185-190		190-195		195-200		200-205		205-210	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.213	0.00	2.133	0.68	2.005	0.00	1.820	3.09	2.497	3.67	2.128	0.38	2.258	0.23
2	2.498	0.00	2.487	14.65	3.121	12.05	2.035	1.56	3.658	8.31	3.740	29.09	3.234	7.55
3	3.155	2.76	3.422	0.08	3.829	5.82	2.286	2.58	4.364	1.55	4.653	3.47	3.764	11.90
4	3.461	1.25	3.702	0.03	4.949	9.88	3.456	2.23	5.782	0.09	4.954	4.40	3.801	0.15
5	3.900	38.99	3.992	5.48	5.952	1.12	3.822	4.63	5.949	2.66	5.440	0.22	4.640	11.36
6	4.122	1.25	4.420	6.94	6.497	7.47	4.501	0.00	6.117	0.19	6.122	2.30	4.979	20.25
7	4.803	0.00	4.793	16.65	7.064	20.47	4.846	5.95	6.551	2.65	7.314	0.75	5.597	6.86
8	5.166	0.07	5.049	0.00	7.634	0.05	5.249	0.19	6.593	0.06	7.632	0.07	6.604	0.00
9	5.496	0.01	5.733	0.00	7.836	0.00	6.126	0.01	6.777	0.04	8.000	0.00	6.629	0.05
10	5.871	0.03	6.630	0.15	8.140	0.04	6.431	0.04	6.832	0.05	8.559	0.02	7.079	0.00
FP <sub>Total</sub>	73.61		73.87		73.79		54.31		59.70		56.53		74.11	
Error	48.43		49.54		51.07		59.89		63.30		63.05		50.08	

**Tabla B.28 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo  $1D_L-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**

	Ventanas (s)													
	0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	3.200	2.81	8.270	67.71	2.002	4.31	2.126	14.36	1.980	5.24	2.030	8.85	1.854	5.62
2	3.594	1.78	6.478	3.84	2.432	1.26	3.461	8.28	2.215	3.23	2.520	7.83	2.899	1.11
3	3.944	4.82	4.244	1.53	3.513	1.76	4.870	2.50	2.463	3.04	2.931	2.07	3.991	1.26
4	4.296	2.48			4.000	2.06	5.286	3.91	2.854	6.79	3.934	2.04	6.016	6.73
5	5.067	3.13			4.268	2.79	6.150	3.45	3.819	2.35	4.737	4.78	6.842	7.59
6	5.840	2.08			4.987	7.30	7.614	18.56	4.506	2.87	6.222	9.41	7.291	6.79
7	6.561	2.61			5.790	15.92	8.129	2.36	6.005	4.71	6.942	5.24	7.851	6.11
8	7.749	0.08			7.594	0.13	8.631	0.08	7.099	0.20	7.409	0.05	8.562	0.03
9	8.157	0.05			8.061	0.05	8.972	0.02	8.926	0.04	8.032	0.03	9.349	0.04
10	9.000	0.03			6.284	0.02			7.454	0.02	8.989	0.04	5.052	0.02
<b>FP<sub>Total</sub></b>	35.55		73.08		55.43		63.92		54.33		51.58		44.78	
<b>Error</b>	80.45		52.04		66.49		60.09		67.69		70.08		74.30	

	Ventanas (s)													
	70-80		80-90		90-100		100-110		110-120		120-130		130-140	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.026	8.91	2.054	11.61	2.097	7.93	2.025	3.47	2.066	10.48	2.484	10.64	2.331	9.32
2	2.673	3.23	3.463	6.15	2.582	5.04	2.538	2.35	2.347	2.89	3.046	4.78	2.688	1.20
3	3.297	4.69	4.344	3.16	3.121	1.95	3.190	3.03	2.715	4.18	3.511	3.05	3.263	3.74
4	3.987	3.83	4.584	2.46	4.384	6.59	4.035	2.85	3.522	12.09	4.119	3.21	3.923	1.62
5	4.863	3.76	5.255	4.21	5.308	7.51	5.252	3.17	4.734	4.58	5.522	2.27	6.057	9.73
6	6.052	4.04	5.941	5.83	6.208	9.78	7.059	17.17	6.647	4.61	5.955	4.30	6.859	3.54
7	6.624	3.74	7.565	8.06	7.612	4.60	7.575	2.73	7.069	2.19	7.185	4.45	7.433	2.07
8	6.998	0.04	8.019	0.02	7.868	0.03	8.036	0.02	7.791	0.04	7.895	0.02	7.978	0.05
9	7.818	0.08	8.588	0.03	9.261	0.04	9.097	0.10	8.027	0.03	8.408	0.02	9.718	0.04
10	8.183	0.03	6.835	0.01	6.991	0.02	8.487	0.04	8.676	0.02	8.812	0.05	5.527	0.02
<b>FP<sub>Total</sub></b>	48.11		47.96		52.40		50.76		50.24		42.15		41.53	
<b>Error</b>	71.90		72.15		68.74		70.38		67.22		76.22		76.68	

	Ventanas (s)													
	150-160		160-170		170-180		180-190		190-200		200-210		210-220	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.223	36.44	2.035	2.53	2.021	7.58	2.079	4.97	2.165	11.81	2.397	3.84	2.157	4.12
2	2.500	11.11	3.001	1.10	2.209	2.86	2.349	2.94	3.475	5.31	3.312	1.82	2.527	2.41
3	6.693	3.93	3.611	10.82	3.597	7.86	3.521	16.04	4.028	4.67	4.087	2.87	3.959	2.34
4	7.341	2.42	4.295	12.88	4.668	7.41	4.079	5.89	5.003	2.27	6.167	17.74	4.713	2.37
5	7.967	4.46	5.521	4.80	4.911	4.70	4.504	3.14	6.033	4.38	6.756	7.13	6.029	2.37
6	9.100	3.04	5.993	1.53	5.510	8.31	4.933	3.63	7.044	4.06	7.099	4.37	6.933	2.44
7			6.408	1.72	6.171	7.32	5.468	4.15	7.937	6.05	7.584	6.20	7.208	11.70
8			7.157	0.01	6.947	0.07	6.199	0.05	8.519	0.05	7.901	0.02	7.764	0.06
9			9.030	0.17	7.804	0.03	9.073	0.06	9.020	0.03	9.067	0.08	7.902	0.03
10			7.658	0.03	8.288	0.06	7.828	0.04	6.662	0.02			8.752	0.09
<b>FP<sub>Total</sub></b>	61.40		56.29		62.46		56.02		48.07		53.77		45.65	
<b>Error</b>	63.28		65.65		61.77		64.09		72.07		67.93		73.84	

**Tabla B.29 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo  $1D_L-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**

	Ventanas (s)													
	0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		25-30		30-35	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.300	3.46	2.000	4.21	2.404	1.33	2.300	1.41	3.987	3.50	2.146	4.47	2.135	16.27
2	3.000	4.69	3.000	2.98	3.000	4.83	4.534	1.36	6.479	1.62	4.021	5.69	2.409	4.39
3	3.988	5.59	3.851	4.39	4.000	2.43	6.354	5.79	6.886	11.19	4.505	2.97	4.015	5.08
4	5.000	7.08	5.998	4.63	5.694	3.88	7.782	3.19	7.278	2.64	5.021	13.62	5.226	5.13
5	5.567	6.70	7.350	7.59	6.765	4.95	8.215	74.28	7.512	7.84	5.921	7.78	5.770	2.71
6	6.500	8.47	7.484	3.40	7.019	5.47	9.000	1.98	7.766	2.73	6.300	3.16	6.998	8.77
7	7.118	5.44	7.747	9.85	8.717	9.55			8.061	33.55	7.246	4.61	7.608	28.56
8	7.600	0.05	8.356	0.12	9.000	0.13			9.221	0.17	7.629	0.17	8.611	0.09
9	8.173	0.12	8.942	0.05	9.297	0.04			10.00	0.03	7.992	0.09	9.345	0.02
10	10.15	0.04	9.363	0.03	9.967	0.07			10.63	0.05	9.456	0.04	8.191	0.03
<b>FP<sub>Total</sub></b>	66.08		59.82		61.32		88.02		87.95		78.00		84.21	
<b>Error</b>	58.22		63.41		60.33		34.78		34.19		47.61		39.79	

	Ventanas (s)													
	35-40		40-45		45-50		50-55		55-60		60-65		65-70	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.234	8.62	2.016	8.35	0.945	5.99	2.112	3.67	1.017	8.19	0.922	4.36	1.925	11.85
2	2.800	6.06	2.249	2.10	1.813	5.39	2.461	22.51	2.119	11.29	2.260	3.90	2.421	3.95
3	3.586	4.13	2.740	2.47	2.288	7.08	4.033	2.51	2.858	10.07	3.099	3.25	2.975	3.66
4	5.772	13.94	3.894	4.67	2.786	26.67	5.804	4.01	4.723	6.55	4.922	8.35	3.281	6.58
5	6.146	2.97	5.541	2.61	4.514	7.89	6.255	16.10	5.622	3.93	5.626	2.93	5.661	3.59
6	6.869	7.88	5.996	7.47	5.312	3.64	6.968	7.28	6.057	3.30	6.017	10.39	5.900	5.77
7	7.243	4.43	7.101	26.33	6.017	4.36	7.370	6.30	6.845	5.21	6.789	16.89	7.215	17.48
8	7.671	0.16	7.375	0.06	6.813	0.05	8.292	0.06	7.437	0.06	7.300	0.04	7.649	0.06
9	8.000	0.03	7.702	0.06	7.303	0.18	9.039	0.04	8.001	0.03	7.828	0.10	8.034	0.12
10	9.265	0.07	8.958	0.08	9.529	0.03	9.692	0.04	9.453	0.04	9.121	0.06	9.327	0.05
<b>FP<sub>Total</sub></b>	77.28		77.59		88.39		80.03		63.53		74.26		78.12	
<b>Error</b>	48.60		47.90		34.48		45.92		60.85		51.00		46.87	

	Ventanas (s)													
	70-75		75-80		80-85		85-90		90-95		95-100		100-105	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	1.965	6.69	2.001	13.09	1.801	2.85	1.247	10.25	1.999	20.79	2.161	4.24	2.383	2.83
2	3.348	10.15	2.376	10.27	2.016	20.37	1.909	3.24	2.395	8.27	2.611	4.50	3.191	6.21
3	4.134	9.10	2.695	2.77	2.132	4.45	2.494	8.46	2.614	5.08	4.340	9.13	5.294	5.04
4	4.757	2.93	4.020	3.71	2.395	2.76	2.955	5.41	3.117	4.36	5.219	15.89	6.412	3.66
5	5.301	3.97	4.846	10.79	3.453	6.07	3.510	11.21	4.302	5.82	6.000	14.17	7.122	25.30
6	6.103	6.57	5.477	4.17	4.412	2.92	5.211	9.28	5.577	5.97	6.485	2.66	8.182	4.17
7	6.965	10.59	6.977	12.18	5.190	4.25	7.143	12.57	7.408	5.16	6.946	6.16	8.664	3.61
8	7.247	0.03	7.285	0.07	5.968	0.10	8.301	0.02	7.686	0.09	7.521	0.03	9.068	0.12
9	7.811	0.13	7.639	0.04	7.743	0.11	8.837	0.05	9.364	0.06	7.791	0.05	9.986	0.04
10	8.238	0.04	8.841	0.05	8.600	0.06	9.301	0.05	6.144	0.04	10.68	0.10	10.63	0.07
<b>FP<sub>Total</sub></b>	72.33		76.73		72.80		74.67		76.60		78.53		76.21	
<b>Error</b>	52.53		50.11		54.27		50.77		48.61		48.45		49.25	

**Tabla B.29 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo  $1D_L-CAB_{F(1.8-9.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s (continuación)**

	Ventanas (s)													
	105-110		110-115		115-120		120-125		125-130		130-135		135-140	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.000	4.24	2.087	13.74	0.924	10.11	2.002	5.65	0.999	3.32	2.000	5.17	1.145	1.72
2	2.402	11.40	2.388	5.87	1.810	9.23	2.495	13.30	1.980	21.50	2.352	19.38	2.301	7.65
3	3.262	4.28	2.644	5.83	2.000	6.09	3.328	16.06	2.355	11.14	2.627	6.57	3.210	5.12
4	4.071	4.76	3.498	16.75	2.299	4.75	3.604	4.16	5.885	7.64	3.598	5.39	6.108	17.62
5	5.594	6.68	4.655	6.39	2.730	2.45	4.002	4.46	7.264	6.99	3.850	4.73	7.185	8.76
6	5.925	7.10	6.100	3.99	3.627	11.90	6.055	5.60	7.892	4.35	4.296	3.76	7.736	14.89
7	6.872	2.70	6.683	4.15	4.168	3.20	9.082	4.69	8.491	6.90	6.850	8.44	8.723	10.35
8	7.406	0.14	7.750	0.03	4.838	0.09	7.715	0.04	8.832	0.05	7.748	0.07	9.737	0.04
9	8.882	0.11	7.925	0.18	7.252	0.04	1.777	0.08	3.799	0.03	6.372	0.04	10.86	0.03
10	9.764	0.07	8.835	0.02	8.167	0.07	2.854	0.03	4.084	0.03	8.840	0.03	6.679	0.02
<b>FP<sub>Total</sub></b>	76.02		80.94		73.08		69.58		72.92		67.53		75.82	
<b>Error</b>	50.02		43.67		51.51		54.67		52.35		57.19		49.33	

	Ventanas (s)													
	140-145		145-150		150-155		155-160		160-165		165-170		170-175	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	1.103	1.03	0.700	4.63	1.057	10.98	2.214	2.07	2.003	10.00	1.992	4.92	2.041	5.45
2	1.730	2.68	1.000	3.18	2.004	4.08	3.610	11.61	2.264	3.19	3.551	12.07	3.404	20.95
3	2.210	53.35	2.471	41.41	5.367	1.47	4.285	14.07	3.709	7.68	4.017	4.99	3.803	3.13
4	3.743	6.34	3.833	8.90	7.333	2.33	5.516	6.91	4.631	11.96	4.594	6.24	4.062	5.21
5	4.491	2.50	4.169	2.05	7.505	18.72	7.580	4.97	5.527	7.14	5.482	13.19	4.403	5.47
6	5.778	3.15	4.914	4.42	7.973	16.35	8.006	10.10	6.063	15.83	6.076	6.41	4.927	5.11
7	7.334	5.57	7.061	9.14	8.993	16.82	9.035	15.42	8.015	4.90	6.963	12.08	5.465	5.55
8	8.018	0.04	8.000	0.03	9.708	0.03	10.80	0.04	8.403	0.06	8.250	0.09	6.172	0.10
9	9.296	0.02	8.991	0.07	10.65	0.06	9.501	0.03	8.981	0.06	10.66	0.04	7.908	0.06
10	6.450	0.01	6.001	0.02	3.993	0.01	8.579	0.03	7.372	0.04	7.722	0.04	9.074	0.08
<b>FP<sub>Total</sub></b>	82.21		84.91		81.14		75.84		76.43		76.77		77.20	
<b>Error</b>	42.44		39.44		43.65		47.34		49.60		48.45		48.13	

	Ventanas (s)													
	175-180		180-185		185-190		190-195		195-200		200-205		205-210	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	1.587	5.29	2.128	19.39	2.004	3.33	2.338	13.91	2.491	2.42	2.130	8.33	2.264	8.35
2	2.150	4.46	3.165	4.09	2.202	3.01	3.448	4.02	4.327	3.33	3.724	3.32	3.787	11.41
3	2.397	6.83	4.004	13.35	5.955	6.43	3.932	6.70	5.790	9.40	3.996	5.86	4.185	3.35
4	4.121	24.90	4.628	3.15	7.059	2.70	4.590	3.57	6.088	2.52	6.170	14.61	4.929	3.84
5	4.991	3.04	5.011	4.50	7.502	4.40	6.071	7.79	6.286	22.05	6.512	4.99	5.200	2.46
6	5.492	9.15	5.736	3.46	7.837	38.13	6.426	8.64	6.701	4.05	7.174	5.46	6.546	5.43
7	5.820	2.79	8.036	7.30	8.631	8.68	7.708	4.23	9.040	14.27	7.505	3.21	7.383	9.35
8	7.873	0.03	8.480	0.07	9.340	0.04	8.087	0.13	4.025	0.04	7.947	0.05	8.809	0.09
9	8.602	0.03	8.811	0.04	10.84	0.03	8.751	0.07	7.559	0.07	8.693	0.11	9.914	0.06
10	3.798	0.06	9.002	0.04	4.854	0.02	9.795	0.04	8.602	0.03	9.458	0.05	7.081	0.04
<b>FP<sub>Total</sub></b>	71.13		72.98		76.99		76.46		73.82		71.33		67.37	
<b>Error</b>	54.99		51.97		47.94		48.53		51.17		54.18		57.38	

**Tabla B.30 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-9.0)</sub> para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s**

	Ventanas (s)													
	0-5		5-10		10-15		15-20		20-25		25-30		30-35	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.200	3.17	2.000	4.19	3.000	7.55	2.484	0.27	1.543	1.90	2.081	4.42	1.830	1.19
2	3.002	4.56	2.200	2.40	3.399	5.52	4.101	2.86	6.320	1.32	2.334	1.35	2.172	14.12
3	3.672	0.76	2.529	0.00	4.804	4.28	5.800	1.99	6.463	6.23	3.536	1.00	2.461	4.20
4	4.000	5.32	3.087	3.18	5.307	0.03	6.143	1.06	6.538	5.51	4.150	6.09	3.931	2.71
5	4.790	6.85	3.937	1.59	5.500	8.69	6.400	4.62	6.887	9.32	4.451	3.88	4.373	0.59
6	5.000	7.13	3.942	3.77	6.166	2.47	6.849	2.66	7.468	4.12	5.027	10.34	5.258	6.33
7	5.188	6.43	4.695	2.70	6.636	1.53	7.729	2.39	7.698	25.64	5.805	16.47	6.028	0.00
8	5.549	0.06	5.851	0.03	7.000	0.05	8.060	0.72	8.088	0.07	6.456	0.01	6.629	0.00
9	5.886	0.03	7.203	0.09	8.054	0.04	8.589	0.01	8.556	0.01	7.458	0.00	7.023	0.08
10	6.503	0.08	7.764	0.09	8.713	0.05	8.238	0.01	9.255	0.13	7.640	0.18	7.502	0.00
FP <sub>Total</sub>	70.59		59.54		69.54		89.46		78.94		79.22		74.94	
Error	68.79		66.86		55.50		33.37		49.41		46.75		49.81	

	Ventanas (s)													
	35-40		40-45		45-50		50-55		55-60		60-65		65-70	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.238	7.03	1.625	3.12	1.833	6.83	1.980	2.64	2.149	10.38	1.963	0.80	1.938	10.87
2	2.795	6.37	2.008	6.28	2.202	7.46	2.090	6.89	2.338	3.73	2.385	7.64	2.383	0.00
3	3.132	0.07	2.376	0.14	2.646	10.26	2.464	22.47	2.551	16.61	3.052	1.70	3.175	0.92
4	3.750	3.21	3.752	2.73	2.825	15.06	2.818	1.67	2.941	2.84	3.566	0.01	3.304	5.92
5	4.493	0.88	4.989	0.23	3.947	0.68	4.026	2.19	4.409	0.35	4.001	3.46	3.722	0.33
6	5.209	3.19	5.541	3.22	4.369	3.51	4.608	5.18	4.713	5.85	4.694	2.29	4.191	1.87
7	5.636	8.62	6.063	9.01	4.583	2.36	5.922	12.67	4.952	0.12	4.836	10.46	4.533	0.05
8	6.200	0.03	7.089	0.21	5.938	0.04	6.523	0.03	5.617	0.04	5.995	0.09	5.650	0.04
9	6.765	0.10	7.347	0.07	6.270	0.01	6.968	0.08	6.388	0.01	6.759	0.10	5.995	0.03
10	7.593	0.13	7.623	0.03	6.825	0.04	7.513	0.06	6.845	0.05	7.011	0.06	6.970	0.02
FP <sub>Total</sub>	68.31		69.94		75.52		82.79		58.47		69.34		66.45	
Error	58.22		55.12		52.54		51.98		63.97		59.87		61.92	

	Ventanas (s)													
	70-75		75-80		80-85		85-90		90-95		95-100		100-105	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.025	1.85	2.000	11.62	2.016	20.74	1.216	6.29	2.315	22.31	2.154	5.43	2.271	4.28
2	2.732	2.31	2.354	10.37	2.139	0.04	1.930	3.83	2.600	6.30	2.379	0.32	3.183	5.48
3	3.184	5.99	2.659	2.58	2.179	5.36	2.362	10.53	3.109	7.22	2.911	0.45	4.955	0.21
4	3.258	4.20	3.867	1.64	2.645	0.00	3.344	3.53	4.303	6.67	4.324	8.36	5.259	6.07
5	4.116	8.00	4.750	3.94	3.426	7.16	3.563	7.22	4.792	0.93	4.846	1.77	6.215	16.11
6	4.683	4.09	4.840	7.36	3.797	1.05	3.711	2.42	5.566	6.01	5.298	15.29	6.676	1.82
7	5.304	4.96	5.485	5.10	4.729	2.65	3.965	0.17	7.191	2.41	5.539	4.81	6.974	5.79
8	5.769	0.00	6.209	0.00	5.632	0.05	4.618	0.00	7.498	0.06	6.126	0.08	7.082	0.00
9	6.075	0.08	6.925	0.12	5.915	0.07	5.231	0.08	7.744	0.07	6.578	0.05	7.882	0.01
10	6.226	0.00	7.302	0.07	6.830	0.04	7.132	0.12	8.923	0.03	7.421	0.02	8.453	0.10
FP <sub>Total</sub>	66.12		74.41		71.82		65.41		72.70		75.46		71.06	
Error	60.37		52.58		55.99		61.07		55.68		57.91		59.64	

**Tabla B.30 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-9.0)</sub> para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 5 s (continuación)**

	Ventanas (s)													
	105-110		110-115		115-120		120-125		125-130		130-135		135-140	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.006	7.96	2.094	13.57	1.822	10.90	1.921	4.92	1.853	1.70	2.000	4.17	2.201	5.12
2	3.703	2.29	2.373	4.29	2.001	7.39	2.204	7.04	2.042	17.94	2.147	3.36	2.499	3.60
3	4.021	7.00	2.696	4.14	2.275	0.56	2.498	16.83	2.356	10.00	2.378	20.58	3.056	0.58
4	5.897	8.45	3.611	17.94	2.683	1.54	2.789	2.81	2.525	4.51	2.671	0.88	3.335	2.83
5	7.497	10.82	3.645	2.64	3.101	0.25	3.148	1.35	2.942	0.00	3.593	3.89	3.596	2.09
6	8.877	10.82	4.066	1.35	3.259	4.26	3.489	6.74	3.342	0.34	3.802	6.14	5.143	1.14
7	10.11	6.08	5.513	0.00	3.797	0.29	3.736	7.61	3.603	0.61	4.200	6.86	6.140	17.43
8	2.335	0.00	6.288	0.03	3.997	0.06	4.011	0.14	4.367	0.06	4.798	0.00	6.721	0.03
9	2.503	0.04	7.290	0.00	4.387	0.01	4.728	0.00	4.816	0.01	5.057	0.00	7.216	0.08
10	5.220	0.00	7.777	0.09	5.096	0.05	5.027	0.01	5.567	0.01	5.712	0.01	7.447	0.04
FP <sub>Total</sub>	72.51		63.62		53.20		77.37		60.48		65.18		79.61	
Error	53.03		60.97		69.03		55.47		63.41		61.24		46.24	

	Ventanas (s)													
	140-145		145-150		150-155		155-160		160-165		165-170		170-175	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.198	52.98	2.173	1.79	1.873	3.36	2.069	1.43	2.004	10.35	1.990	5.10	2.043	5.49
2	2.501	2.76	2.458	40.75	1.996	4.43	3.536	8.78	3.045	0.21	3.522	9.64	3.157	0.09
3	3.168	0.09	3.018	1.46	3.471	0.33	4.208	10.91	3.714	7.79	3.965	0.18	3.513	20.55
4	3.799	6.49	3.826	8.16	4.491	0.59	4.661	0.78	4.005	3.27	4.011	4.10	3.771	0.39
5	3.783	0.39	3.836	4.45	5.923	6.33	5.513	4.80	4.602	12.24	4.523	6.20	4.424	4.91
6	4.780	0.94	3.978	0.72	7.368	9.28	5.906	4.75	4.880	0.00	4.810	0.00	4.606	6.96
7	6.363	2.39	4.308	0.85	7.987	16.39	6.462	3.14	5.482	6.17	5.455	14.55	4.978	1.81
8	7.178	0.03	4.917	0.04	8.937	0.19	7.646	0.07	6.076	0.16	7.027	0.08	5.374	0.00
9	7.739	0.01	6.200	0.03	2.402	0.02	7.852	0.04	6.420	0.00	7.318	0.06	6.006	0.06
10	7.932	0.04	7.063	0.09			8.003	0.14	7.672	0.04	7.748	0.04	6.087	0.00
FP <sub>Total</sub>	78.73		84.07		60.91		82.67		78.27		71.01		63.45	
Error	48.91		47.78		63.47		45.57		48.31		56.04		61.91	

	Ventanas (s)													
	175-180		180-185		185-190		190-195		195-200		200-205		205-210	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.213	5.06	2.133	7.60	2.005	3.60	1.820	1.80	2.497	1.39	2.128	8.44	2.258	8.27
2	2.498	5.24	2.487	9.54	3.121	0.09	2.035	3.08	3.658	1.59	3.740	5.19	3.234	2.25
3	3.155	4.89	3.422	10.88	3.829	0.92	2.286	12.44	4.364	5.51	4.653	7.15	3.764	1.20
4	3.461	10.35	3.702	4.12	4.949	1.16	3.456	3.72	5.782	8.29	4.954	1.15	3.801	8.19
5	3.900	6.59	3.992	4.33	5.952	5.77	3.822	4.83	5.949	0.00	5.440	4.00	4.640	0.17
6	4.122	23.48	4.420	0.01	6.497	0.00	4.501	4.08	6.117	6.23	6.122	6.33	4.979	0.00
7	4.803	3.83	4.793	0.00	7.064	1.94	4.846	2.86	6.551	3.46	7.314	5.52	5.597	0.00
8	5.166	0.04	5.049	0.05	7.634	0.03	5.249	0.05	6.593	0.04	7.632	0.12	6.604	0.10
9	5.496	0.04	5.733	0.04	7.836	0.38	6.126	0.12	6.777	0.21	8.000	0.03	6.629	0.00
10	5.871	0.00	6.630	0.03	8.140	0.00	6.431	0.03	6.832	0.00	8.559	0.09	7.079	0.06
FP <sub>Total</sub>	73.02		60.82		71.10		76.19		70.55		74.29		53.68	
Error	56.68		64.39		53.71		58.42		54.93		53.85		68.44	

**Tabla B.31 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo  $1D_T-CAB_{F(1.8-3.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**

	Ventanas (s)													
	0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.068	4.57	1.843	25.10	2.024	1.40	1.737	8.95	1.942	2.25	1.987	2.45	1.897	2.01
2	2.272	24.15	1.931	4.24	2.105	11.96	1.900	2.62	2.248	43.39	2.129	15.68	2.019	24.95
3	2.418	15.45	2.000	4.60	2.255	45.22	2.019	1.82	2.298	1.95	2.241	7.52	2.100	2.26
4	2.503	17.87	2.100	2.33	2.394	3.00	2.219	68.89	2.346	1.20	2.324	16.64	2.273	19.27
5	2.600	9.32	2.200	8.98	2.498	3.76	2.303	3.23	2.606	33.44	2.433	25.18	2.421	12.57
6	2.700	3.02	2.298	2.31	2.593	3.16	2.426	1.54	2.751	10.51	2.590	10.61	2.643	4.56
7	2.800	3.83	2.400	8.67	2.925	13.26	2.821	2.33	2.910	3.15	2.737	11.58	2.836	3.94
8	2.900	0.01	2.495	0.07	2.765	0.02	3.235	0.01			2.928	0.06	3.009	0.22
9			2.562	0.03									2.253	0.01
10			2.800	0.05										
<b>FP<sub>Total</sub></b>	79.49		70.55		83.47		90.87		95.89		95.47		92.45	
<b>Error</b>	44.22		49.13		32.32		29.10		20.42		19.46		27.44	

	Ventanas (s)													
	70-80		80-90		90-100		100-110		110-120		120-130		130-140	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	1.804	1.20	1.916	8.42	1.764	1.79	2.051	11.02	1.996	3.66	1.837	3.45	1.900	5.15
2	1.998	1.43	2.097	15.14	1.939	1.94	2.316	56.14	2.109	1.65	1.920	1.76	2.095	25.34
3	2.075	16.04	2.210	11.14	2.013	10.50	2.517	15.93	2.235	22.50	2.063	4.29	2.202	3.35
4	2.223	17.89	2.353	29.95	2.198	24.01	2.610	1.61	2.389	18.99	2.172	25.20	2.300	1.62
5	2.375	23.88	2.409	1.28	2.374	20.79	2.978	5.50	2.466	1.09	2.197	13.65	2.452	10.63
6	2.642	17.11	2.530	2.45	2.518	9.37	2.764	1.72	2.733	12.74	2.299	1.07	2.503	1.62
7	2.818	5.12	2.610	9.83	2.705	13.37			2.856	26.60	2.402	2.99	2.597	4.72
8	3.011	0.10	2.790	0.06	2.835	0.03			2.922	0.02	2.813	0.39	2.701	0.02
9	3.000	0.01	2.893	0.03	2.920	0.06			3.004	0.01	3.028	0.03	2.817	0.05
10			3.110	0.04	2.996	0.01					2.631	0.01	3.021	0.28
<b>FP<sub>Total</sub></b>	93.85		91.63		91.68		91.92		89.93		95.92		87.24	
<b>Error</b>	29.13		28.67		29.16		28.04		31.38		23.41		32.99	

	Ventanas (s)													
	150-160		160-170		170-180		180-190		190-200		200-210		210-220	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	1.984	4.26	1.701	2.90	2.097	24.21	1.902	6.92	1.850	2.02	1.871	4.69	1.901	1.54
2	2.153	34.90	1.849	5.51	2.277	4.50	2.193	2.10	2.002	2.83	2.003	7.59	2.045	17.82
3	2.201	1.17	2.000	13.08	2.407	8.26	2.324	25.28	2.101	5.81	2.120	2.09	2.100	7.09
4	2.298	6.21	2.098	1.95	2.795	10.06	2.429	2.47	2.200	1.52	2.234	32.57	2.239	1.64
5	2.426	14.53	2.201	3.52	3.028	42.47	2.606	7.03	2.310	3.88	2.301	2.51	2.341	6.15
6	2.507	8.92	2.301	4.29	3.206	4.47	2.679	4.37	2.419	25.91	2.418	8.26	2.400	1.06
7	2.818	3.21	2.400	5.61	2.990	1.65	2.816	2.22	2.517	19.85	2.560	10.32	2.546	13.43
8	3.017	0.14	2.503	0.04			2.910	0.05	2.642	0.02	2.634	0.07	2.603	0.02
9			2.584	0.04			3.116	0.40	2.810	0.03	2.704	0.06	2.884	0.22
10			2.701	0.10			2.546	0.01	3.087	0.20	3.057	0.07	3.001	0.06
<b>FP<sub>Total</sub></b>	86.92		81.62		95.62		96.51		86.67		87.65		93.08	
<b>Error</b>	31.68		42.82		21.42		25.81		36.01		33.38		27.42	

**Tabla B.32 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**

	Ventanas (s)													
	0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.000	0.00	2.158	20.51	2.005	0.05	1.778	22.79	1.876	7.33	1.850	0.86	1.863	18.23
2	2.251	22.74	2.200	0.00	2.103	1.28	2.041	2.96	2.008	1.36	1.980	10.68	1.883	20.27
3	2.565	0.89	2.300	0.00	2.193	1.85	2.148	42.90	2.137	2.04	2.143	13.48	1.973	3.38
4	2.730	0.00	2.000	0.00	2.270	42.31	2.258	19.92	2.233	12.42	2.321	14.33	2.101	9.85
5	2.900	0.00			2.445	0.84	2.386	0.43	2.466	0.15	2.444	20.99	2.229	1.24
6	3.000	0.00			2.548	1.77	2.819	4.54	2.587	50.13	2.561	10.45	2.448	7.08
7	3.100	0.00			2.637	0.41	2.960	0.53	2.703	0.01	2.573	3.38	2.603	0.00
8					2.936	0.10			2.857	0.02	2.658	0.04	2.898	0.00
9					3.339	0.00			3.114	0.01	2.756	0.06	3.031	0.14
10											2.925	0.05	2.641	0.02
FP <sub>Total</sub>	23.64		20.51		58.64		94.06		76.28		89.77		76.65	
Error	84.55		87.90		55.36		24.44		48.72		30.11		45.72	

	Ventanas (s)													
	70-80		80-90		90-100		100-110		110-120		120-130		130-140	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	1.904	11.69	1.764	0.15	1.778	1.73	1.859	0.01	1.802	0.00	1.910	23.41	1.856	0.01
2	2.021	0.42	1.894	24.60	1.887	1.84	2.034	1.26	1.885	0.00	1.999	0.00	1.923	10.04
3	2.082	14.63	2.099	9.39	2.001	10.99	2.046	10.55	2.075	13.80	2.128	1.94	2.087	9.90
4	2.214	8.74	2.216	10.00	2.074	14.11	2.131	1.71	2.206	0.00	2.215	0.45	2.336	0.27
5	2.304	0.00	2.308	0.10	2.114	1.71	2.206	0.21	2.388	27.81	2.252	11.53	2.427	0.02
6	2.386	16.29	2.372	6.51	2.245	2.32	2.306	39.84	2.530	0.00	2.367	0.00	2.507	4.74
7	2.615	8.35	2.521	0.13	2.345	14.67	2.466	11.93	2.654	0.50	2.485	0.71	2.597	2.29
8	2.822	0.06	2.619	0.07	2.558	0.11	2.567	0.01	2.741	0.15	2.817	0.27	2.887	0.00
9	3.029	0.07	3.140	0.05	2.859	0.08	2.983	0.05	3.004	0.00	3.061	0.02	3.077	0.26
10	2.416	0.04	2.956	0.00	2.397	0.00	2.798	0.02	2.412	0.01	2.725	0.00	2.205	0.00
FP <sub>Total</sub>	76.81		63.10		66.37		73.79		58.22		66.79		53.25	
Error	38.30		54.95		47.91		36.51		64.31		47.62		55.42	

	Ventanas (s)													
	150-160		160-170		170-180		180-190		190-200		200-210		210-220	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	1.753	5.48	1.792	0.00	1.820	4.28	1.890	1.32	1.859	4.05	1.805	0.00	1.884	0.00
2	2.146	12.58	1.891	0.06	1.981	0.00	2.185	6.90	2.000	0.00	1.885	9.57	2.029	12.15
3	2.227	14.99	2.012	0.03	2.072	21.33	2.318	0.13	2.104	3.67	2.048	6.33	2.153	15.21
4	2.541	0.23	2.098	0.01	2.217	0.01	2.666	1.05	2.164	17.16	2.245	19.00	2.298	0.85
5	2.696	0.00	2.309	0.00	2.301	0.08	3.136	33.71	2.361	21.02	2.389	0.36	2.545	8.96
6	2.000	0.00	2.443	0.26	2.813	12.47	2.887	1.87	2.590	12.01	2.601	0.00	3.042	17.68
7			2.725	0.17	2.890	1.02			3.066	15.80	3.098	5.82	3.164	2.25
8			2.966	0.05	3.034	0.35			3.094	0.01	2.691	0.02	2.402	0.00
9					3.179	0.02								
10														
FP <sub>Total</sub>	33.29		5.56		76.56		44.97		74.22		43.35		57.10	
Error	80.30		93.49		43.81		65.70		40.65		64.40		62.83	

**Tabla B.33 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo  $1D_L-CAB_{F(1.8-3.0)}$  para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**

	Ventanas (s)													
	0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	1.701	1.85	1.700	3.06	1.803	3.73	2.134	80.07	1.999	23.31	2.143	29.21	1.854	26.44
2	1.900	3.95	1.800	3.56	2.047	34.15	1.875	3.56	2.217	11.92	2.386	4.36	1.971	10.84
3	2.145	19.30	1.900	20.23	2.127	11.75	2.380	7.22	2.458	12.40	1.863	10.64	2.222	11.91
4	2.200	2.66	1.942	7.26	2.206	12.98	2.052	2.17	2.710	23.04	2.020	6.99	2.450	30.55
5	2.301	4.25	2.100	2.15	2.436	12.06	2.513	1.61	2.551	2.84	2.565	15.84	2.608	5.39
6	2.400	2.79	2.200	4.59	2.524	1.59	2.640	1.01	1.822	2.73	2.639	9.22	2.897	5.81
7	2.587	8.76	2.300	4.80	2.603	3.98	2.730	1.40	2.086	1.22	2.906	7.08		
8	2.703	0.04	2.700	0.03	2.680	0.01	2.957	0.01	2.833	0.13	2.495	0.11		
9	2.800	0.08	2.800	0.03										
10	2.857	0.07												
<b>FP<sub>Total</sub></b>	62.65		51.70		81.65		98.37		90.89		93.93		90.95	
<b>Error</b>	58.50		66.91		32.67		13.88		33.75		25.15		31.22	

	Ventanas (s)													
	70-80		80-90		90-100		100-110		110-120		120-130		130-140	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.033	47.70	2.084	49.21	2.090	31.82	1.817	1.32	2.072	42.86	1.913	20.75	1.841	8.31
2	1.894	8.17	1.760	3.53	1.818	5.52	1.910	11.11	1.868	13.50	2.006	2.35	1.978	1.06
3	2.208	11.59	1.913	7.93	2.216	22.38	2.046	19.26	2.151	6.60	2.115	22.84	2.179	10.61
4	2.309	8.49	2.224	17.39	2.306	4.40	2.112	10.48	2.373	10.89	2.273	7.55	2.337	45.64
5	2.412	10.52	2.351	9.09	2.580	20.74	2.306	24.57	2.468	1.05	2.478	28.18	2.485	10.78
6	2.633	8.45	2.505	3.63	2.703	2.39	2.571	11.66	2.717	12.63	2.561	1.26	2.780	2.55
7	2.796	2.46	2.638	2.31	2.177	2.35	2.700	1.65			2.651	1.96	2.550	1.09
8	3.019	0.02	2.832	0.01	2.790	0.01	3.068	0.07			2.827	0.06	2.808	0.04
9													2.901	0.01
10														
<b>FP<sub>Total</sub></b>	99.11		94.29		90.43		87.33		87.54		91.17		85.52	
<b>Error</b>	22.57		25.43		27.20		36.00		35.40		28.49		37.29	

	Ventanas (s)													
	150-160		160-170		170-180		180-190		190-200		200-210		210-220	
	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$	$f_{ci}$	$FP_i$
1	2.246	84.34	1.800	5.43	1.802	1.50	2.213	40.80	1.876	3.19	1.800	4.65	1.911	8.89
2	1.803	2.27	1.899	11.45	1.902	1.08	1.832	10.05	2.000	3.04	2.060	12.43	2.156	38.74
3	2.401	3.17	2.005	15.65	2.055	60.78	2.064	13.74	2.119	6.43	2.230	15.20	2.201	3.35
4	2.525	7.43	2.091	23.09	2.160	9.95	2.307	10.48	2.180	72.09	2.319	1.21	2.325	15.43
5	2.959	0.95	2.197	8.51	2.313	17.66	2.401	3.81	2.385	1.98	2.387	44.70	2.533	18.09
6			2.325	12.33	2.688	1.71	2.515	4.60	2.563	2.51	2.509	1.46	2.641	3.48
7			2.518	4.53	2.920	1.33	2.673	6.23	2.957	3.36	2.616	9.82	2.731	3.11
8			2.401	0.01			2.896	0.02			2.714	0.04	2.592	0.02
9			2.739	0.07			3.254	0.03			2.853	0.01		
10			2.739	0.02										
<b>FP<sub>Total</sub></b>	98.16		91.13		94.01		94.61		92.61		94.45		92.67	
<b>Error</b>	14.68		31.27		24.48		26.49		24.27		27.16		27.44	

**Tabla B.34 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-011 en un análisis con ventanas de 10 s**

	Ventanas (s)													
	0-10		10-20		20-30		30-40		40-50		50-60		60-70	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	2.000	11.46	2.158	2.54	2.005	34.81	1.778	0.32	1.876	0.00	1.850	11.92	1.863	6.97
2	2.251	10.83	2.200	16.44	2.103	9.30	2.041	4.98	2.008	22.50	1.980	19.45	1.883	36.98
3	2.565	22.80	2.300	4.15	2.193	18.73	2.148	73.81	2.137	0.79	2.143	19.08	1.973	5.07
4	2.730	8.42	2.000	3.87	2.270	1.21	2.258	0.22	2.233	10.22	2.321	7.62	2.101	0.04
5	2.900	5.36			2.445	15.62	2.386	7.17	2.466	11.93	2.444	2.55	2.229	10.41
6	3.000	10.51			2.548	3.67	2.819	1.26	2.587	0.01	2.561	4.81	2.448	25.10
7	3.100	1.85			2.637	2.69	2.960	0.67	2.703	15.56	2.573	12.15	2.603	4.67
8					2.936	0.01			2.857	0.19	2.658	0.04	2.898	0.05
9					3.339	0.03			3.114	0.01	2.756	0.02	3.031	0.00
10											2.925	0.03	2.641	0.00
FP <sub>Total</sub>	71.25		27.00		90.07		88.43		80.46		85.51		94.14	
Error	60.22		84.28		37.80		34.07		45.19		32.66		30.58	

	Ventanas (s)													
	70-80		80-90		90-100		100-110		110-120		120-130		130-140	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	1.904	21.55	1.764	8.32	1.778	3.45	1.859	6.80	1.802	8.20	1.910	26.58	1.856	16.38
2	2.021	34.34	1.894	0.00	1.887	1.96	2.034	24.76	1.885	9.40	1.999	6.18	1.923	2.17
3	2.082	2.91	2.099	40.79	2.001	5.23	2.046	1.30	2.075	39.94	2.128	24.94	2.087	7.73
4	2.214	8.89	2.216	13.19	2.074	29.93	2.131	12.08	2.206	10.05	2.215	3.18	2.336	49.98
5	2.304	10.23	2.308	7.24	2.114	3.23	2.206	9.89	2.388	6.12	2.252	5.04	2.427	5.56
6	2.386	6.95	2.372	5.14	2.245	19.14	2.306	26.63	2.530	3.94	2.367	3.46	2.507	2.67
7	2.615	3.33	2.521	4.14	2.345	3.22	2.466	8.00	2.654	3.79	2.485	19.64	2.597	3.45
8	2.822	0.05	2.619	0.01	2.558	0.19	2.567	0.11	2.741	0.07	2.817	0.06	2.887	0.05
9	3.029	0.00	3.140	0.00	2.859	0.00	2.983	0.00	3.004	0.04	3.061	0.03	3.077	0.00
10	2.416	0.05	2.956	0.03	2.397	0.08	2.798	0.00	2.412	0.02	2.725	0.03	2.205	0.08
FP <sub>Total</sub>	97.92		83.12		93.24		99.00		93.61		99.00		99.00	
Error	34.25		47.02		38.21		40.70		27.88		28.55		36.97	

	Ventanas (s)													
	150-160		160-170		170-180		180-190		190-200		200-210		210-220	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>												
1	1.753	2.51	1.792	10.58	1.820	0.00	1.890	21.89	1.859	2.03	1.805	7.22	1.884	10.37
2	2.146	0.96	1.891	19.84	1.981	6.77	2.185	34.58	2.000	3.93	1.885	10.13	2.029	0.01
3	2.227	66.18	2.012	15.95	2.072	56.31	2.318	11.57	2.104	7.23	2.048	12.03	2.153	37.73
4	2.541	9.32	2.098	11.40	2.217	17.58	2.666	8.98	2.164	71.25	2.245	19.67	2.298	17.13
5	2.696	4.82	2.309	11.62	2.301	7.62	3.136	2.32	2.361	1.56	2.389	42.57	2.545	15.73
6	2.000	2.19	2.443	3.79	2.813	0.05	2.887	3.28	2.590	1.24	2.601	7.22	3.042	1.21
7			2.725	7.72	2.890	0.94			3.066	2.22	3.098	0.57	3.164	1.70
8			2.966	0.02	3.034	0.00			3.094	0.05	2.691	0.07	2.402	0.05
9					3.179	0.03								
10														
FP <sub>Total</sub>	85.98		82.40		92.60		82.62		94.10		99.00		88.40	
Error	35.53		45.26		31.86		49.02		32.80		39.56		37.15	

**Tabla B.35 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-021 en un análisis con ventanas de 5 s**

	Ventanas (s)											
	15-20		20-25		25-30		30-35		35-40		40-45	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>										
1	2.000	0.00	2.202	0.69	1.982	3.99	1.801	0.00	1.980	4.66	2.139	36.54
2	2.164	0.08	2.378	15.42	2.149	25.91	1.855	8.82	2.152	0.40	2.333	17.05
3	2.400	0.00	2.438	20.69	2.259	10.86	2.012	0.44	2.284	22.66	2.842	37.51
4	2.599	0.00	2.723	7.58	2.463	28.81	2.129	18.33	2.415	9.27	3.096	0.96
5	2.799	0.00	2.023	0.04	3.074	21.20	2.321	28.03	2.583	19.82	2.522	1.18
6	2.851	0.00			2.447	0.92	2.428	29.94	1.894	19.86		
7							2.613	0.62				
8							2.810	0.00				
9							3.085	0.00				
10												
FP <sub>Total</sub>	0.09		44.42		91.68		86.33		76.67		93.24	
Error	98.72		72.57		26.80		32.96		43.54		25.94	

	Ventanas (s)											
	45-50		50-55		55-60		60-65		65-70		70-75	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>										
1	1.783	1.70	1.860	7.53	1.699	5.30	2.664	2.15	2.064	1.67	1.850	8.28
2	2.131	65.28	2.159	6.41	1.929	8.79	2.051	57.99	2.309	0.24	2.119	4.24
3	2.316	0.01	2.359	54.82	2.058	0.20	1.803	28.52	2.384	32.24	2.145	36.28
4	2.593	23.28	2.580	8.19	2.324	44.33			2.566	41.30	2.364	8.67
5	2.804	0.01	2.602	0.01	2.408	6.39			2.629	0.31	2.751	29.75
6	2.601	0.00	3.044	13.97	2.573	13.46			2.939	0.94	2.454	0.00
7			2.700	0.00	3.151	3.99			3.117	11.15		
8					2.150	0.00			2.850	0.00		
9												
10												
FP <sub>Total</sub>	90.28		90.94		82.47		88.65		87.85		87.21	
Error	29.99		24.94		28.31		36.82		34.43		36.25	

	Ventanas (s)									
	75-80		80-85		85-90		90-95		95-100	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>								
1	1.865	12.87	2.148	1.06	2.196	2.47	2.491	26.70	2.059	35.86
2	2.158	22.79	1.800	19.71	2.563	24.82	2.011	51.78	2.250	0.00
3	2.200	0.00	2.050	10.93	1.945	29.80	2.200	4.96	2.401	0.00
4	2.418	6.94	2.264	22.22	2.347	5.96	2.394	10.94	2.525	34.14
5	2.566	2.15	2.729	24.07	2.100	3.54			2.807	12.74
6	2.745	1.88	2.936	6.55	2.601	10.14			2.164	4.89
7	3.040	27.65	1.900	7.52	2.700	0.00				
8	2.630	0.01			2.983	0.08				
9										
10										
FP <sub>Total</sub>	75.23		92.07		84.76		94.38		87.63	
Error	35.51		37.98		34.66		24.11		34.85	

**Tabla B.36 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-021 en un análisis con ventanas de 5 s**

	Ventanas (s)											
	15-20		20-25		25-30		30-35		35-40		40-45	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>										
1	2.000	22.79	2.202	60.10	1.982	0.23	1.801	10.96	1.980	4.08	2.139	0.72
2	2.164	6.41	2.378	21.56	2.149	64.96	1.855	0.50	2.152	28.56	2.333	81.36
3	2.400	7.86	2.438	1.07	2.259	0.84	2.012	14.31	2.284	1.27	2.842	0.79
4	2.599	11.99	2.723	3.03	2.463	29.01	2.129	3.46	2.415	59.49	3.096	3.36
5	2.799	11.26	2.023	10.27	3.074	0.31	2.321	52.69	2.583	1.47	2.522	4.94
6	2.851	0.68			2.447	0.74	2.428	1.68	1.894	0.01		
7							2.613	4.81				
8							2.810	0.04				
9							3.085	0.03				
10												
FP <sub>Total</sub>	61.00		96.03		96.10		94.95		94.87		91.17	
Error	69.11		29.18		21.42		21.35		29.79		29.74	

	Ventanas (s)											
	45-50		50-55		55-60		60-65		65-70		70-75	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>										
1	1.783	22.78	1.860	2.26	1.699	1.42	2.664	10.31	2.064	8.93	1.850	0.00
2	2.131	0.13	2.159	23.18	1.929	7.24	2.051	83.17	2.309	2.68	2.119	65.02
3	2.316	35.99	2.359	43.08	2.058	29.40	1.803	2.50	2.384	19.05	2.145	0.01
4	2.593	4.36	2.580	2.52	2.324	19.56			2.566	51.08	2.364	0.00
5	2.804	20.21	2.602	16.48	2.408	25.80			2.629	4.22	2.751	0.71
6	2.601	8.67	3.044	2.13	2.573	8.32			2.939	3.13	2.454	30.16
7			2.700	1.40	3.151	0.40			3.117	5.37		
8					2.150	0.03			2.850	0.00		
9												
10												
FP <sub>Total</sub>	92.12		91.06		94.69		95.98		94.94		95.91	
Error	34.76		37.33		38.31		27.02		23.46		31.91	

	Ventanas (s)									
	75-80		80-85		85-90		90-95		95-100	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>								
1	1.865	0.15	2.148	87.78	2.196	29.80	2.491	85.99	2.059	19.88
2	2.158	4.10	1.800	0.00	2.563	33.12	2.011	2.80	2.250	27.68
3	2.200	18.56	2.050	0.00	1.945	10.94	2.200	0.00	2.401	12.98
4	2.418	56.23	2.264	0.06	2.347	6.14	2.394	2.56	2.525	15.10
5	2.566	7.63	2.729	4.20	2.100	0.00			2.807	5.13
6	2.745	8.91	2.936	0.34	2.601	0.00			2.164	6.93
7	3.040	0.14	1.900	0.00	2.700	9.10				
8	2.630	0.00			2.983	0.04				
9										
10										
FP <sub>Total</sub>	95.72		92.38		93.30		91.35		87.70	
Error	33.69		20.07		26.47		29.47		38.80	

**Tabla B.37 - Parámetros de cabeceo en T estimados con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-022 en un análisis con ventanas de 5 s**

	Ventanas (s)											
	20-25		25-30		30-35		35-40		40-45		45-50	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>										
1	1.817	0.79	1.789	19.23	1.828	21.73	1.835	2.31	1.684	13.97	1.724	12.72
2	1.969	4.22	2.195	1.76	2.170	46.00	1.914	76.93	2.171	15.74	1.962	46.72
3	2.000	0.00	2.322	9.53	2.431	6.24	2.243	0.12	2.123	23.40	2.174	8.20
4	2.201	0.00	2.921	8.08	2.825	4.66	2.785	0.33	2.504	0.19	2.243	2.38
5	2.389	0.33	3.046	2.86	3.148	14.28	2.393	3.90	2.768	24.84	2.601	0.14
6	2.245	0.43			2.006	0.30			2.963	4.40	2.732	7.72
7											3.321	1.61
8											2.466	0.09
9												
10												
<b>FP<sub>Total</sub></b>	5.77		41.46		93.20		83.60		82.54		88.64	
<b>Error</b>	92.51		66.96		22.65		36.73		37.99		18.42	

	Ventanas (s)											
	50-55		55-60		60-65		65-70		70-75		75-80	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>										
1	1.832	10.08	1.701	0.00	1.750	5.85	2.013	28.54	2.368	12.47	2.199	0.00
2	2.139	0.31	2.063	12.94	2.002	50.95	2.183	0.98	2.540	32.92	2.409	2.06
3	2.460	56.70	2.100	0.00	2.075	0.07	2.521	0.01	2.847	11.15	2.591	6.35
4	2.536	0.01	2.249	4.95	2.375	0.55	2.793	0.10	2.218	15.76	2.840	53.52
5	3.069	4.80	2.630	0.23	2.478	2.22	3.024	26.87			1.980	13.31
6			2.696	48.78	2.812	3.41	1.775	7.00				
7			2.917	0.69	2.988	15.69						
8			3.300	0.00	3.008	0.01						
9			3.032	0.02	1.839	0.00						
10												
<b>FP<sub>Total</sub></b>	71.89		69.73		79.65		63.50		72.30		75.24	
<b>Error</b>	44.57		49.53		30.27		49.00		41.08		44.68	

	Ventanas (s)									
	80-85		85-90		90-95		95-100		100-105	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>								
1	2.200	0.00	1.858	67.87	1.768	0.01	2.160	26.86	2.000	0.00
2	2.178	23.93	2.097	0.00	2.037	30.44	2.164	10.97	2.215	33.22
3	2.429	47.44	2.200	0.00	2.312	20.87	2.431	9.76	2.267	25.46
4	2.683	0.13	2.400	0.00	2.315	0.00	2.500	0.00	2.538	7.34
5	3.052	16.82	2.899	0.11	2.597	12.72	2.789	8.66	2.786	5.43
6	1.808	4.04	3.000	0.00	2.703	12.33	3.088	17.33	1.993	5.87
7			3.129	15.70	2.726	0.10	2.600	0.00		
8			1.305	0.00						
9										
10										
<b>FP<sub>Total</sub></b>	92.36		84.03		76.47		73.59		77.33	
<b>Error</b>	27.50		34.93		44.48		40.33		43.91	

**Tabla B.38 - Parámetros de cabeceo en L estimados con el modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> para el evento SI-022 en un análisis con ventanas de 5 s**

	Ventanas (s)											
	20-25		25-30		30-35		35-40		40-45		45-50	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>										
1	1.817	15.32	1.789	25.53	1.828	1.93	1.835	14.46	1.684	17.02	1.724	1.34
2	1.969	0.59	2.195	48.93	2.170	91.28	1.914	36.96	2.171	36.96	1.962	8.49
3	2.000	20.52	2.322	6.98	2.431	3.20	2.243	14.73	2.123	8.43	2.174	2.51
4	2.201	28.27	2.921	6.75	2.825	0.66	2.785	24.16	2.504	20.18	2.243	70.95
5	2.389	24.98	3.046	7.32	3.148	0.00	2.393	3.86	2.768	2.58	2.601	6.94
6	2.245	4.57			2.006	1.88			2.963	6.31	2.732	5.69
7											3.321	0.56
8											2.466	0.02
9												
10												
FP <sub>Total</sub>	94.24		95.51		98.96		94.17		91.47		98.73	
Error	51.11		50.51		13.62		36.59		33.02		34.95	

	Ventanas (s)											
	50-55		55-60		60-65		65-70		70-75		75-80	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>										
1	1.832	8.06	1.701	8.50	1.750	1.18	2.013	3.26	2.368	36.11	2.199	37.61
2	2.139	38.19	2.063	14.51	2.002	0.00	2.183	38.99	2.540	36.57	2.409	45.17
3	2.460	0.59	2.100	10.84	2.075	53.36	2.521	34.89	2.847	7.83	2.591	2.79
4	2.536	47.57	2.249	7.51	2.375	29.61	2.793	16.95	2.218	16.05	2.840	5.67
5	3.069	0.12	2.630	8.41	2.478	1.27	3.024	2.73			1.980	4.61
6			2.696	0.95	2.812	1.39	1.775	0.06				
7			2.917	37.19	2.988	0.85						
8			3.300	0.05	3.008	0.06						
9			3.032	0.05	1.839	0.04						
10												
FP <sub>Total</sub>	94.53		97.93		97.52		96.87		96.55		95.85	
Error	44.51		43.77		27.30		34.21		46.68		31.89	

	Ventanas (s)									
	80-85		85-90		90-95		95-100		100-105	
	f <sub>ci</sub>	FP <sub>i</sub>								
1	2.200	6.01	1.858	6.06	1.768	17.42	2.160	39.23	2.000	8.34
2	2.178	12.88	2.097	3.58	2.037	8.54	2.164	26.78	2.215	56.67
3	2.429	43.28	2.200	7.85	2.312	0.01	2.431	0.39	2.267	10.99
4	2.683	24.06	2.400	4.04	2.315	4.11	2.500	10.77	2.538	0.01
5	3.052	1.09	2.899	6.97	2.597	44.70	2.789	7.28	2.786	12.77
6	1.808	4.83	3.000	47.40	2.703	12.04	3.088	4.02	1.993	1.40
7			3.129	8.01	2.726	2.32	2.600	3.54		
8			1.305	0.15						
9										
10										
FP <sub>Total</sub>	92.15		98.58		89.15		92.00		90.18	
Error	28.90		33.71		43.34		39.30		35.74	

APÉNDICE C

COMPARACIÓN DE SEÑALES MEDIDAS Y CALCULADAS  
CON EL MÉTODO PARAMÉTRICO MODAL

Se hace una comparación entre las historias de aceleración calculadas con los modelos utilizados en la técnica de identificación paramétrica modal (programa MIMO) y las señales obtenidas experimentalmente con la red de instrumentación.

Con la finalidad de que el ajuste sea apreciado más claramente, para cada uno de los modelos utilizados se seleccionaron dos ventanas representativas de la estimación. En todos los casos, la primera ventana (izquierda) corresponde a la fase intensa del evento, en la que generalmente se obtuvieron errores más altos, mientras que la segunda ventana (centro) corresponde a un tramo de vibración libre del sistema, o simplemente posterior a la fase intensa del evento, en las que se habitualmente se observaron índices de error más bajos.

El porcentaje de error relativo a la componente de movimiento de cada una de las ventanas comparadas se incluye en el respectivo recuadro. Este valor corresponde al calculado con la siguiente expresión.

$$E_i = \sqrt{\frac{\sum_s (a_{oi}(s\Delta t) - a_i(s\Delta t))^2}{\sum_s (a_{oi}(s\Delta t))^2}}$$

Adicionalmente, como uno de los principales intereses fue la estimación de las frecuencias de los diferentes componentes de movimiento del sistema, se incluye una comparación entre los espectros de amplitudes de Fourier de las señales completas medida y estimada (derecha). Donde se puede observar que en algunos casos, aun cuando los índices de error en las ventanas seleccionadas son altos, el ajuste global de las señales en términos del contenido de frecuencias indica que la estimación de las frecuencias fue adecuada.

Para todos los casos, se presenta en línea continua la respuesta medida experimentalmente y en línea punteada la calculada con la técnica paramétrica modal.

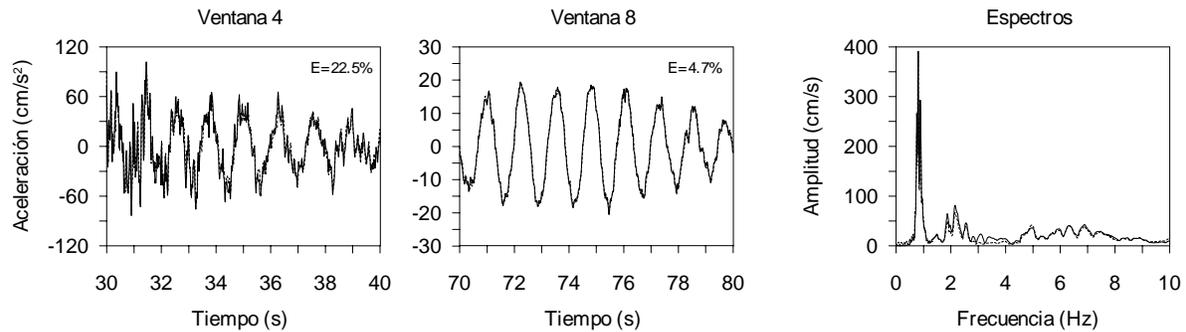
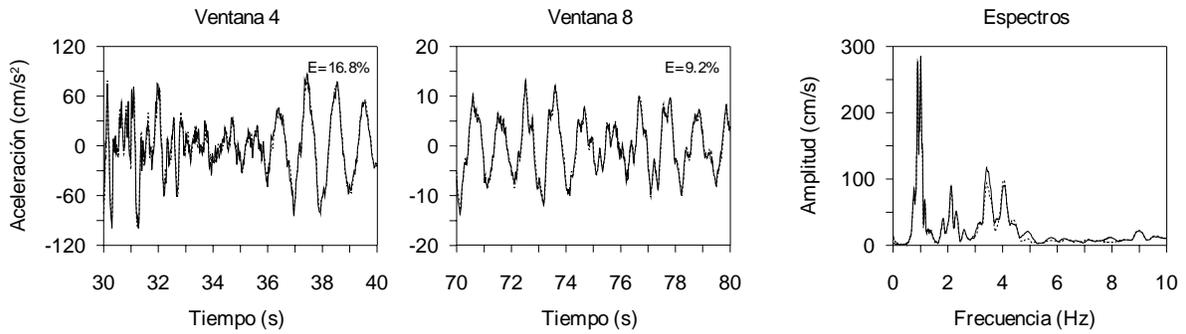
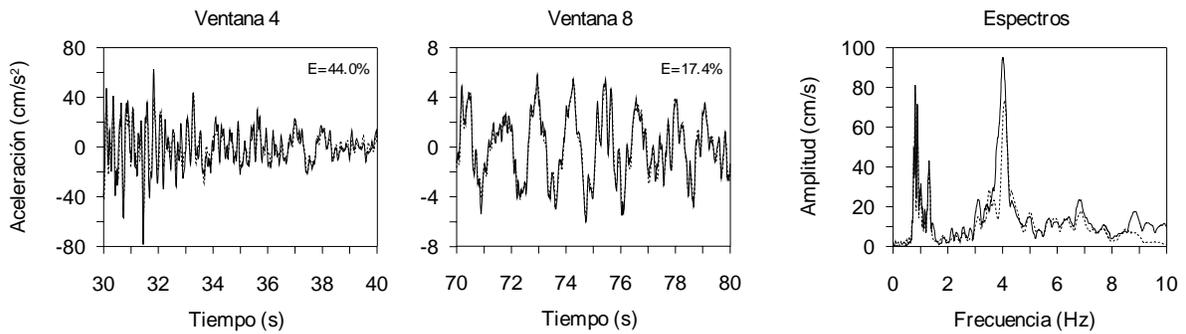


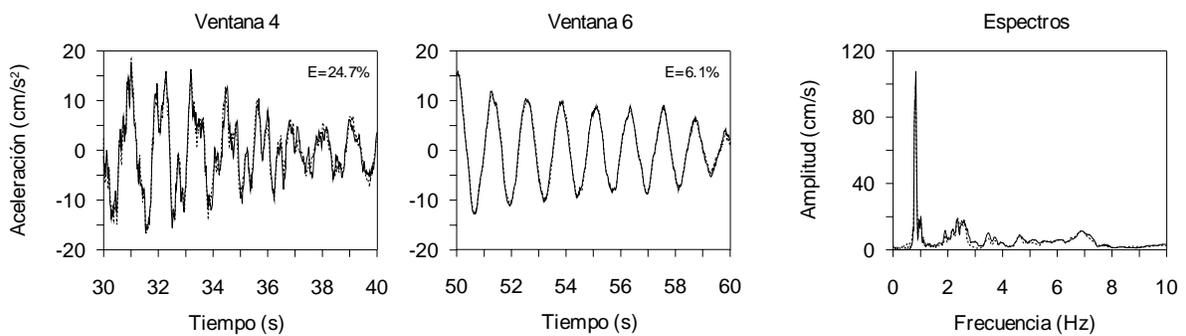
Fig C.1 - Ajuste del modelo 3D-SIST en el componente T para el evento SI-011



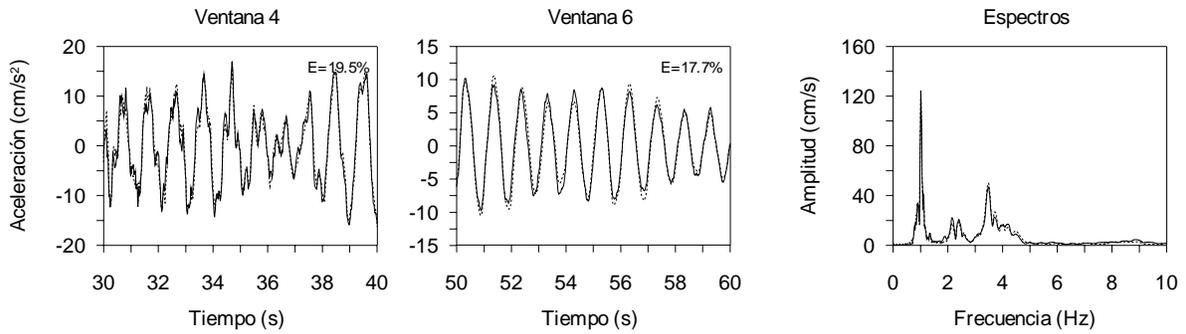
**Fig C.2 - Ajuste del modelo 3D-SIST en el componente L para el evento SI-011**



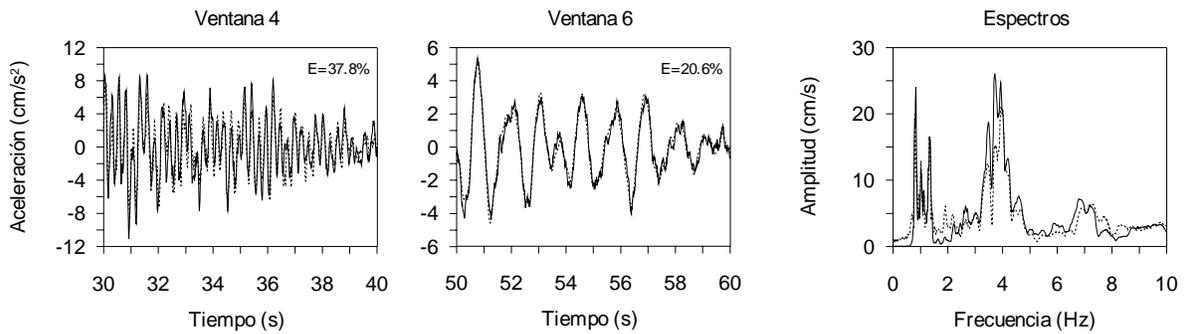
**Fig C.3 - Ajuste del modelo 3D-SIST en torsión para el evento SI-011**



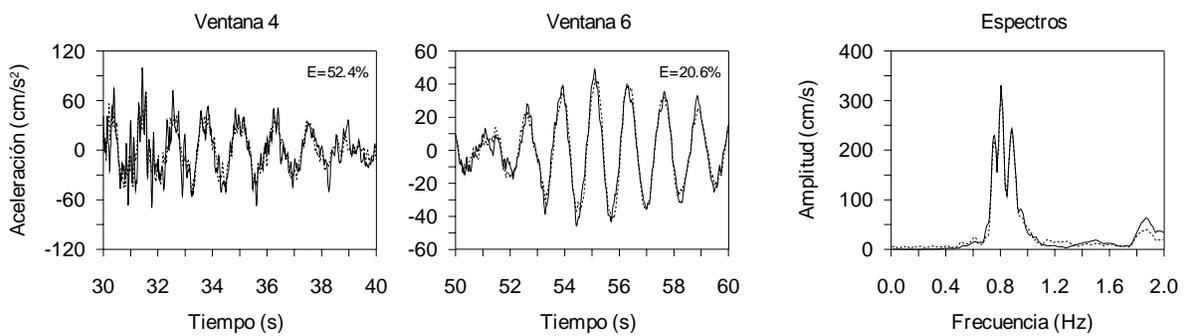
**Fig C.4 - Ajuste del modelo 3D-SIST en el componente T para el evento SI-021**



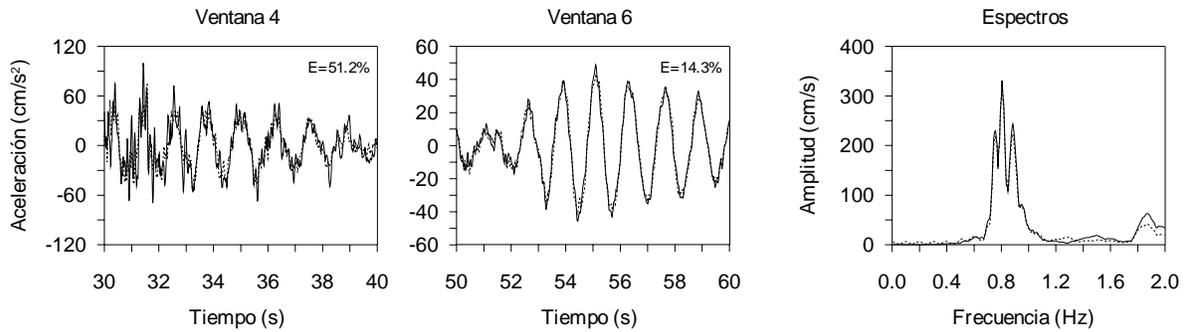
**Fig C.5 - Ajuste del modelo 3D-SIST en el componente L para el evento SI-021**



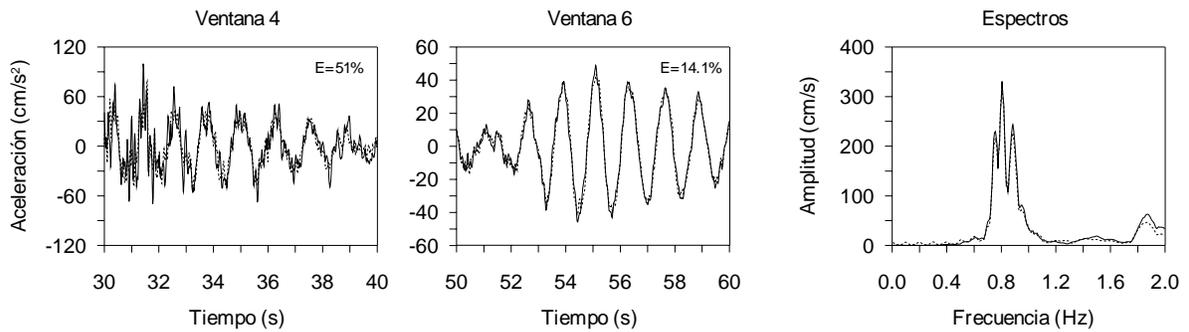
**Fig C.6 - Ajuste del modelo 3D-SIST en torsión para el evento SI-021**



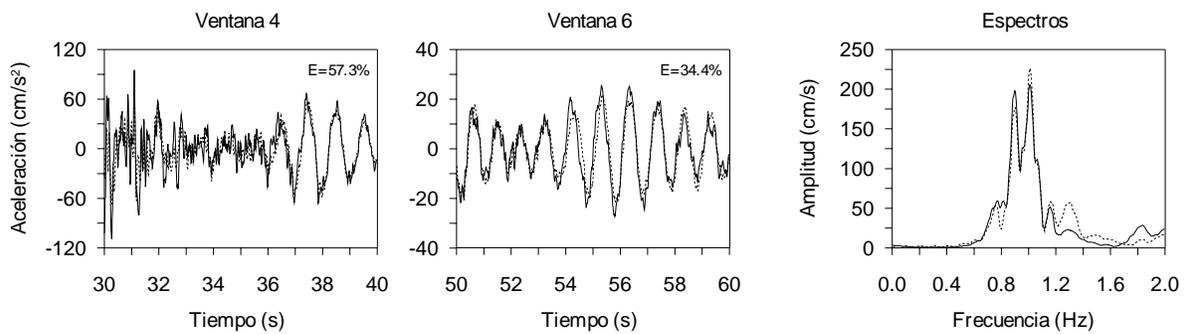
**Fig C.7 - Ajuste del modelo 1D<sub>T</sub>-EST en el componente T para el evento SI-011**



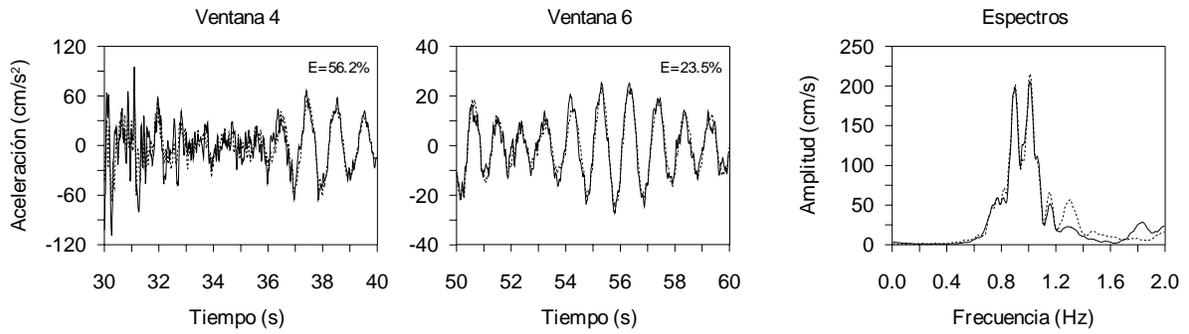
**Fig C.8 - Ajuste del modelo 2D-EST en el componente T para el evento SI-011**



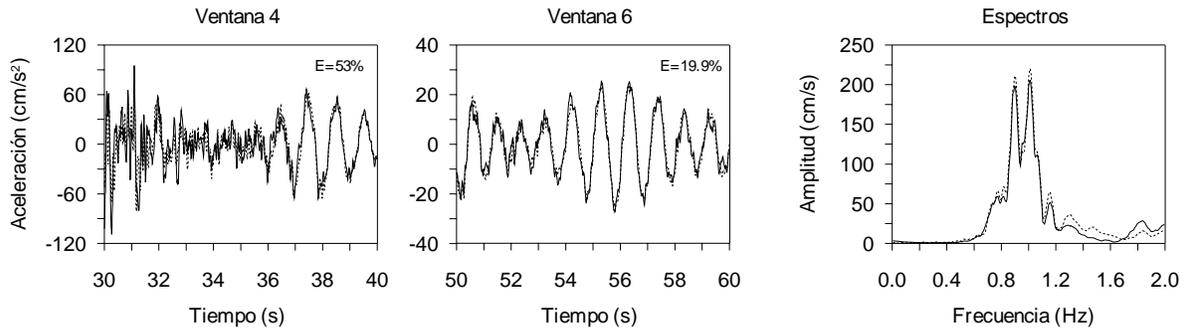
**Fig C.9 - Ajuste del modelo 3D-EST en el componente T para el evento SI-011**



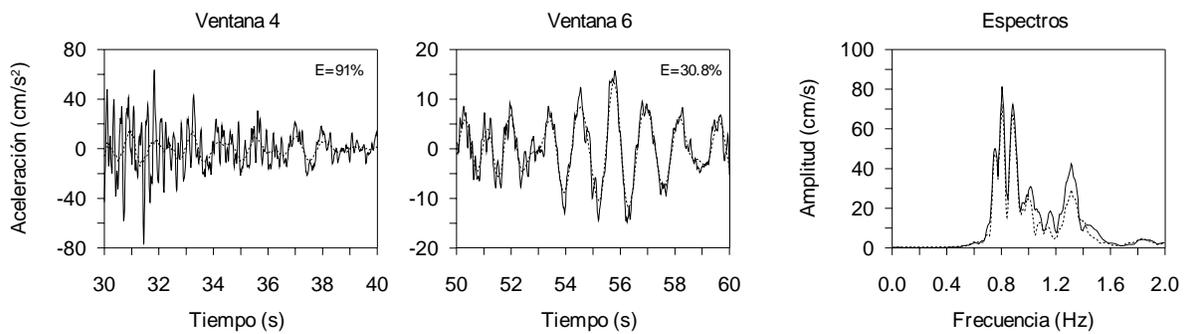
**Fig C.10 - Ajuste del modelo 1D<sub>L</sub>-EST en el componente L para el evento SI-011**



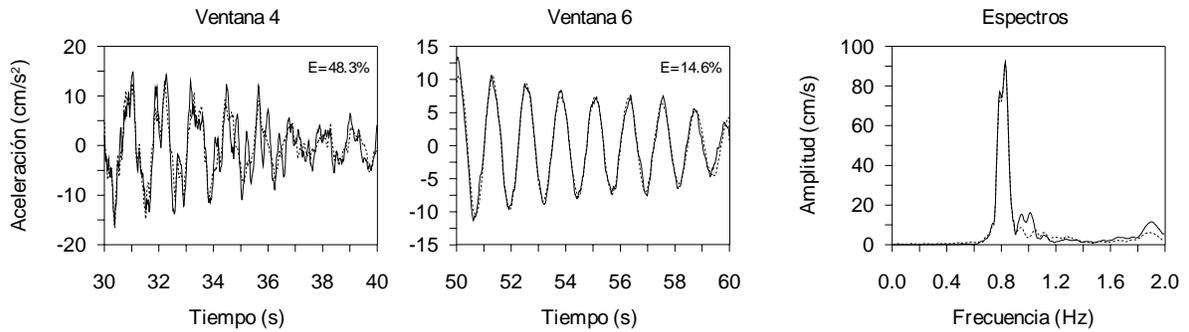
**Fig C.11 - Ajuste del modelo 2D-EST en el componente L para el evento SI-011**



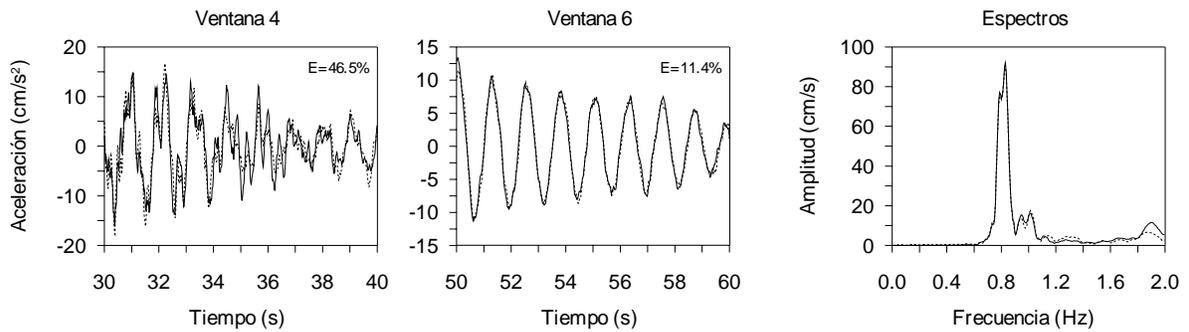
**Fig C.12 - Ajuste del modelo 3D-EST en el componente L para el evento SI-011**



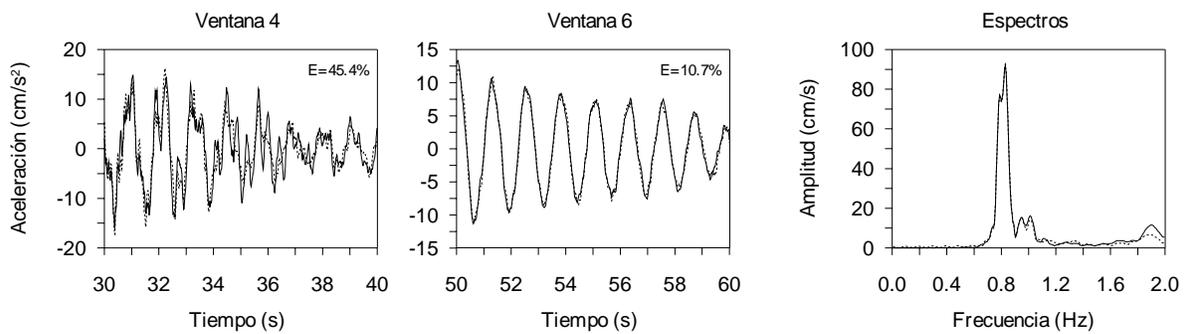
**Fig C.13 - Ajuste del modelo 3D-EST en torsión para el evento SI-011**



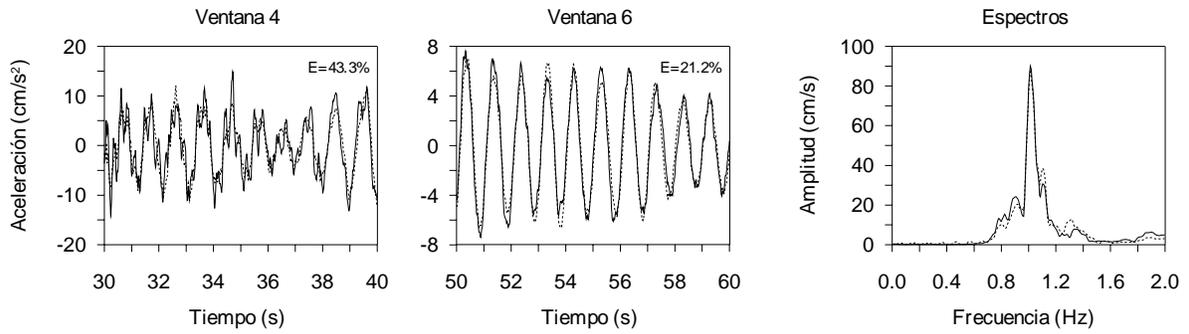
**Fig C.14 - Ajuste del modelo 1D-EST en el componente T para el evento SI-021**



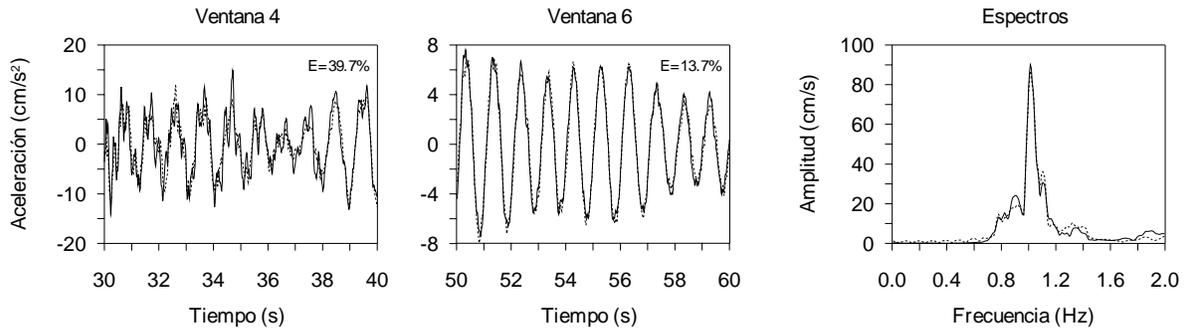
**Fig C.15 - Ajuste del modelo 2D-EST en el componente T para el evento SI-021**



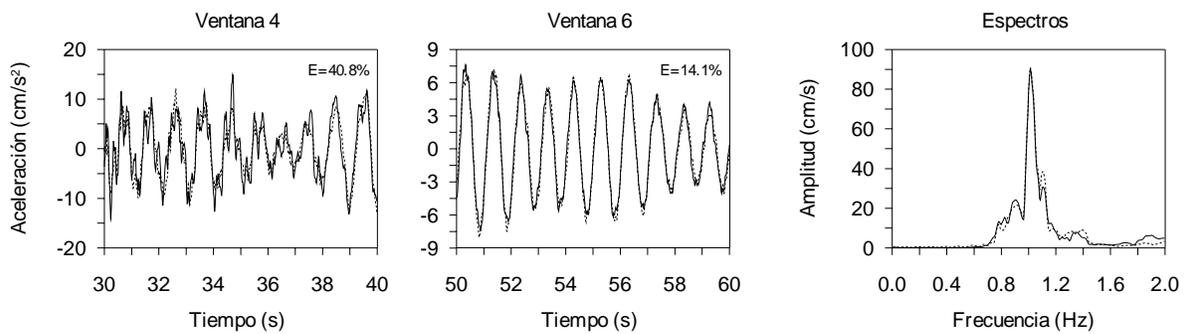
**Fig C.16 - Ajuste del modelo 3D-EST en el componente T para el evento SI-021**



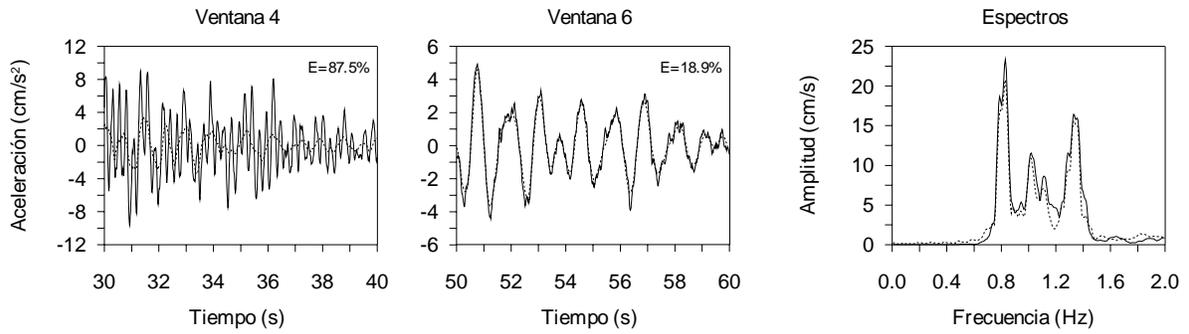
**Fig C.17 - Ajuste del modelo 1D<sub>L</sub>-EST en el componente L para el evento SI-021**



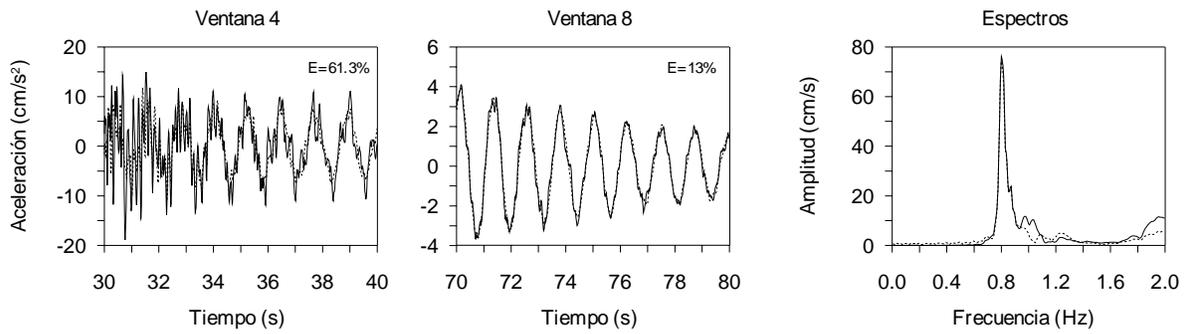
**Fig C.18 - Ajuste del modelo 2D-EST en el componente L para el evento SI-021**



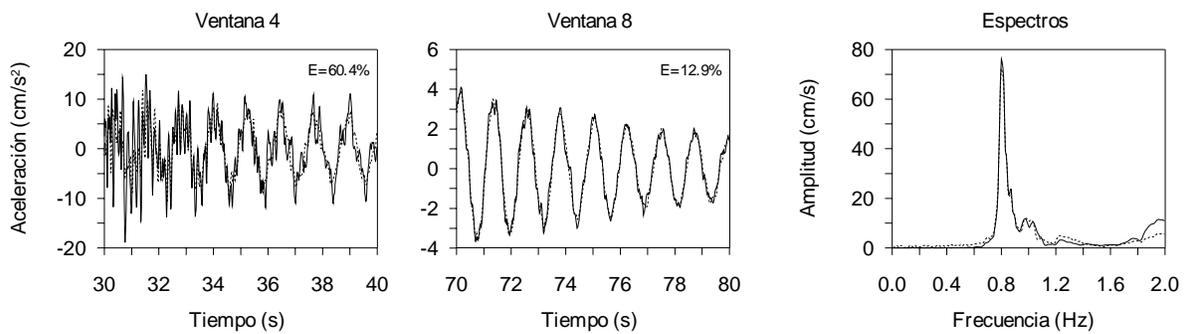
**Fig C.19 - Ajuste del modelo 3D-EST en el componente L para el evento SI-021**



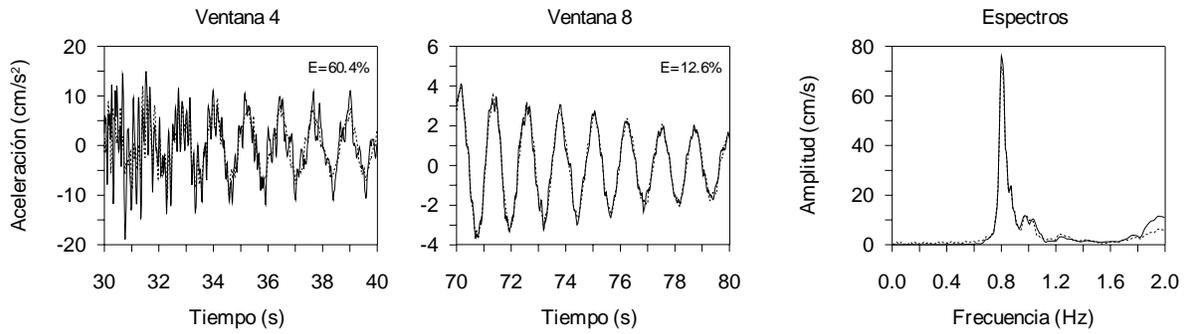
**Fig C.20 - Ajuste del modelo 3D-EST en torsión para el evento SI-021**



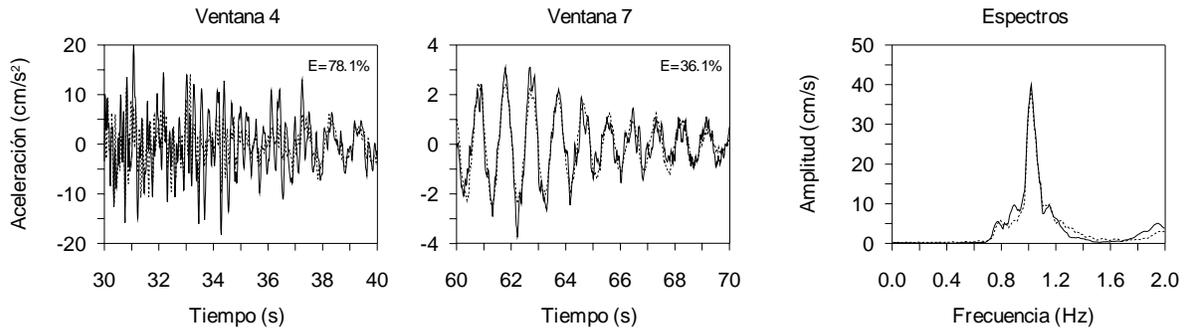
**Fig C.21 - Ajuste del modelo 1D<sub>T</sub>-EST en el componente T para el evento SI-022**



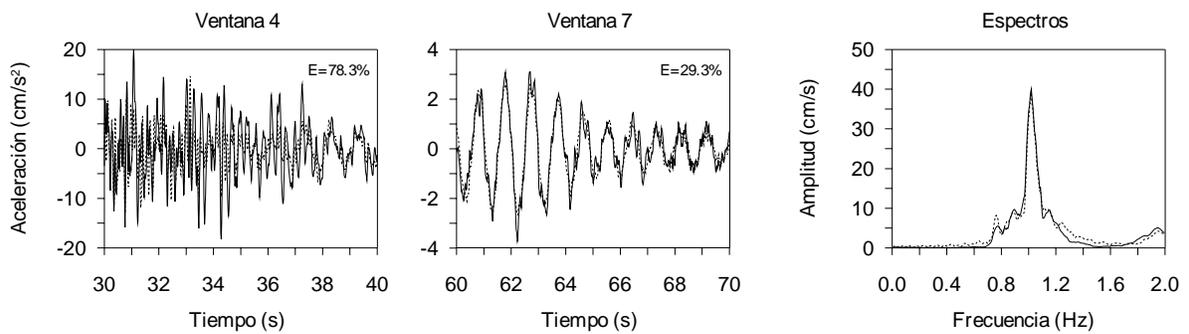
**Fig C.22 - Ajuste del modelo 2D-EST en el componente T para el evento SI-022**



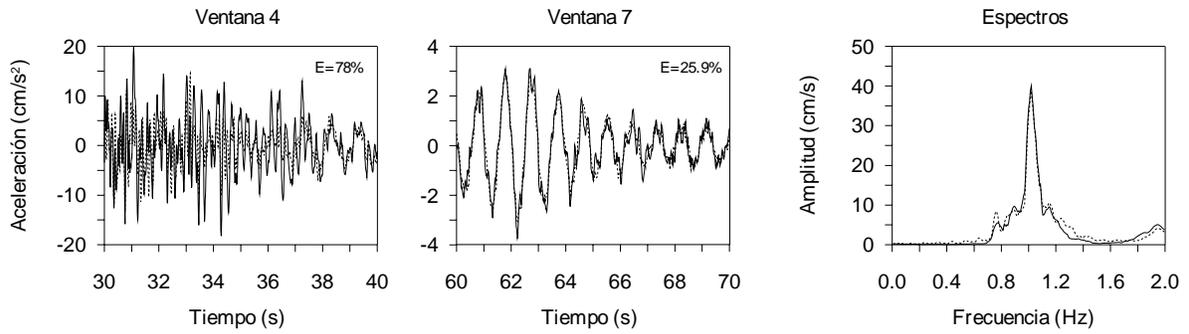
**Fig C.23 - Ajuste del modelo 3D-EST en el componente T para el evento SI-022**



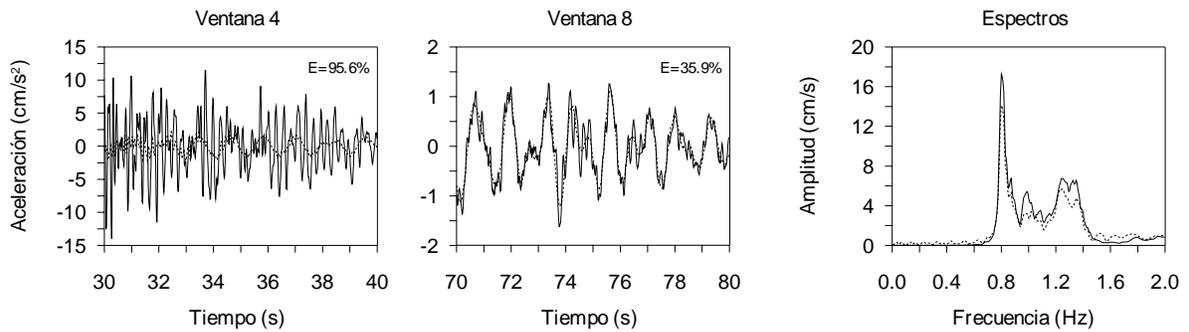
**Fig C.24 - Ajuste del modelo 1D<sub>L</sub>-EST en el componente L para el evento SI-022**



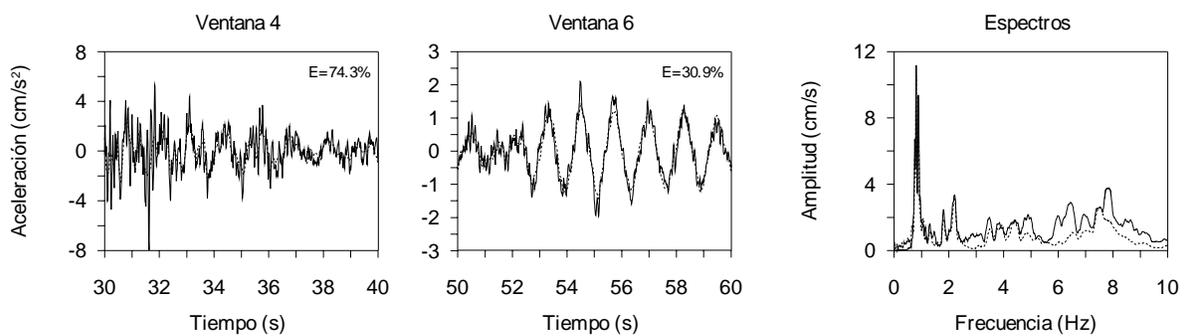
**Fig C.25 - Ajuste del modelo 2D-EST en el componente L para el evento SI-022**



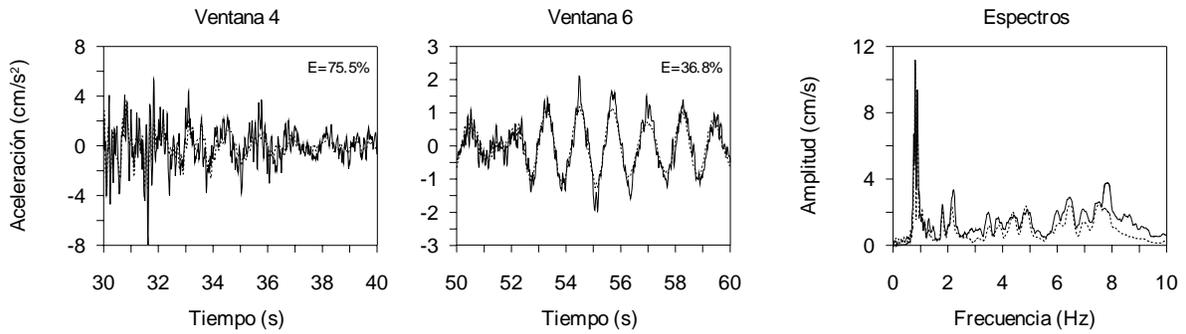
**Fig C.26 - Ajuste del modelo 3D-EST en el componente L para el evento SI-022**



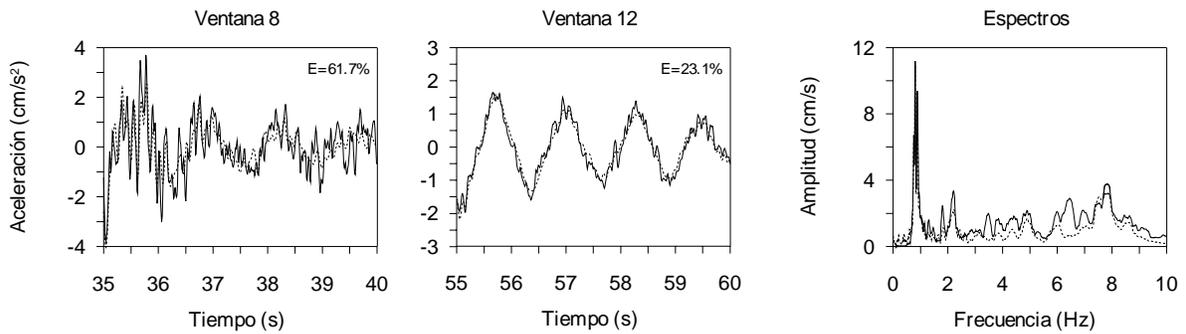
**Fig C.27 - Ajuste del modelo 3D-EST en torsión para el evento SI-022**



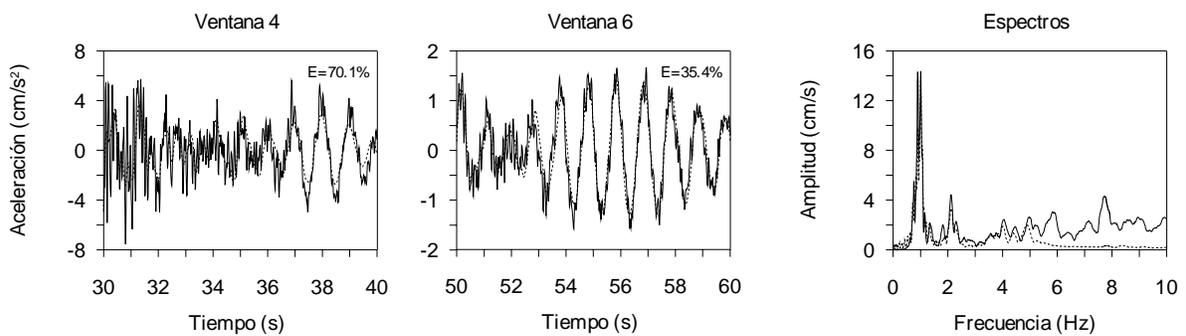
**Fig C.28 - Ajuste del modelo 1D<sub>T</sub>-CAB en T para el evento SI-011 (ventanas de 10 s)**



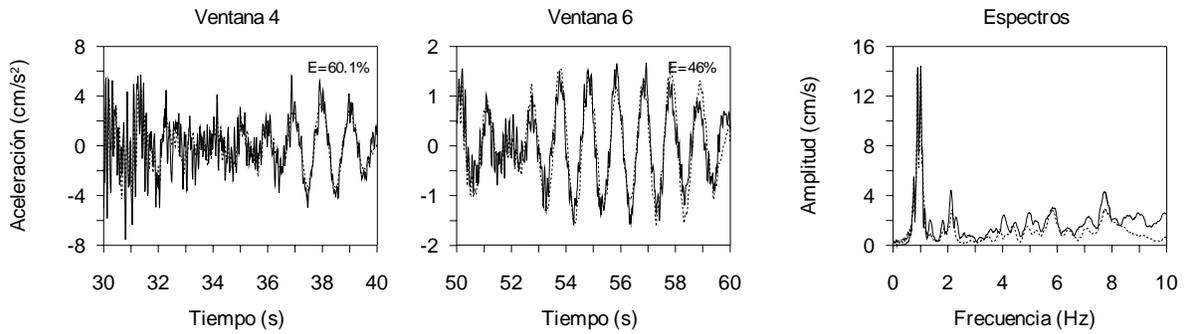
**Fig C.29 - Ajuste del modelo 2D-CAB en T para el evento SI-011 (ventanas de 10 s)**



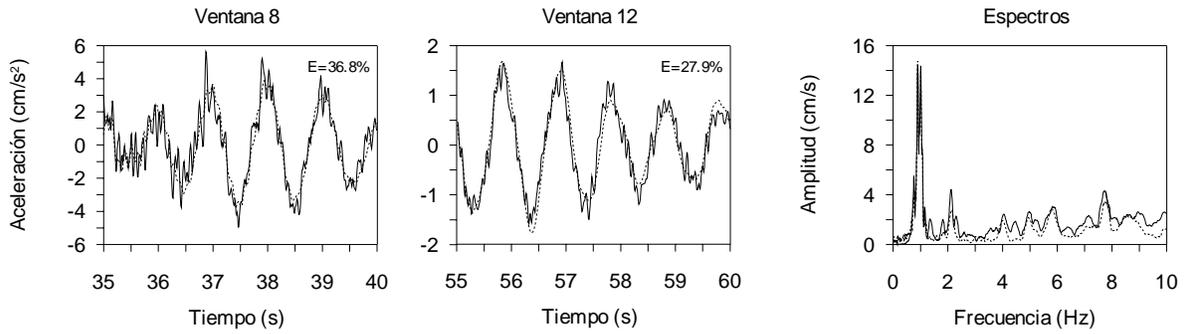
**Fig C.30 - Ajuste del modelo 2D-CAB en T para el evento SI-011 (ventanas de 5 s)**



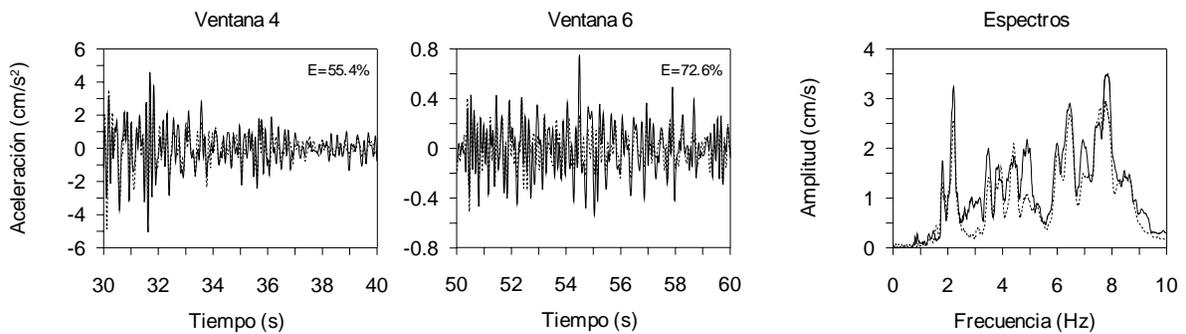
**Fig C.31 - Ajuste del modelo 1D<sub>L</sub>-CAB L para el evento SI-011 (ventanas de 10 s)**



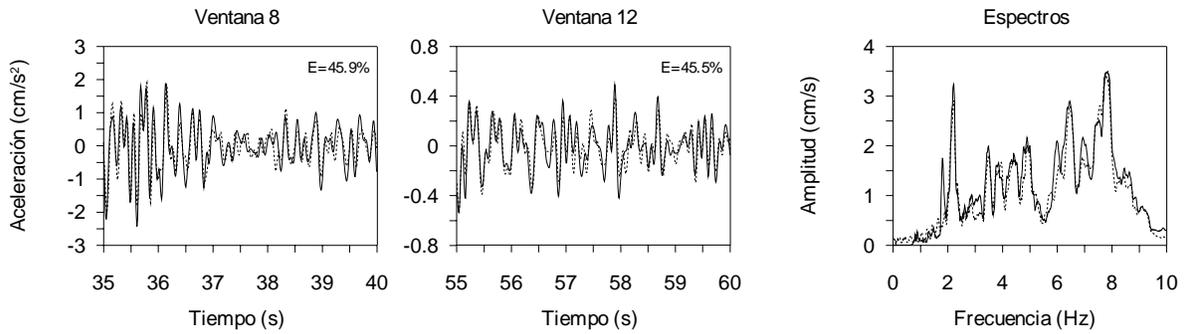
**Fig C.32 - Ajuste del modelo 2D-CAB L para el evento SI-011 (ventanas de 10 s)**



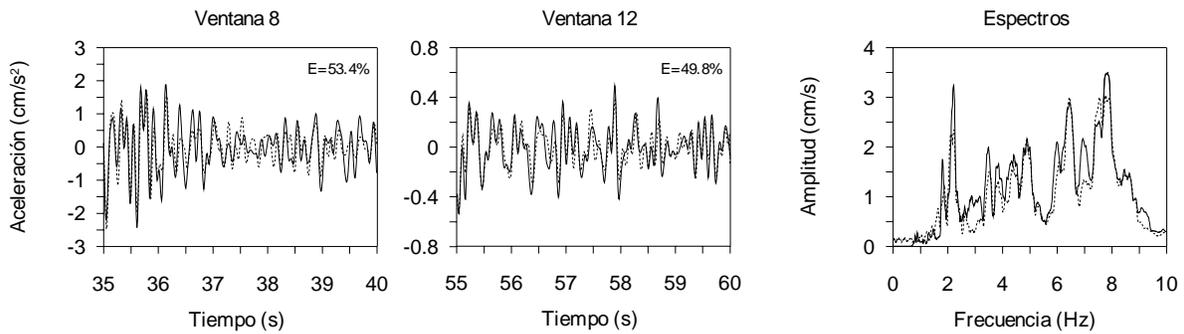
**Fig C.33 - Ajuste del modelo 2D-CAB L para el evento SI-011 (ventanas de 5 s)**



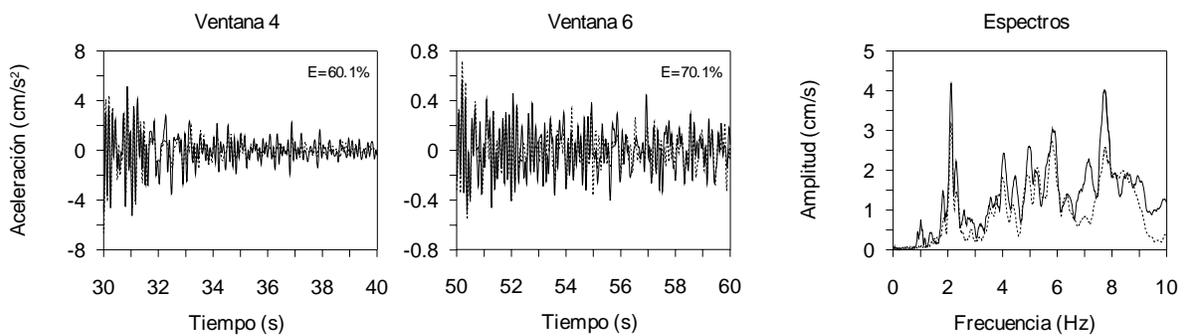
**Fig C.34 - Ajuste del modelo 1D<sub>T</sub>-CAB<sub>F</sub>(1.8-9.0) en T para el evento SI-011 (ventanas de 10 s)**



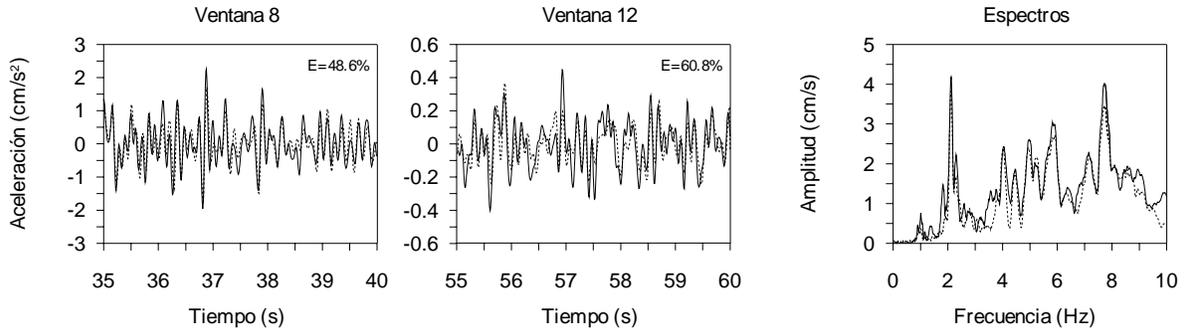
**Fig C.35 - Ajuste del modelo  $1D_T-CAB_{F(1.8-9.0)}$  en T para el evento SI-011 (ventanas de 5 s)**



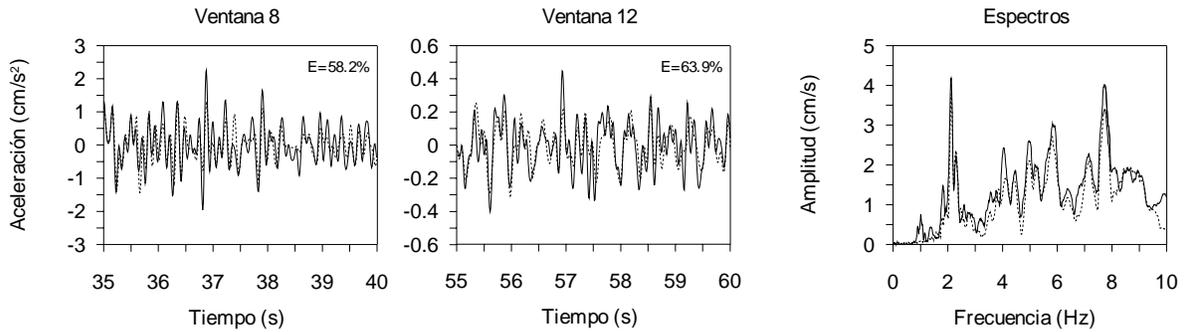
**Fig C.36 - Ajuste del modelo  $2D-CAB_{F(1.8-9.0)}$  en T para el evento SI-011 (ventanas de 5 s)**



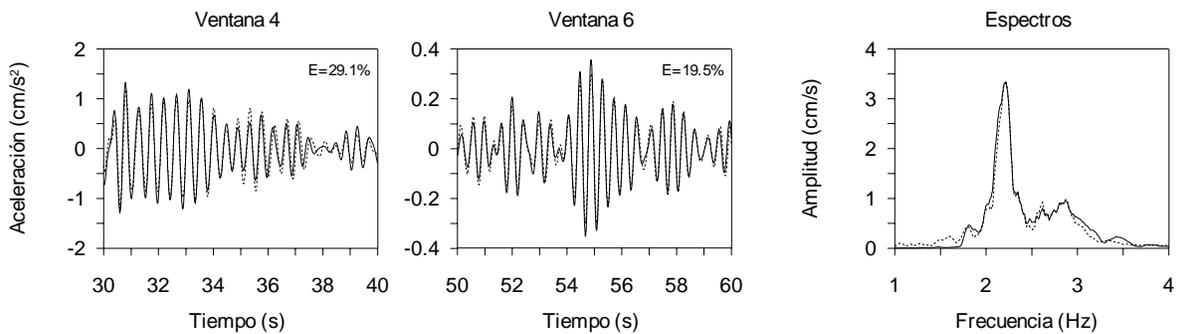
**Fig C.37 - Ajuste del modelo  $1D_L-CAB_{F(1.8-9.0)}$  en L para el evento SI-011 (ventanas de 10 s)**



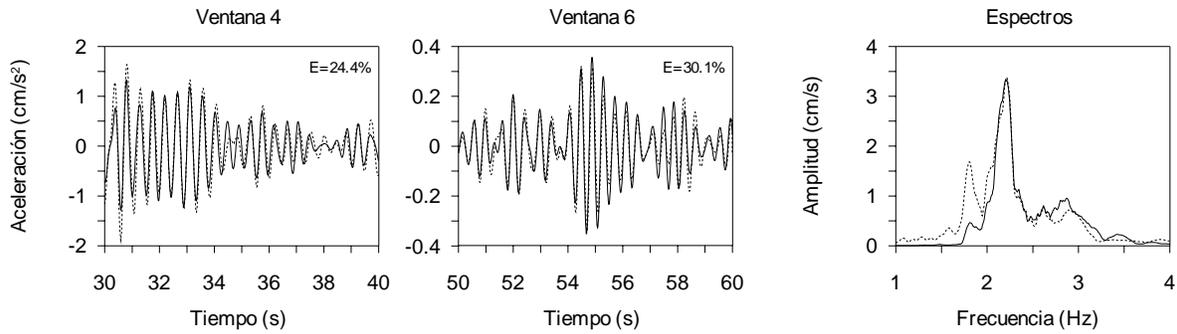
**Fig C.38 - Ajuste del modelo  $1D_L-CAB_{F(1.8-9.0)}$  en L para el evento SI-011 (ventanas de 5 s)**



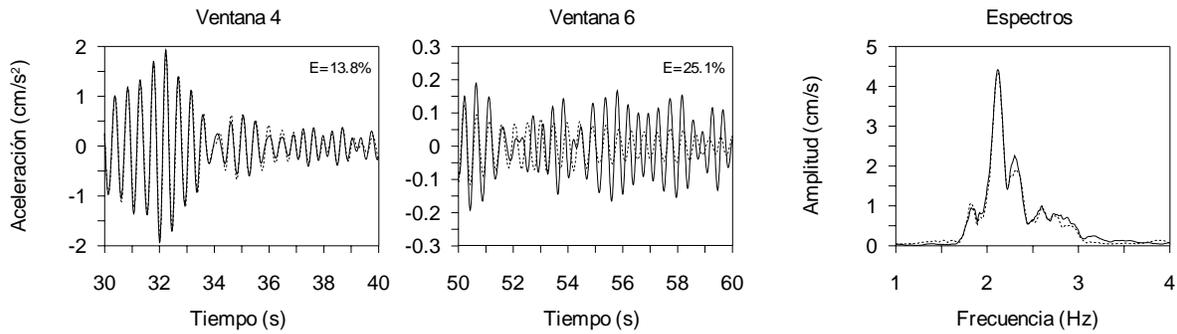
**Fig C.39 - Ajuste del modelo  $2D-CAB_{F(1.8-9.0)}$  en L para el evento SI-011 (ventanas de 5 s)**



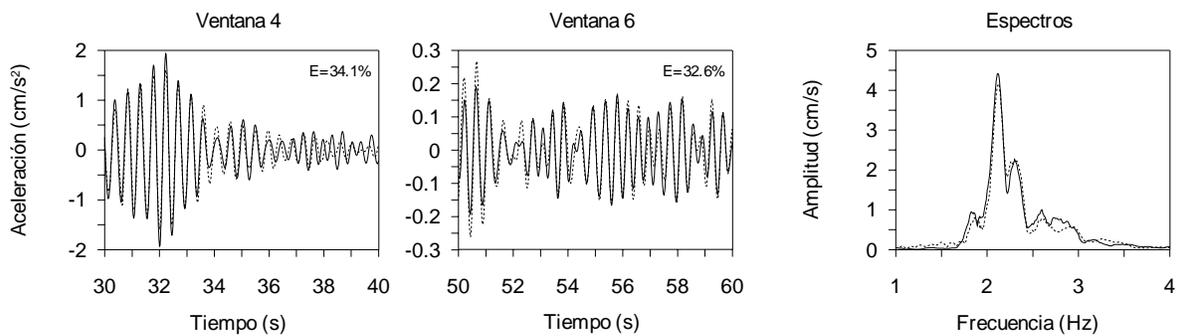
**Fig C.40 - Ajuste del modelo  $1D_T-CAB_{F(1.8-3.0)}$  en T para el evento SI-011 (ventanas de 10 s)**



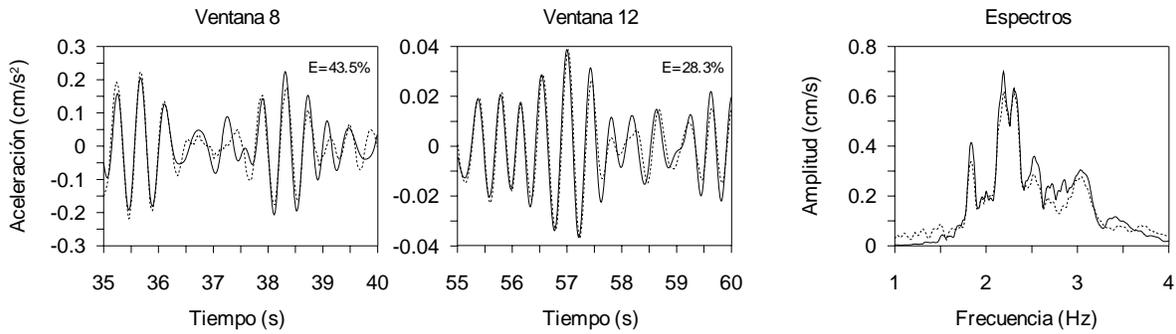
**Fig C.41 - Ajuste del modelo  $2D-CAB_{F(1.8-3.0)}$  en T para el evento SI-011 (ventanas de 10 s)**



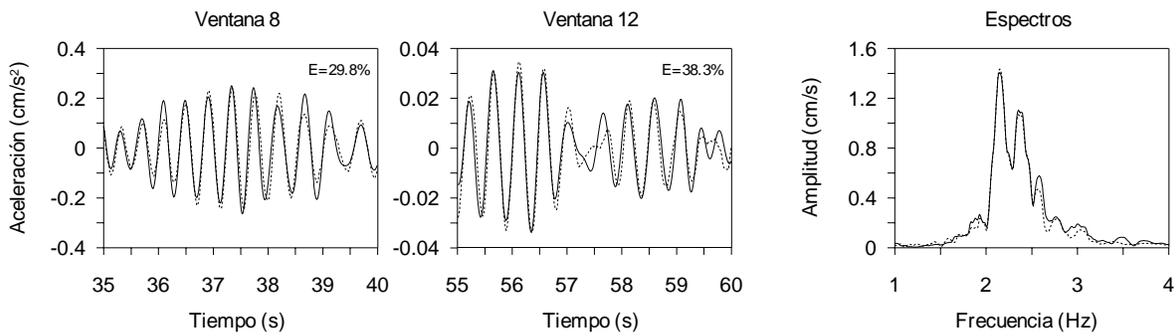
**Fig C.42 - Ajuste del modelo  $1D_L-CAB_{F(1.8-3.0)}$  en L para el evento SI-011 (ventanas de 10 s)**



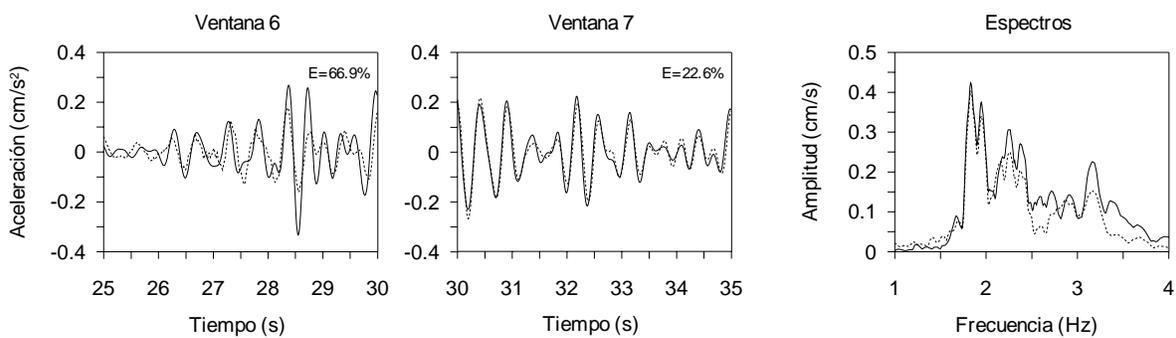
**Fig C.43 - Ajuste del modelo  $2D-CAB_{F(1.8-3.0)}$  en L para el evento SI-011 (ventanas de 10 s)**



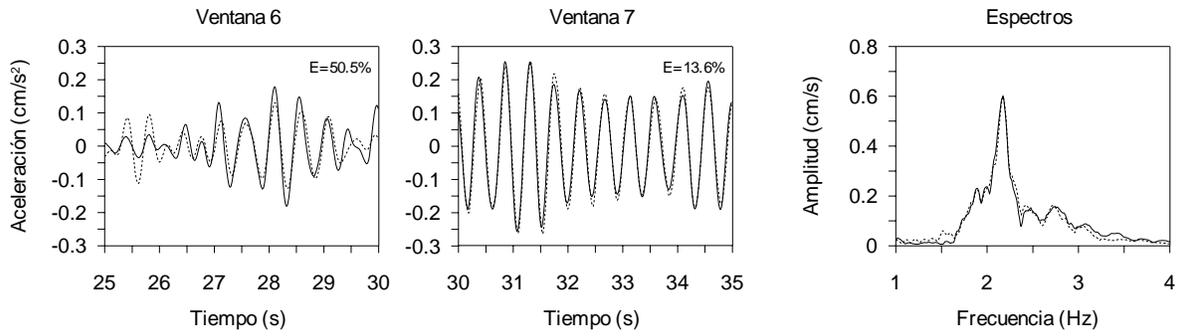
**Fig C.44 - Ajuste del modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> en T para el evento SI-021 (ventanas de 5 s)**



**Fig C.45 - Ajuste del modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> en L para el evento SI-021 (ventanas de 5 s)**



**Fig C.46 - Ajuste del modelo 2D-CAB<sub>F(1.8-3.0)</sub> en T para el evento SI-022 (ventanas de 5 s)**



**Fig C.47 - Ajuste del modelo  $2D-CAB_{F(1.8-3.0)}$  en L para el evento SI-022 (ventanas de 5 s)**

APÉNDICE D

PROCEDIMIENTO PARA LA ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTOS DE UN SISTEMA A PARTIR DE FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Para un sistema de masas concentradas de  $n$  grados de libertad como el que se muestra en la fig D.1, su ecuación de movimiento, cuando éste es sometido a una excitación en la base, puede ser escrita como

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{1\}\ddot{x}_s \tag{D.1}$$

donde

- $[M]$  es la matriz de masas de  $n \times n$
- $[C]$  es la matriz de amortiguamientos de  $n \times n$
- $[K]$  es la matriz de rigidez de  $n \times n$
- $\{\ddot{x}\}$  es el vector de aceleraciones relativas de  $n \times 1$
- $\{\dot{x}\}$  es el vector de velocidades relativas de  $n \times 1$
- $\{x\}$  es el vector de desplazamientos relativos de  $n \times 1$
- $\ddot{x}_s$  es la aceleración de la excitación
- $\{1\}$  es un vector unitario de  $n \times 1$  que equilibra la igualdad.

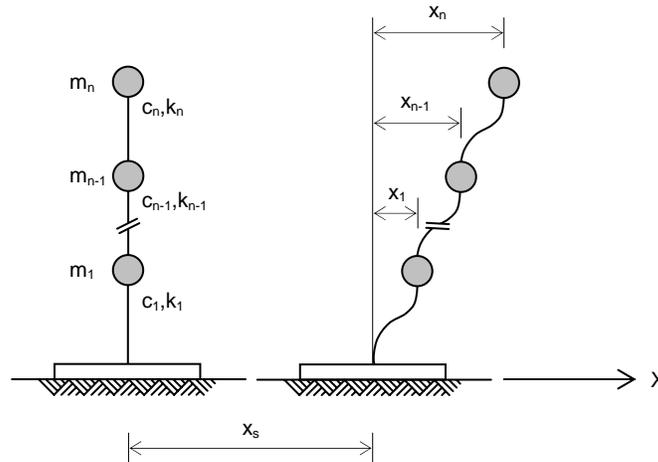


Fig D.1 - Sistema de masas concentradas con  $n$  grados de libertad

Si se supone que el sistema es tal que posee un amortiguamiento clásico, de manera que la expresión D.1 es un problema de valores y vectores propios tal que existe una matriz real de vectores característicos  $[\phi]_{n \times n}$  que diagonaliza las matrices de rigidez, masa y amortiguamiento, para un conjunto de valores  $\{\omega\}_{n \times 1}$ .

Entonces pueden definirse

$$[M]^* = [\phi]^T [M] [\phi] \tag{D.2}$$

$$[K]^* = [\phi]^T [K] [\phi] \quad (D.3)$$

$$[C]^* = [\phi]^T [C] [\phi] \quad (D.4)$$

como las matrices diagonalizadas de masa, rigidez y amortiguamiento, respectivamente. En las ecs D.2 a D.4  $[\phi]$  es la matriz de vectores propios, la cual puede escribirse de la siguiente manera.

$$[\phi] = [\{\phi_1\}, \{\phi_2\}, \dots, \{\phi_j\}, \dots, \{\phi_{n-1}\}, \{\phi_n\}] \quad (D.5)$$

Cada uno de los vectores propios  $\{\phi_j\}_{n \times 1}$  tiene asociado un valor propio  $\omega_j$  tal que se cumple que

$$([K] - \omega_j^2 [M])\{\phi_j\} = 0 \quad (D.6)$$

El vector  $\{\phi_j\}_{n \times 1}$  y el valor  $\omega_j$  son conocidos como la forma modal y la frecuencia asociadas  $j$ -ésimo modo de vibrar de la estructura.

Si se define

$$x_j = \{\phi_j\} y_j \quad (D.7)$$

Lo que matricialmente puede expresarse como

$$\{x\} = [\phi] \{y\} \quad (D.8)$$

De igual manera se definen

$$\{\dot{x}\} = [\phi] \{\dot{y}\} \quad (D.9)$$

$$\{\ddot{x}\} = [\phi] \{\ddot{y}\} \quad (D.10)$$

Al premultiplicar la ecuación de movimiento del sistema (D.1) por la matriz transpuesta de vectores propios se obtiene

$$[\phi]^T [M] \{\ddot{x}\} + [\phi]^T [C] \{\dot{x}\} + [\phi]^T [K] \{x\} = -[\phi]^T [M] \{1\} \ddot{x}_s \quad (D.11)$$

y reemplazando en ésta las ecs D.8 a D.10 se obtiene

$$[\phi]^T [M] [\phi] \{\ddot{y}\} + [\phi]^T [C] [\phi] \{\dot{y}\} + [\phi]^T [K] [\phi] \{y\} = -[\phi]^T [M] \{1\} \ddot{x}_s \quad (D.12)$$

Conocidas las expresiones de las matrices diagonalizadas de masa, rigidez y amortiguamiento (ecs D.2 a D.4), la ec D.12 puede reescribirse como

$$[M]^* \{\ddot{y}\} + [C]^* \{\dot{y}\} + [K]^* \{y\} = -[\phi]^T [M] \{1\} \ddot{x}_s \quad (D.13)$$

Por facilidad, interesa definir el vector

$$\{l\}_{n \times 1} = [\phi]_{n \times n}^T [M]_{n \times n} \{1\}_{n \times 1} \quad (D.14)$$

De manera que la ecuación de movimiento del sistema queda de la siguiente manera.

$$[M]^* \{\ddot{y}\} + [C]^* \{\dot{y}\} + [K]^* \{y\} = -\{l\} \ddot{x}_s \quad (D.15)$$

Ya que las matrices  $[M]^*$ ,  $[C]^*$  y  $[K]^*$  son diagonales, el sistema matricial de ecuaciones queda desacoplado, de forma tal que la ecuación representativa del modo de vibrar  $j$  puede escribirse como

$$m_j^* \ddot{y}_j + c_j^* \dot{y}_j + k_j^* y_j = -l_j \ddot{x}_s \quad (D.16)$$

donde

- $m_j^*$  es la masa modal
- $c_j^*$  es el amortiguamiento modal
- $k_j^*$  es la rigidez modal
- $\ddot{y}_j$  es la aceleración relativa modal
- $\dot{y}_j$  es la velocidad relativa modal
- $y_j$  es el desplazamiento relativo modal.

Si esta expresión se divide por la masa modal, se obtiene

$$\ddot{y}_j + \frac{c_j^*}{m_j^*} \dot{y}_j + \frac{k_j^*}{m_j^*} y_j = -\frac{l_j}{m_j^*} \ddot{x}_s \quad (D.17)$$

para la cual

$$\frac{c_j^*}{m_j^*} = 2\xi_j \omega_j \quad (D.18)$$

$$\frac{k_j^*}{m_j^*} = \omega_j^2 \quad (D.19)$$

$$\frac{l_j}{m_j^*} = \gamma_j \quad (D.20)$$

De manera que la ecuación desacoplada de movimiento para el modo  $j$  puede escribirse nuevamente como

$$\ddot{y}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{y}_j + \omega_j^2 y_j = -\gamma_j \ddot{x}_s \quad (D.21)$$

donde

- $\xi_j$  la fracción de amortiguamiento crítico del modo  $j$
- $\omega_j$  es la frecuencia del modo  $j$
- $\gamma_j$  es el factor de participación del modo  $j$ .

De otra parte se conoce que la transformada de Fourier está dada por la expresión

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt \quad (D.22)$$

De manera que, al aplicar esta transformada a la ecuación de movimiento, ésta queda definida en el dominio de la frecuencia ( $\omega$ ) por la siguiente expresión.

$$\ddot{Y}_j(\omega) + 2\xi_j \omega_j \dot{Y}_j(\omega) + \omega_j^2 Y_j(\omega) = -\gamma_j \ddot{X}_s(\omega) \quad (D.23)$$

Por las propiedades de la transformada de Fourier, se sabe que la velocidad y la aceleración modal pueden expresarse como

$$\dot{Y}(\omega) = i\omega Y(\omega) \quad (D.24)$$

$$\ddot{Y}(\omega) = -\omega^2 Y(\omega) \quad (D.25)$$

Por lo tanto la ec D.23 queda como

$$-\omega^2 Y_j(\omega) + i2\xi_j \omega_j \omega Y_j(\omega) + \omega_j^2 Y_j(\omega) = -\gamma_j \ddot{X}_s(\omega) \quad (D.26)$$

y puede escribirse de la siguiente manera

$$\left[ \omega_j^2 - \omega^2 + i(2\xi_j \omega_j \omega) \right] Y_j(\omega) = -\gamma_j \ddot{X}_s(\omega) \quad (D.27)$$

Siendo así, la función de transferencia entre el desplazamiento relativo del modo  $j$  y la aceleración de excitación en la base está determinada por

$$\frac{Y_j(\omega)}{\ddot{X}_s(\omega)} = \gamma_j \frac{-1}{(\omega_j^2 - \omega^2) + i(2\xi_j \omega_j \omega)} \quad (D.28)$$

Ahora bien, se dijo que la respuesta de desplazamiento relativo de la masa  $j$  esta dada por

$$\{\ddot{x}\} = [\phi] \{\ddot{y}\} \quad (D.29)$$

a partir de lo cual, la respuesta de desplazamiento relativo en el nivel  $n$  corresponde a la siguiente expresión

$$\ddot{x}_n = \ddot{y}_1 \phi_{n1} + \ddot{y}_2 \phi_{n2} + \cdots + \ddot{y}_j \phi_{nj} + \cdots + \ddot{y}_n \phi_{nn} \quad (D.30)$$

que en el dominio de la frecuencia, si se aplica la transformada de Fourier, corresponde a

$$\ddot{X}_n(\omega) = \ddot{Y}_1(\omega) \phi_{n1} + \ddot{Y}_2(\omega) \phi_{n2} + \cdots + \ddot{Y}_j(\omega) \phi_{nj} + \cdots + \ddot{Y}_n(\omega) \phi_{nn} \quad (D.31)$$

Esto es lo mismo que

$$\ddot{X}_n(\omega) = \sum_{j=1}^n \ddot{Y}_j(\omega) \phi_{nj} \quad (D.32)$$

y por lo tanto, también puede escribirse

$$X_n(\omega) = \sum_{j=1}^n Y_j(\omega) \phi_{nj} \quad (D.33)$$

Si en la ec D.33 se premultiplica a ambos lados de la igualdad por  $-\omega^2$ , se obtiene

$$-\omega^2 X_n(\omega) = \sum_{j=1}^n -\omega^2 Y_j(\omega) \phi_{nj} \quad (D.34)$$

que equivale a escribir la respuesta relativa de aceleración en el grado de libertad  $n$  en términos del desplazamiento relativo modal, de la siguiente manera

$$\ddot{X}_n(\omega) = \sum_{j=1}^n [-\omega^2 Y_j(\omega) \phi_{nj}] \quad (D.35)$$

Por lo tanto, la respuesta de aceleración absoluta en el grado de libertad  $n$ , esta dada por

$$\ddot{X}_n(\omega) + \ddot{X}_s(\omega) = \sum_{j=1}^n [-\omega^2 Y_j(\omega) \phi_{nj}] + \ddot{X}_s(\omega) \quad (D.36)$$

Si se divide a ambos lados de la igualdad por la excitación de aceleración en la base, se obtiene

$$\frac{\ddot{X}_n(\omega) + \ddot{X}_s(\omega)}{\ddot{X}_s(\omega)} = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{-\omega^2 Y_j(\omega) \phi_{nj}}{\ddot{X}_s(\omega)} \right] + 1 \quad (D.37)$$

Lo cual se puede definir como la función de transferencia en términos de aceleración absoluta, entre la respuesta en el grado de libertad  $n$  y la excitación en la base. Que por facilidad se rescribe de la siguiente manera.

$$FT(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^n \left[ \frac{-\omega^2 Y_j(\omega) \phi_{nj}}{\ddot{X}_s(\omega)} \right] \quad (D.38)$$

Si se reemplaza la ec D.28 en la ec D.38, se obtiene

$$FT(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^n \frac{\omega^2 \gamma_j \phi_{nj}}{(\omega_j^2 - \omega^2) + i(2\xi_j \omega_j \omega)} \quad (D.39)$$

Para evitar la presencia del término imaginario en el denominador dentro de la sumatoria, se recurre a multiplicar en el numerador y el denominador, por la conjugada del denominador. Mientras que para eliminar el término  $\phi_{nj}$ , se asume que todos los vectores propios son normalizados con respecto al grado de libertad  $n$ .

$$FT(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^n \frac{\omega^2 \gamma_j}{(\omega_j^2 - \omega^2) + i(2\xi_j \omega_j \omega)} \cdot \frac{(\omega_j^2 - \omega^2) - i(2\xi_j \omega_j \omega)}{(\omega_j^2 - \omega^2) - i(2\xi_j \omega_j \omega)}$$

$$FT(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^n \frac{\omega^2 \gamma_j \left( (\omega_j^2 - \omega^2) - i(2\xi_j \omega_j \omega) \right)}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega)^2} \quad (D.40)$$

Al separar el término imaginario, la anterior ecuación queda escrita como

$$FT(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^n \frac{\omega^2 \gamma_j (\omega_j^2 - \omega^2)}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega)^2} + i \sum_{j=1}^n \frac{-2\xi_j \omega_j \omega^3 \gamma_j}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega)^2} \quad (D.41)$$

De manera que la norma al cuadrado de la función de transferencia está definida por

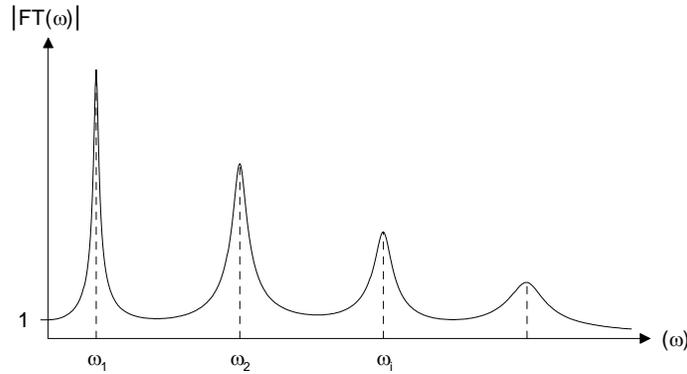
$$|FT(\omega)|^2 = \left[ 1 + \sum_{j=1}^n \frac{\omega^2 \gamma_j (\omega_j^2 - \omega^2)}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega)^2} \right]^2 + \left[ \sum_{j=1}^n \frac{-2\xi_j \omega_j \omega^3 \gamma_j}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega)^2} \right]^2 \quad (D.42)$$

Se sabe que en el caso en que el sistema es de un grado de libertad, la función de transferencia  $|FT(\omega)|$  es de la forma que se muestra en la fig D.2.



**Fig D.2 - Función de transferencia para un sistema de un grado de libertad**

Para  $n$  grados de libertad, la función de transferencia será la sumatoria de  $n$  funciones similares a la de un grado de libertad, cada una de ellas afectada por su factor de partición. Por lo tanto, la función de transferencia será como la que se enseña en la fig D.3.



**Fig D.3 - Función de transferencia de un sistema de  $n$  grados de libertad**

Dadas las características de la función de transferencia de un grado de libertad y considerando que la de  $n$  grados de libertad no es otra cosa que la suma de  $n$  funciones similares, se propone suponer que la amplitud de la función de transferencia evaluada en  $\omega_i$  es aceptablemente bien estimada si en ella únicamente influyen los términos de la sumatoria correspondientes a  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{i-1}$  y  $\omega_{i+1}$ .

Por lo tanto, la ec D.42 se puede describir como

$$|FT(\omega_i)|^2 = \left[ 1 + \sum_{j=1}^{i+1} \frac{\omega_i^2 \gamma_j (\omega_j^2 - \omega_i^2)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega_i)^2} \right]^2 + \left[ \sum_{j=1}^{i+1} \frac{-2\xi_j \omega_j \omega_i^3 \gamma_j}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega_i)^2} \right]^2 \quad (D.43)$$

Ahora bien, supóngase que se tiene un sistema para el cual se ha determinado experimentalmente la función de transferencia de aceleraciones absolutas ( $FT_{exp}$ ) entre el grado de libertad  $n$  (azotea) y la excitación (terreno) en una dirección, asumiendo que las influencias fruto del acoplamiento con los demás componentes de movimiento son despreciables, de manera que el sistema puede ser idealizado como el sistema mostrado en la fig D.1.

En dicha función de transferencia experimental, asociadas a las ordenadas máximas pueden identificarse los valores de  $\omega_j$ , y a partir de un modelo matemático del sistema es factible estimar aproximadamente los valores de  $\gamma_j$ .

De manera que si se conoce  $\xi_{i-1}$ , y  $\xi_{i+1}$  se supone entre 0 y 1, es posible llegar a determinar el valor de  $\xi_i$  mediante un proceso iterativo simple, en el cual se ajusta la amplitud de la función de transferencia dada por la ec D.43 a la amplitud asociada a la frecuencia  $i$  que ha sido identificada en la función de transferencia experimental.

Para ello conviene definir el error en el ajuste como

$$Error_i = |FT(\omega_i)|^2 - |FT(\omega_i)_{exp}|^2 \quad (D.44)$$

donde, sustituyendo en el término correspondiente la ec D.42, se obtiene

$$Error_i = \left[ 1 + \sum_{j=1}^{i+1} \frac{\omega_i^2 \gamma_j (\omega_j^2 - \omega_i^2)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega_i)^2} \right]^2 + \left[ \sum_{j=1}^{i+1} \frac{-2\xi_j \omega_j \omega_i^3 \gamma_j}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega_i)^2} \right]^2 - |FT(\omega_i)_{exp}|^2 \quad (D.45)$$

Conviene entonces aislar los términos conocidos de aquel que se desea conocer, para lo cual se describe la ec D.45 de la siguiente manera.

$$Error_i = \left[ 1 + \left( \sum_{j=1}^i \frac{\omega_i^2 \gamma_j (\omega_j^2 - \omega_i^2)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega_i)^2} \right) + \left( \frac{\omega_i^2 \gamma_{i+1} (\omega_{i+1}^2 - \omega_i^2)}{(\omega_{i+1}^2 - \omega_i^2)^2 + (2\xi_{i+1} \omega_{i+1} \omega_i)^2} \right) \right]^2 + \left[ \sum_{j=1}^i \frac{-2\xi_j \omega_j \omega_i^3 \gamma_j}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega_i)^2} \right]^2 + \left[ \frac{-2\xi_{i+1} \omega_{i+1} \omega_i^3 \gamma_{i+1}}{(\omega_{i+1}^2 - \omega_i^2)^2 + (2\xi_{i+1} \omega_{i+1} \omega_i)^2} \right]^2 - |FT(\omega_i)_{exp}|^2 \quad (D.46)$$

Por facilidad, se definen las siguientes expresiones.

$$A_j = \frac{\omega_i^2 \gamma_j (\omega_j^2 - \omega_i^2)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega_i)^2} \quad (D.47)$$

$$B_j = \frac{-2\xi_j \omega_j \omega_i^3 \gamma_j}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)^2 + (2\xi_j \omega_j \omega_i)^2} \quad (D.48)$$

$$C_i = \omega_i^2 \gamma_{i+1} (\omega_{i+1}^2 - \omega_i^2) \quad (D.49)$$

$$D_i = -2\omega_{i+1} \omega_i^3 \gamma_{i+1} \quad (D.50)$$

$$E_i = (\omega_{i+1}^2 - \omega_i^2)^2 \quad (D.51)$$

$$F_i = (2\omega_{i+1} \omega_i)^2 \quad (D.52)$$

Entonces la ec D.46 queda como

$$Error_i = \left[ 1 + \left( \sum_{j=1}^i A_j \right) + \left( \frac{C_i}{E_i + F_i \xi_{i+1}^2} \right) \right]^2 + \left[ \left( \sum_{j=1}^i B_j \right) + \left( \frac{-D_i \xi_{i+1}}{E_i + F_i \xi_{i+1}^2} \right) \right]^2 - |FT(\omega_i)|_{exp}^2 \quad (D.53)$$

Es valioso hacer notar que si en la ec D.53,  $i$  es igual a  $j$ , entonces los valores de  $A_j$  y  $B_j$  son

$$A_j = 0 \quad (D.54)$$

$$B_j = \frac{-\gamma_j}{2\xi_j} \quad (D.55)$$

Por lo tanto la ec D.53 puede describirse de la siguiente manera.

$$Error_i = \left[ 1 + \left( \sum_{j=1}^{i-1} A_j \right) + \left( \frac{C_i}{E_i + F_i \xi_{i+1}^2} \right) \right]^2 + \left[ \left( \frac{-\gamma_i}{2\xi_i} \right) + \left( \sum_{j=1}^{i-1} B_j \right) + \left( \frac{-D_i \xi_{i+1}}{E_i + F_i \xi_{i+1}^2} \right) \right]^2 - |FT(\omega_i)|_{exp}^2 \quad (D.56)$$

Dada pues la ec D.56, el procedimiento a seguir para la estimación de los amortiguamientos del sistema a partir de la función de transferencia conocida, es el siguiente.

1. Se propone un valor inicial de  $\xi_i$ .
2. Se determinan los valores de  $\Sigma A_j$ ,  $\Sigma B_j$ ,  $C_i$ ,  $D_i$ ,  $E_i$  y  $F_i$ .
3. Se evalúa  $Error_i$  para un valor de  $\xi_{i+1}$  igual a 0.
4. Se evalúa  $Error_i$  para un valor de  $\xi_{i+1}$  igual a 1.

Se ha encontrado que sólo para un intervalo muy estrecho de valores de  $\xi_i$  se obtiene que los valores de  $Error_i$  estimados en los pasos 3 y 4 sean de signo contrario, situación para la cual se satisface que  $FT(\omega)$  sea muy cercano a  $FT(\omega)_{exp}$ . De manera que, al cumplir esta condición se puede continuar.

5. Si  $\begin{cases} \text{Error}_i(\xi_{i+1} = 0) \cdot \text{Error}_i(\xi_{i+1} = 1) < 0 \\ \text{Error}_i(\xi_{i+1} = 0) \cdot \text{Error}_i(\xi_{i+1} = 1) > 0 \end{cases} \rightarrow$  Se fija el valor  $\xi_i$   
 $\rightarrow$  Se regresa al paso 1 y se propone un nuevo valor para  $\xi_i$
6. Se pasa a  $i = i + 1$ .

Por último, es importante hacer ver que cuando  $i$  es igual a 1, los términos  $A_{i-1}$  y  $B_{i-1}$ , no se tienen en cuenta y por lo tanto no se requiere conocer previamente el valor de  $\xi_{i-1}$ . De manera que al determinar  $\xi_i$  se obtiene el valor de  $\xi_{i-1}$  para la siguiente estimación, es decir, para el caso en que  $i$  es igual a 2, y así sucesivamente.

## BIBLIOGRAFÍA

Alcántara L., Murià D., Almora D., Velasco J. M., Torres M., Vázquez R., Vázquez E., y Macías M. (2002), "Sistema de monitoreo remoto en un edificio localizado en una ciudad expuesta a un peligro sísmico mayor", Octavas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Valparaíso, Chile, 24 al 26 de abril.

Arias A. (1970), "A measure of earthquake intensity", Seismic Design for Nuclear Power Plants, Editor: R. J. Hansen, MIT Press.

Avilés J. (1999), "Interacción suelo-estructura: conceptos de diseño", Revista de Ingeniería Sísmica, N° 61, pp. 23-55.

Avilés J., Suárez M. y Sánchez-Sesma F. J. (2002), "Effects of wave pasaje on the relevant dynamic properties of structures with flexible foundation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 31, pp. 139-159.

Beck J. L. (1978), "Determining models of structures from earthquake records", Report N° EERL 78-01, California Institute of Technology, Pasadena.

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.

Bendat J. S. y Piersol A. G. (1989), "Random data. Analysis and measurement procedure", Wiley Interscience, New York.

Beredugo Y. O. y Novak M. (1972), "Coupled horizontal and rocking vibration of embedded footings", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, N° 4, pp. 77-97.

Chávez-García F. J. y Cuenca J. (1998), "Site effects and microzonation in Acapulco", Earthquake Spectra, Vol. 14, N° 1, pp. 75-93.

Correa V. M. (2003), "Identificación de las propiedades dinámicas del edificio SIS por medio de un método paramétrico modal para los eventos SI-011 y SI-021", Trabajo de Investigación II, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Dobry R. y Gazetas G. (1986), "Dynamic response of arbitrarily shaped foundations", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 112, N° 2, pp. 109-135.

Dobry R. y Gazetas G. (1988), "Simple method for dynamic stiffness and camping of floating pile groups", Géotechnique, Vol. 38, N° 4, pp. 557-574.

Durrani A. J., Mau S. T., AbouHashish A. A. y Li Y. (1994), "Earthquake response of flat-slab buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, N° 3, pp. 947-964.

Escobar J. A., Murià-Vila D., Meli R., Salgado A., Nájera G. y Capistrano A. (2001), "Selección de edificios candidatos a ser instrumentados en la ciudad de Acapulco", Informe Técnico, Proyecto 1501, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Ewins D. J. (1986), "Modal testing: Theory and practice", Research Studies Press Ltd., J. Wiley & Sons Inc.

Fuentes L. y Murià-Vila D. (2001), "Modelos matemáticos calibrados de un edificio instrumentado", Revista Digital Universitaria, UNAM ([www.revista.unam.mx](http://www.revista.unam.mx)), Vol. 2, N° 3.

- Gazetas G. (1990), "Foundation vibrations", Foundation Engineering Handbook, Cap. 15, pp. 553-593.
- Gazetas G. (1991), "Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, N° 9.
- Gazetas G., Fan K. y Kausel E. (1991), "Dynamic interaction factors for floating pile groups", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, N° 10, pp. 1531-1548.
- Gutiérrez C. y Singh S. K. (1992), "A site effect study in Acapulco, Guerrero, México: Comparison of results from strong-motion and microtremor data", Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82, N° 2, pp. 642-659.
- Kausel E. y Ushijima R. (1979), "Vertical and torsional stiffness of cylindrical footing", Civil Engineering Department, Report N° R79-6, MIT, Cambridge, Massachusetts.
- Kaynia A. M. y Kausel E. (1982), "Dynamic behavior of piles groups", 2<sup>nd</sup> International Conference on Numeric Methods Offshore Piling, Austin, Texas, pp. 509-532.
- Kobori T., Nakazawa M., Hijikata K., Kobayashi Y., Miura K., Miyamoto Y. y Moroi T. (1991), "Study on dynamic characteristics of a pile group foundation", Proceedings 2<sup>nd</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Luis, Missouri, marzo 11 a 15, No 5.42, pp. 853-860.
- Lermo J. (2002), "Características dinámicas del suelo donde está ubicado el edificio SIS", Informe Técnico, Proyecto 1501, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- 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 Houston.
- Li Y. y Mau S. T. (1991), "A case study MIMO system identification applied to building seismic records", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, pp. 1045-1064.
- Li Y. y Mau S. T. (1997), "Learning from recorded earthquake motion of buildings", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, N° 1, pp. 62-69.
- Ljung L. (1987), "System identification - Theory for the user", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Luco J. E. (1980), "Soil-structure interaction and identification of structural models", Proceedings 2<sup>nd</sup> ASCE Conference on Civil Engineering and Nuclear Power, Knoxville, Tennessee, septiembre 15-17, Vol. III, Geotechnical Topics, N° 10-1, pp. 10.1-10.30.
- Luco J. E., Trifunac M. D. y 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, No. 6, pp. 1961-1983.
- Mamoon S. M., Kaynia A. M. y Banerjee P. K. (1990), "Frequency domain dynamic analysis of piles and pile groups", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 116, N° 10, pp. 2237-2257.
- Meli R., Faccioli E., Murià-Vila D., Quaas R. y Paolucci R. (1998), "Study of site effects and seismic response of an instrumented building in Mexico City", Journal of Earthquake Engineering, Vol. 2, N° 1, pp. 89-111.

- Mendoza L., Reyes A. y Luco J. E. (1991), "Ambient vibration tests of the Mexicali General Hospital", *Earthquake Spectra*, Vol. 7, N° 2, pp. 281-300.
- Murià-Vila D., Alcántara L., Durán R., Macías M., Maldonado S. L., Pérez L., Tena A., Vázquez R. (1997), "Edificios instrumentados", *El macrosismo de Manzanillo del 9 de octubre de 1995*, Editor: Tena A., Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Universidad de Colima y Gobierno del Estado de Colima, Cap. 9, pp. 197-232.
- Murià-Vila D., Fuentes L. y González R. (2000), "Incertidumbres en la estimación de las frecuencias naturales de vibración de edificios", *Información Tecnológica*, Vol. 11, N° 3, pp. 177-184.
- Murià-Vila D. y González R. (1995), "Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México", *Revista de Ingeniería de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, N° 51, pp- 25-45.
- Murià-Vila D. y Rodríguez G. (2002), "Análisis de los registros sísmicos obtenidos de 1993 a 1998 en el edificio Jal", *Serie del Instituto de Ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM*, N° 628.
- Murià-Vila D., Rodríguez G., Zapata A. y Toro A.M. (2001), "Seismic response of a twice-retrofitted building", *ASET Journal of Earthquake Technology, India*, Vol. 38, N° 2-4, pp. 67-92.
- Murià-Vila D., Taborda R., Macías M. A. y Escobar J. A. (2002), "Instrumentación de un edificio alto en la ciudad de Acapulco", *Octavas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica*, Valparaíso, Chile, abril 24 a 26.
- Murià-Vila D., Zapata A. y Rodríguez G. (1999), "Programa para el cálculo de la coherencia", *Instituto de Ingeniería, UNAM*.
- Nakamura Y. (1989), "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface", *QR of RTRI*, Vol. 30, N° 1, pp. 25-33.
- Novak M. (1991), "Piles under dynamic loads", *Proceedings 2<sup>nd</sup> International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, No 5.42, St. Luis, Missouri, marzo 11 a 15, pp. 2433-2455.
- Novak M. y Aboul-ella F. (1978), "Impedance functions of piles in layered media", *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 104, N° EM6, pp. 643-661.
- Novak M. y Beredugo Y. O. (1972), "Vertical vibration of embedded footings", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, N° SM12, pp. 1291-1310.
- Novak M. y Mitwally H. (1990), "Random response of offshore towers with pile-soil-pile interaction", *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 112, pp. 35-41.
- Novak M. y Sachs, K. (1973), "Torsional and coupled vibrations of embedded footings", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.2, N° 11, p. 33.
- Novak M., Sheta M., El-Hifnawi L., El Marsafawi H., El Naggar H., Ramadan O. y El-Sawy K. (1995), *Dyna5® para Windows 95®*, Geotechnical Research Centre, University of Western Ontario.
- NTCDS-RCDF (2000), *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Versión Preliminar*, VI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, A.C., Querétaro, Qro., septiembre 22 y 23.

- NTCDS-RCMEG (1989), Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para los Municipios del Estado de Guerrero.
- Oppenheim A. V. y Schaffer R. W. (1975), "Digital signal processing", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Ordaz M. (1993), "Subrutinas de análisis de señales", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Ordaz M. y Montoya C. (2002), Degtra A4, Ver. 3.1.4, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Ovando E. y Romo M. P. (1992), "Geotechnical aspects for the microzonation of Acapulco", Earthquake Engineering Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam, pp. 6179-6185.
- Palacios C. (2003), "Estimación de los parámetros dinámicos del edificio PC", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Paolucci R. (1993), "Soil-structure interaction on an instrumented building in Mexico City", European Earthquake Engineering, Vol. VII, N° 3, pp. 33-44.
- Pender M. J. (1993), "Aseismic pile foundation design analysis", Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, Vol. 26, N° 1.
- Pérez J. H. (1995), "Desarrollo y evaluación de modelos aplicando técnicas de identificación de sistemas", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Pérez J. H. y Murià-Vila D. (1994), "Programa para calcular la corrección de línea base, transformada rápida de Fourier, función de transferencia, ángulos de fase y coherencias entre dos señales. Modificación a Ordaz (1993)", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Rosenblueth E. y Reséndiz D. (1988), "Disposiciones reglamentarias de 1987 para tener en cuenta interacción dinámica suelo-estructura", Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, N° 509.
- Stearns S. D. y Hustt D. R. (1990), "Digital signal analysis", Prentice Hall.
- Stewart J. P. y Fenves G. L. (1998), "System identification for evaluating soil-structure interaction effects in buildings from strong motion recordings", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, pp. 869-885.
- Stewart J. P., Fenves G. L. y Seed R. B. (1999), "Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical methods", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, N° 1, pp. 26-37.
- Stewart J. P., Fenves G. L. y Seed R. B. (1999), "Seismic soil-structure interaction in buildings. II: Empirical findings", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, N° 1, pp. 38-48.
- Taborda R. (2003), "Macros para el análisis espectral de señales por ventanas", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Taborda R. (2003), "Macros para el análisis de señales en el dominio del tiempo por el método de cruces por cero", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Taborda R. y Murià-Vila D. (2002), "Macros para la captura y procesamiento de resultados de señales procesadas espectralmente", Instituto de Ingeniería, 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.

Taborda R., Murià-Vila D., Pérez R. y Macías M. A. (2002), "Efectos de interacción suelo-estructura de un edificio en Acapulco", XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puebla, México, octubre 30 a noviembre 2.

Taborda R. y Ordaz M. (2003), "Procedimiento para estimar los amortiguamientos de un sistema a partir de funciones de transferencia", XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León y Guanajuato, México, noviembre 19 a 22.

Trifunac M. D. (1972), "Comparisons between ambient and forced vibration experiments", *Earthquake and Structural Dynamics*, Vol. 1, pp. 133-150.

Trifunac M. D., Ivanovic S. S. y Todorovska M. I. (2001), "Apparent periods of a building. I: Fourier analysis", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 127, N° 5, pp. 517-526.

Trifunac M. D., Ivanovic S. S. y Todorovska M. I. (2001), "Apparent periods of a building. II: Time-frequency analysis", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 127, N° 5, pp. 527-537.

Trifunac M. D. y Todorovska M. I. (1999), "Recording and interpreting earthquake response of full-scale structures", *Proc. Nato Advanced Research Workshop on Strong-Motion Instrumentation for Civil Engineering Structures*, Istanbul, Turquía, junio 2 a 5, Kluwer Academic Publ., pp. 131-155.

Toro A. M. (1997), "Estimación de parámetros estructurales de un edificio instrumentado aplicando una técnica de identificación paramétrica modal", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Veletsos A. S. y Damodaran V. V. (1975), "Seismic interaction of structures on hysteretic foundations", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 101, N° ST1, pp. 109-129.

Veletsos A. S. y Nair V. V. D. (1974), "Torsional of vibration of viscoelastic foundation" *Journal of the Geotechnical Division*, ASCE, Vol. 100, No. GT3, pp. 225-246.

Veletsos A. S. y Verbic B. (1973), "Vibration of viscoelastic foundation", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 2, pp. 87-102.

Veletsos A. S. y Wei Y. T. (1971), "Lateral and rocking vibration of footings", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 97, N° SM9, pp. 1227-1248.

Zapata A. (2002), "Estudio de la respuesta dinámica de un edificio instrumentado", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Zapata A., Murià-Vila D. y Rodríguez G. (1999), "Comparación de técnicas de identificación de propiedades estructurales paramétricas y no paramétricas", XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Morelia, México, noviembre.