



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**Análisis de registros sísmicos en un edificio alto
cercano a la estación SCT**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS
P R E S E N T A :

José Camargo Pérez

TUTOR:
Dr. David Murià Vila

junio 2007

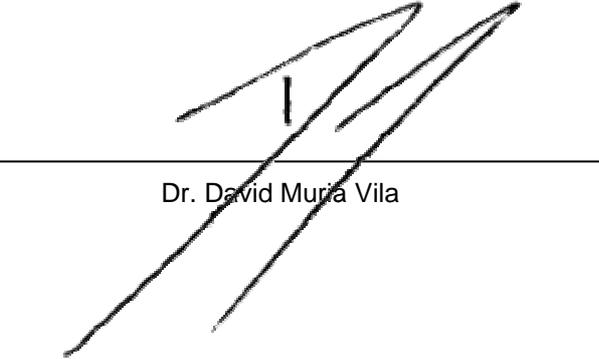
JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Meli Piralla Roberto
Secretario: Dr. Avilés López Javier
Vocal: Dr. Murià Vila David
1^{er}. Suplente: Dr. Escobar Sánchez José Alberto
2^{do}. Suplente: M.I. Rodriguez Gutiérrez Gerardo

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:



Dr. David Murià Vila

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado en la coordinación de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería, UNAM; bajo la dirección del Dr. David Murià Vila, a quien deseo agradecer por el tiempo y la disposición dedicados a este trabajo. También por su apoyo, paciencia, guía y todo lo que pude aprender de él a nivel profesional y personal.

Agradezco a los jurados de tesis Dr. Roberto Meli Piralla, Dr. Javier Avilés López, Dr. José Alberto Escobar Sánchez y M.I. Gerardo Rodríguez Gutiérrez por los valiosos comentarios y sugerencias que permitieron lograr un trabajo con la calidad académica deseada.

La realización de este trabajo no hubiera sido posible sin la cooperación y el apoyo de los propietarios del edificio, que proporcionaron todas las facilidades para la instrumentación. De igual forma desempeñó un papel indispensable la Coordinación de Instrumentación Sísmica del Instituto de Ingeniería.

Se agradece la información adicional y comentarios de M.I José Luis Trigos Suárez, Dr. Efraín Ovando Shelley, M.I. Marco Antonio Macias y Ing. Lucio Camarillo B.

Deseo reconocer la asesoría de Verónica Correa Girado y a aquellos que indirectamente contribuyeron gracias a los excelentes trabajos presentados anteriormente, como Ricardo Taborda Rios, Arabella Zapata Escobar, Ana María Toro Jaramillo.

Expreso mi gratitud por el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología durante los estudios de maestría. Y el apoyo de mi tutor a través del programa de becas del Instituto de Ingeniería durante la fase final de este trabajo.

Especial mención merecen a aquellos profesores que a lo largo de mi carrera me han inspirado para ser un mejor ingeniero: Ing. Erik Castañeda de Isla Puga, M.I. Gerardo Rodríguez Gutiérrez, Ing. José Manuel Covarrubias Solís, M.I. Jorge Ávila Rodríguez, Dr. Mario Ordaz Schroeder, Dr David Murià Vila.

Agradezco a mi familia que siempre me apoyó en todos los momentos.

Doy gracias a mis amigos y compañeros Carlos Alonso Cruz Noguez, Baruo Daniel Aldama Sánchez, Roberto Carlos Mendoza Carvajal, Carlos Humberto Huerta Carpizo, Javier Ferretiz Herrera, Maritza Galiote Juárez; y con especial cariño a Lizbeth Mendoza Reséndiz.

CONTENIDO

| | |
|---|------------------|
| <u>INTRODUCCIÓN.....</u> | <u>6</u> |
| <u>RESUMEN.....</u> | <u>8</u> |
| <u>ABSTRACT</u> | <u>8</u> |
| <u>CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y LA INSTRUMENTACIÓN</u> | <u>9</u> |
| <u>1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ESTRUCTURA</u> | <u>9</u> |
| <u>1.2 CARACTERÍSTICAS LA CIMENTACIÓN</u> | <u>11</u> |
| <u>1.3 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO.....</u> | <u>12</u> |
| <u>1.4 DESCRIPCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN.....</u> | <u>14</u> |
| <u>1.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS REGISTROS SÍSMICOS</u> | <u>16</u> |
| <u>1.6 GENERACIÓN DE SEÑALES</u> | <u>18</u> |
| <u>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS</u> | <u>23</u> |
| <u>2.1 METODOLOGÍA NO PARAMÉTRICA DE ANÁLISIS</u> | <u>23</u> |
| <u>2.1.1 ANÁLISIS ESPECTRAL.....</u> | <u>23</u> |
| <u>2.1.2 METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LAS PROPIEDADES DINÁMICAS.....</u> | <u>26</u> |
| <u>2.1.2.1 Estimación de las frecuencias naturales y formas modales</u> | <u>28</u> |
| <u>2.1.3 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA..</u> | <u>27</u> |
| <u>2.1.3.1 Descomposición del movimiento.....</u> | <u>27</u> |
| <u>2.1.3.2 Cocientes espectrales para identificar efectos ISE.....</u> | <u>31</u> |
| <u>2.1.3.3 El método de Luco.....</u> | <u>31</u> |
| <u>2.1.3.3.1 Frecuencias asociadas a la traslación.....</u> | <u>32</u> |
| <u>2.1.3.3.2 Frecuencias asociadas a la torsión</u> | <u>33</u> |
| <u>2.2 METODOLOGÍA PARAMÉTRICA DE ANÁLISIS.....</u> | <u>34</u> |
| <u>2.2.1 INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS POR VENTANAS USANDO UN PROGRAMA DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....</u> | <u>34</u> |
| <u>2.2.2 MODELOS PARA EL ANÁLISIS DE PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SISTEMA.....</u> | <u>36</u> |
| <u>2.2.2.1 Modelos 3D-SIST Chicos</u> | <u>36</u> |
| <u>2.2.2.2 Modelos 3D-SIST-Grandes</u> | <u>37</u> |
| <u>2.2.3 MODELOS PARA EL ANÁLISIS DE EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA</u> | <u>38</u> |
| <u>2.3 METODOLOGÍA ANALÍTICA PARA ESTIMAR LAS RIGIDECES DINÁMICAS DEL SISTEMA SUELO-CIMENTACIÓN</u> | <u>39</u> |
| <u>2.3.1 MODELOS CON EL PROGRAMA DYNA5</u> | <u>40</u> |
| <u>2.3.2 EL MÉTODO SIMPLIFICADO.....</u> | <u>41</u> |
| <u>CAPÍTULO 3. RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS Y EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA.....</u> | <u>42</u> |
| <u>3.1 ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DEL SISTEMA</u> | <u>42</u> |
| <u>3.1.1 ANÁLISIS ESPECTRAL.....</u> | <u>42</u> |
| <u>3.1.2 ANÁLISIS PARAMÉTRICO.....</u> | <u>52</u> |
| <u>3.2 ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA</u> | <u>58</u> |
| <u>3.2.1 ANÁLISIS ESPECTRAL.....</u> | <u>58</u> |

| | | |
|----------------|--|-----------|
| <u>3.2.2</u> | <u>RESULTADOS DEL MÉTODO DE LUCO</u> | <u>62</u> |
| <u>3.2.3</u> | <u>ANÁLISIS PARAMÉTRICO</u> | <u>64</u> |
| <u>3.2.3.1</u> | <u>Modelo paramétrico de la estructura</u> | <u>65</u> |
| <u>3.2.3.2</u> | <u>Modelo paramétrico de traslación de la base</u> | <u>66</u> |
| <u>3.2.3.3</u> | <u>Modelo paramétrico de cabeceo</u> | <u>66</u> |
| <u>3.2.4</u> | <u>COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS</u> | <u>69</u> |
| <u>3.2.4.1</u> | <u>Comparación de frecuencias entre el sistema y la estructura</u> | <u>70</u> |
| <u>3.2.4.2</u> | <u>Comparación de frecuencias de cabeceo</u> | <u>71</u> |
| <u>3.2.4.3</u> | <u>Comparación con estudios analíticos</u> | <u>72</u> |

COMENTARIOS Y CONCLUSIONES 75

APÉNDICE A . GRAFICAS COMPLEMENTARIAS 77

| | | |
|------------|--|-----------|
| <u>A.1</u> | <u>ESPECTROS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL EL PERIODO NATURAL DEL SUELO</u> | <u>77</u> |
| <u>A.2</u> | <u>ESPECTROS DE NIVELES INTERMEDIOS</u> | <u>80</u> |
| <u>A.3</u> | <u>MODELOS PARAMÉTRICOS IDENTIFICACIÓN CON MODOS SUPERIORES</u> | <u>90</u> |
| <u>A.4</u> | <u>COMPARACIÓN ENTRE LAS SEÑALES MEDIDAS Y CALCULADAS</u> | <u>93</u> |

APÉNDICE B . MEJORAS EN EL PLANTEAMIENTO Y EL PROGRAMA PARA EXTRAPOLACIÓN DE SEÑALES..... 97

APÉNDICE C . MEJORAS EN EL PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE ESPECTROS Y FUNCIONES DE CORRELACIÓN..... 103

| | | |
|------------|--------------------------------------|------------|
| <u>C.1</u> | <u>DESCRIPCIÓN DEL LOS PROGRAMAS</u> | <u>103</u> |
|------------|--------------------------------------|------------|

APÉNDICE D . MEJORAS EN LA HOJA DE CÁLCULO PARA LA VISUALIZACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN..... 106

| | | |
|------------|--|------------|
| <u>D.1</u> | <u>DESCRIPCIÓN DE LA HOJA DE CÁLCULO</u> | <u>106</u> |
| <u>D.2</u> | <u>MEJORAS EN EL TRAZO DE LA FORMA MODAL</u> | <u>107</u> |

REFERENCIAS 110

INTRODUCCIÓN

Para reducir los daños provocados por los movimientos sísmicos, se hace necesario conocer con más profundidad la naturaleza y las características de las sollicitaciones a las que se encontrarán sometidas las estructuras, y estudiar con detalle la respuesta y el comportamiento que tendrán éstas.

Las consideraciones de diseño y las prácticas de construcción bajo las cuales se pretende que las estructuras tengan un comportamiento sísmico adecuado deben estar basadas en trabajos experimentales y de investigación. Entre otros, el propósito de estos estudios es la estimación de las propiedades dinámicas de las estructuras, las cuales son parámetros de suma importancia en su respuesta sísmica. De manera general, es posible estimar dichas propiedades dinámicas mediante dos tipos de enfoque: analítico y experimental.

La instrumentación de edificios y el análisis de los registros obtenidos, ya sea de un evento sísmico o de una prueba de vibración ambiental, es una técnica usada para la determinación de las propiedades dinámicas. Mediante el análisis de registros sísmicos es posible conocer la respuesta del suelo y la forma en que las estructuras se comportan antes, durante y después de ser afectadas por cualquier evento. El análisis de registros de vibración ambiental sirve para describir el comportamiento en el rango elástico lineal de las estructuras. A partir de estos registros y haciendo uso de técnicas de identificación de sistemas es posible identificar las propiedades dinámicas de una estructura, como las frecuencias naturales de vibración, los porcentajes de amortiguamiento crítico, formas modales y porcentajes de participación.

Las investigaciones realizadas en otros países provenientes de edificios instrumentados han sido aprovechadas; sin embargo, es necesario instrumentar edificios en nuestro medio debido a las características locales de los suelos donde están desplantados y de los sistemas estructurales propios del medio. De esta forma contribuir a la investigación local y a mejorar los criterios de diseño y evaluación estructural.

Otro aspecto importante de la instrumentación es el estudio de la relación existente entre la estructura y el suelo en el que se encuentra. El análisis de la información proveniente de edificios instrumentados ha mostrado que es primordial la consideración de los efectos de interacción suelo-estructura (ISE) para poder estimar adecuadamente la respuesta estructural (Murià Vila *et al.*, 1997 y 2000a).

Los efectos ISE en la respuesta sísmica de un edificio fueron abordados por primera vez por Martel en 1940. En los años 50 Merritt y Housner examinaron de nuevo este efecto con datos obtenidos en un edificio y en su cercanía (Roësset, 2003). Más adelante el interés en el estudio de los efectos ISE fue impulsado por los grandes proyectos de centrales nucleares en las décadas de los sesentas y setentas. En la actualidad se ha llegado a comprender con claridad el fenómeno ISE y se han generado diversas metodologías para tomarlo en cuenta. El reto es que los efectos ISE sean una realidad en la práctica profesional por medio de técnicas de fácil aplicación.

El estudio experimental de los efectos ISE en México ha sido abordado anteriormente (Mendoza *et al.*, 1991; Meli *et al.*, 1998; Murià-Vila *et al.*, 2004b; Correa y Murià-Vila, 2005; Cruz *et al.*, 2006a) y actualmente el reglamento de construcciones del DF en sus normas técnicas complementarias cuenta con un apartado dedicado a los efectos ISE. Sin embargo, en la práctica profesional no se toman en cuenta, salvo en muy contadas ocasiones. Una de las razones por las cuales no se realiza el análisis de los efectos ISE es porque se requiere de cálculos adicionales complicados, tales como la estimación de las funciones de impedancia de las cimentaciones.

El objetivo de este trabajo consiste en la estimación de las propiedades dinámicas y los efectos de ISE del edificio TC, mediante el análisis de registros sísmicos y pruebas de vibración ambiental. Para obtener las características dinámicas de la estructura se usarán métodos paramétricos y no paramétricos de análisis de señales.

Se hace un estudio de los efectos de ISE valiéndose de datos experimentales por medio de análisis espectral, con el método de Luco (1980) y modelos paramétricos modales (Beck y Jennings, 1980). También se hará un análisis de la cimentación con el programa comercial Dyna5 y se empleará el método simplificado propuesto por Dobry y Gazetas (1988) en la obtención de las rigideces dinámicas del grupo de pilotes. Posteriormente los resultados se compararán entre sí y con los las rigideces experimentales.

En la primera parte del trabajo se presentan la localización del edificio, sus características estructurales y constructivas, el tipo de cimentación empleada y las características del suelo en el que se encuentra desplantado. Posteriormente 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 *et al*, 2001; Palacios, 2003; Taborda, 2003; Correa 2005). Finalmente se presentan los resultados, las comparaciones entre ellos y conclusiones. Asimismo se presentan mejoras y contribuciones en las herramientas de análisis de registros sísmicos y de VA (Cruz *et al*, 2006b y 2006c; Murià-Vila *et al*, 2006).

Los resultados, propiedades de la estructura y de los efectos ISE, que se presentan en este trabajo, pueden ser una guía para la elaboración de modelos de la estructura y para las posteriores comparaciones que se realicen con estudios sobre edificios instrumentados en la ciudad de México.

RESUMEN

En este trabajo se presenta la determinación experimental de las principales propiedades dinámicas de un edificio alto en la ciudad de México y los efectos de interacción suelo-estructura (ISE). Los análisis se realizan a partir de información obtenida a partir de registros sísmicos y pruebas de vibración ambiental.

El estudio de los parámetros dinámicos del edificio se lleva a cabo mediante análisis espectral convencional y la identificación de sistemas por medio de un método de superposición modal. Estas mismas técnicas, junto con un método semi-empírico, son usadas para el análisis de los efectos ISE en lo que respecta a la determinación de las propiedades del movimiento de la cimentación. También se determinan las rigideces del suelo-cimentación por medio de procedimientos analíticos y los resultados son comparados con los experimentales.

Palabras clave: Propiedades dinámicas de edificios, interacción suelo estructura.

ABSTRACT

Main dynamic properties of a tall building in Mexico City and the soil-structure interaction effects (SSI) are presented. The analysis is based on the information of acceleration records from earthquake motions and vibration ambient test.

Well known methods of spectral analysis and system identification are used for estimate the dynamic parameters of the building. The same techniques, along with a semi-empiric method are apply in the study of the foundation movements. Also the soil-foundation dynamic stiffness are calculate and compare with the experimental results.

Keywords: Dynamic properties of buildings, soil-structure interaction.

Capítulo 1 . DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y LA INSTRUMENTACIÓN

1.1 Características de la estructura

El edificio TC esta localizado en la ciudad de México en terreno blando (arcillas compresibles), tiene 18 niveles por encima del nivel de calle. Se construyó entre los años de 1967 y 1968 y el diseño de la estructura se hizo conforme al RCDF en su versión de 1966. El uso del inmueble actualmente se destina principalmente para oficinas gubernamentales. El edificio se encuentra muy cerca de la estación SCT, una de las estaciones de monitoreo sísmico en las cuales se registró el sismo de septiembre de 1985.

El edificio es de concreto reforzado colado *in situ*, con estructuración a base de traveses, columnas y muros de concreto reforzado, sistemas de piso de losa plana aligerada, y muros de mampostería. Los sistemas trabe-columna en conjunto forman marcos que trabajan en direcciones ortogonales, en cada una de las plantas del edificio. Está compuesto por un cajón de cimentación, un nivel de sótano, planta baja, tres niveles de planta tipo A (N1, N2 y N3), trece niveles con planta tipo B (N4 a AZ) y dos niveles más sobre la azotea (AP1 y AP2).

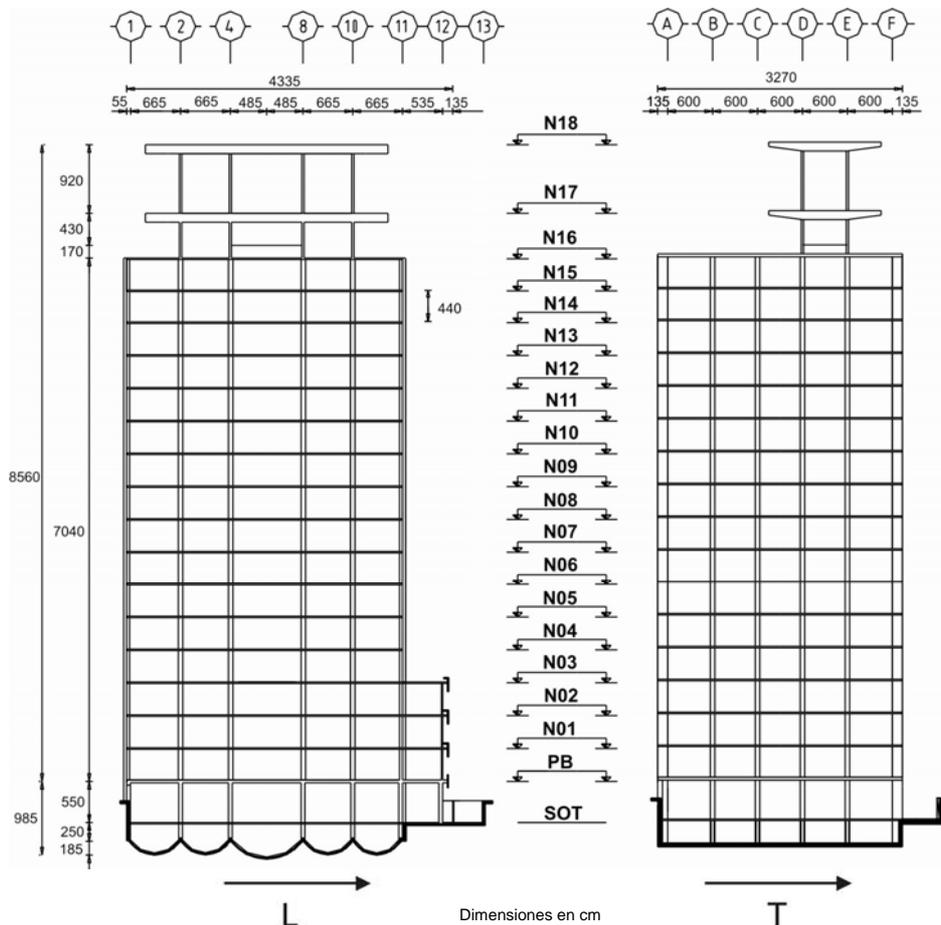


Figura 1.1 Cortes estructurales del edificio en dirección longitudinal y transversal

Si se toma la elevación del nivel de sótano como referencia, el cajón de cimentación está desplantado a 3.75 m de profundidad. El entrepiso del nivel de sótano y la planta baja mide 5.5 m. La altura típica de entrepiso desde la planta baja hasta el nivel 16 es de 4.40 m, y para los niveles adicionales AP1 y AP2, de 6.00 y 9.20 m respectivamente. La altura del edificio, tomando nuevamente el sótano como referencia, es de 91.1 m. En la figura 1.1 se muestran los cortes estructurales del edificio.

La base tiene forma rectangular, con 36.3 m en la dirección que se denominará longitudinal (L), dirección norte-sur, y 30.0 m en la dirección convenida como transversal (T), este-oeste. El nivel de sótano tiene forma rectangular con 46.55 m en dirección L y 35.0 m en dirección T. El nivel de planta baja tiene también forma rectangular con 46.55 m en dirección L y 35.0 m en dirección T, mientras que los niveles 1 y 2 tienen forma de H con 42.85 m en dirección L y 30.0 m en dirección T. El nivel 3 tiene nuevamente forma rectangular con 42.850 m en dirección L y 30.0 m en dirección T; los niveles 4 a 16 tienen forma de H con 36.30 m en dirección L y 30.0 m en dirección T. Los dos niveles apéndice, N17 y N18, tienen forma trapecial de 32.00 m en dirección L y 15.05 m en dirección T.

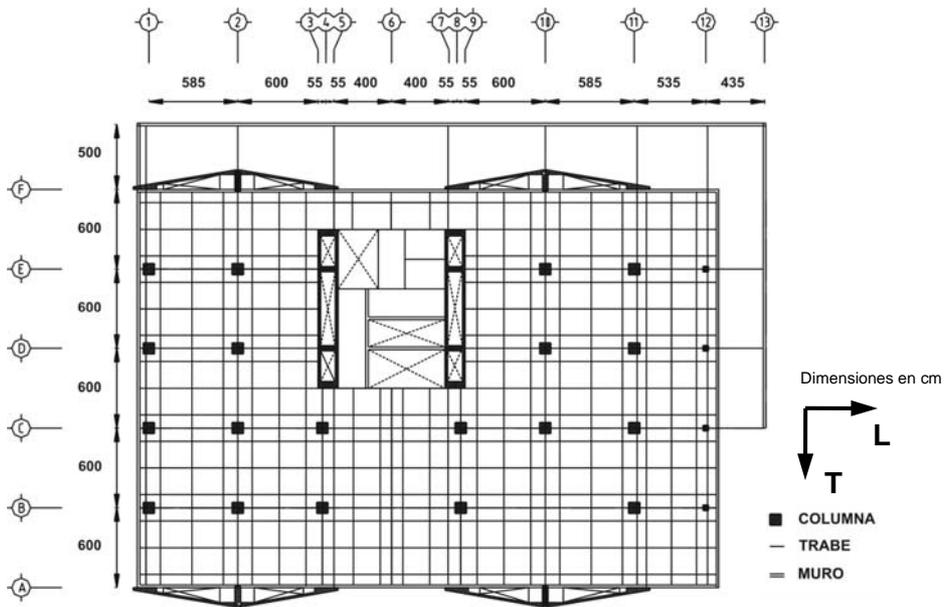


Figura 1.2 Planta baja

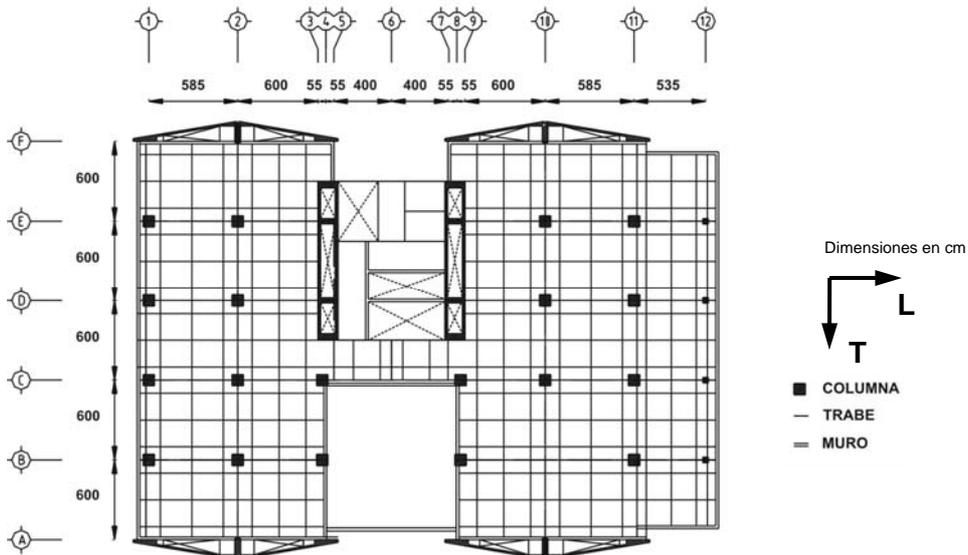


Figura 1.3 Planta tipo de los niveles 1 y 2

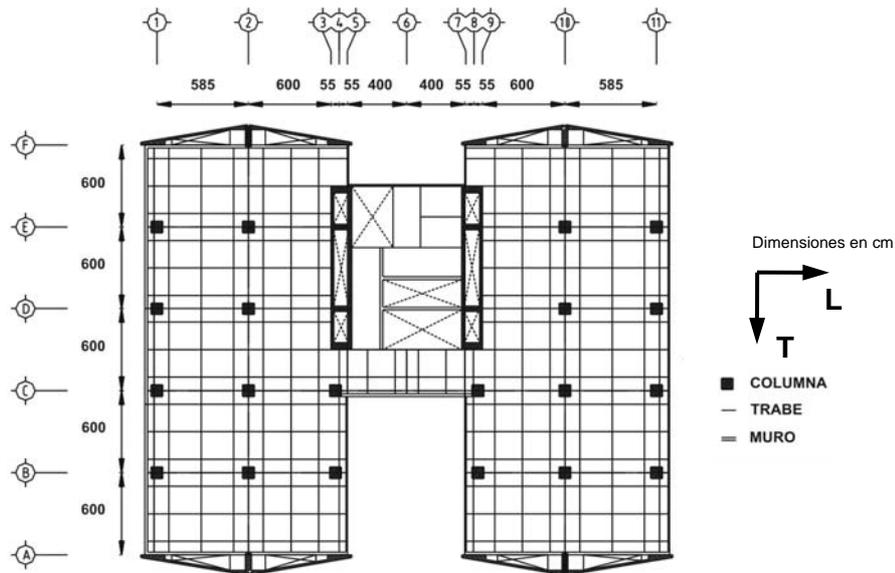


Figura 1.4 Planta tipo niveles 4 a 15

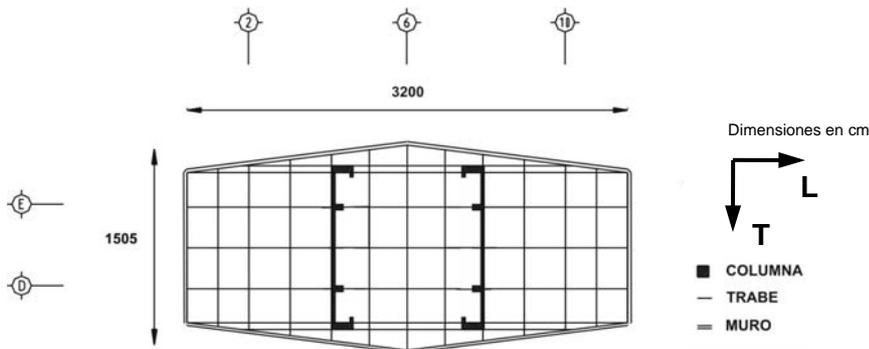


Figura 1.5 Planta tipo de los niveles 17 y 18

En cuanto al uso por nivel que tiene la estructura, en el sótano se encuentran las instalaciones para dar servicios al inmueble, tales como bombas de agua, caldera y generadores auxiliares de energía; la planta baja se encuentra destinada aproximadamente en un setenta por ciento para el vestíbulo principal, y el área restante es ocupada por la zona de elevadores, escaleras y menores áreas de oficinas; los niveles del uno al quince tienen como destino al uso de oficinas y en mucho menor grado zonas de equipo; el nivel 16 se destina al manejo de equipo ligero, como motores de elevadores y aparatos de aire acondicionado; los niveles 17 y 18 se encuentran destinados al manejo de equipos de telecomunicación, como antenas y aparatos de radio.

Para una descripción más detallada de la estructuración y cargas en el edificio TC se puede consultar el dictamen de seguridad estructural de Trigos (1998) o el trabajo de Ferretiz (2007).

1.2 Características la cimentación

El proyecto original de cimentación del edificio TC comprendía un sistema de cajón y pilotes para transmitir las cargas de la superestructura al suelo. Una parte de la descarga la toma un cajón de cimentación semicompensado, con una excavación de 6.5m y un sistema de bóveda invertida formada por cascarones semicilíndricos, contratrabes y muros de concreto, y otra parte de la descarga la toman 272 pilotes de tipo punta penetrante (40 x 40 cm) con tramo inferior de acero, hincados hasta la primera capa dura del suelo compresible

(aproximadamente a 32 m de profundidad), distribuidos en toda la planta de cimentación, como se muestra en la figura 1.6.

Se realizaron dos recimentaciones adicionales con el fin de solucionar problemas de hundimiento e inclinación principalmente en los costados sur y poniente de la cimentación. La primera recimentación se efectuó en el año de la terminación del edificio, 1967, y la segunda se inició en 1979 y se concluyó en 1982.

La primera modificación realizadas a la cimentación se trató de una adición de pilotes electrometálicos en los costados sur y poniente de la cimentación. Para la segunda recimentación se construyó un cajón continuo, de 5.0 m de ancho en el lado poniente y de 3.0 m de ancho en la mitad del lado norte, este cajón se encuentra desplantado a 4.5 m de profundidad y está apoyado sobre 51 pilotes de características semejantes a los originales, hincados a una profundidad de 35.5 m. Sin embargo, a pesar de las dos recimentaciones, los problemas de hundimiento e inclinación mencionados anteriormente no han sido completamente resueltos hasta el momento (Moreno-Pecero *et al*, 1998).

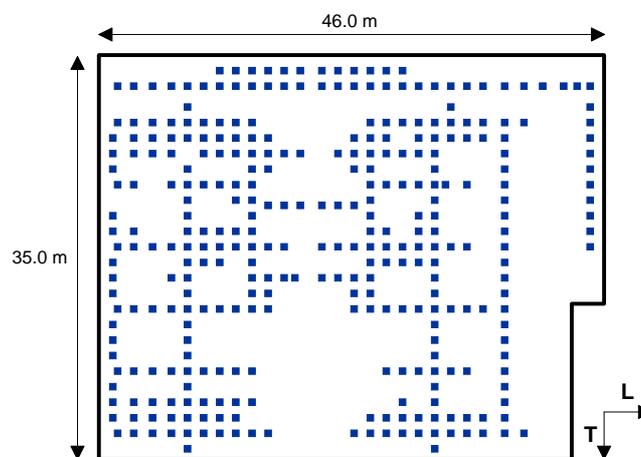


Figura 1.6 Distribución de pilotes en la cimentación

1.3 Características del suelo

El suelo de cimentación inicia con algunos rellenos y mezcla de arcillas, limos y arenas, para posteriormente encontrar entre los 3.0 y 7.0 m de profundidad un manto de limo gris claro con lentes de arena volcánica, que antecede a la primera formación arcillosa, una arcilla muy blanda con intercalaciones de arenas finas y vetas de vidrio volcánico, que se extiende hasta encontrar la primera capa dura, entre los 32.0 a 36.0 m, formada por arenas limosas y limo arenosas muy compactas, con contenido de agua cercano al 50% y resistencia a la penetración promedio mayor a los 50 golpes. Los ensayos de probetas de las arenas limosas en la cámara triaxial con pruebas consolidadas rápidas, señalaron que el ángulo de fricción interna era de 33° y una cohesión despreciable, mientras que en los materiales limo arenosos el ángulo de fricción interna resultó de 21° con una cohesión de 255 kN /m² (Moreno *et al*, 1998).

El perfil estratigráfico es una simplificación de los resultados de diversos estudios de mecánica de suelos realizados en el sitio y sus cercanías (Ovando, 1986; Moreno *et al*, 1998; Ovando, 2004). El perfil de velocidad de ondas de corte (V_s) fue calculado a partir del perfil de resistencia de punta q_c obtenido con una prueba de cono y complementado con información del perfil de velocidad de ondas de corte en la estación SCT (Ovando, 2000).

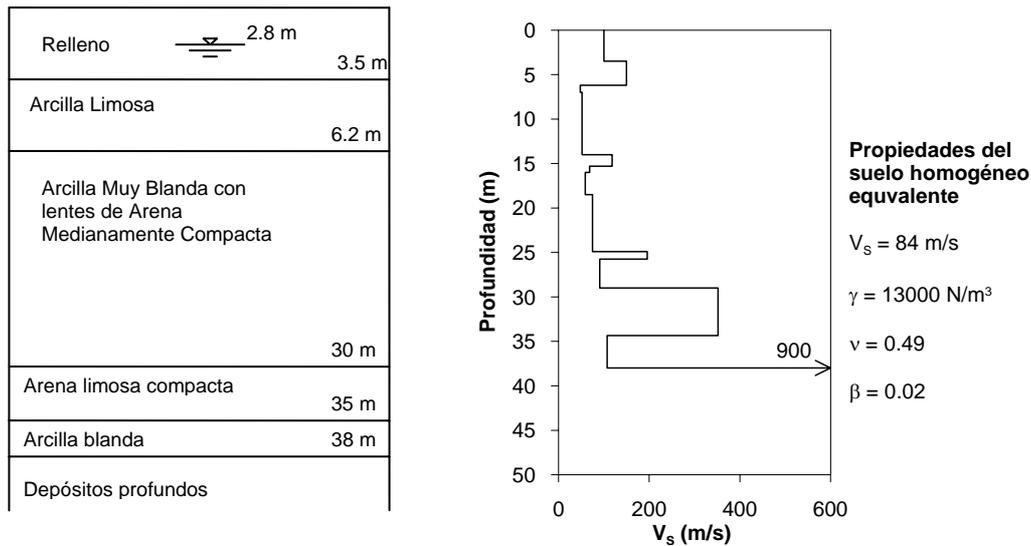


Figura 1.7 Perfil estratigráfico y perfil de velocidad de ondas de corte.

Para el estudio analítico de la cimentación es importante tener un perfil V_s representativo del sitio donde está desplazado el edificio. Ya que la información del suelo en sitio y sus cercanías no es tan reciente como se quisiera y que las propiedades mecánicas del suelo varía debido a la consolidación del mismo (Ovando *et al*, 2003) fue necesario validar el perfil V_s . Por lo tanto se comparó el periodo natural del suelo calculado con el método de Gomez (2000) y el perfil V_s simplificado, con el que se obtiene mediante el análisis de registros sísmicos.

Para la estimación del periodo dominante del suelo se calcularon los espectros de respuesta y los cocientes de Nakamura (Nakamura, 1989) para registros del edificio TC y de la estación SCT. También se calculó la función de transferencia del suelo con registros de pozo.

Los resultados del cálculo del periodo dominante en el sitio de desplante del edificio TC y de la estación SCT, cuya distancia entre ellos es aproximadamente 200 m, se resumen en la tabla 1.1. Como referencia se presenta la magnitud del evento y la aceleración máxima en terreno. Los espectros en donde se obtuvieron estos valores se presentan el apéndice A. Los valores calculados difieren al que se obtiene a partir de curvas de isoperiodo en las NTC del RDF, el cual es de 2.1 s.

Tabla 1.1 Determinación del periodo dominante del suelo para varios eventos sísmicos

| Estación | Fecha | Magnitud Me | Componente | Aceleración máxima en terreno (Gal) | Periodo dominante (s) | | | |
|------------|------------|-------------|------------|-------------------------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-----------|
| | | | | | Cociente de Nakamura | | Espectro de respuesta | |
| | | | | | Intervalo | T puntual | Intervalo | T puntual |
| SCT | 19/09/1985 | 8.1 | L | 94 | 1.9 - 2.2 | 2.01 | 2.08 - 2.6 | 2.08 |
| | | | T | 162 | | 2.02 | | 2.05 |
| | 30/09/1999 | 7.6 | L | 35 | 1.98 - 2.18 | 2.17 | 1.61 - 2.27 | 2.1 |
| | | | T | 20 | | 2.07 | | 2.32 |
| | 08/10/2001 | 6.1 | L | 6 | 1.3 - 2.41 | 2.05 | 1.31 - 2.2 | 2.2 |
| | | | T | 6 | | 2.05 | | 1.96 |
| 22/01/2003 | 7.6 | L | 22 | 1.62 - 2.02 | 1.86 | 1.66 - 1.88 | 1.69 | |
| | | T | 18 | | 1.84 | | 1.84 | |
| 01/01/2004 | 6.3 | L | 4 | 1.9 - 2 | 1.90 | 1.52 - 2.07 | 2.04 | |
| | | T | 5 | | 1.90 | | 1.84 | |
| TC | 14/06/2004 | 5.8 | L | 9 | 1.66 - 2.1 | 2.05 | 1.53 - 1.9 | 1.67 |
| | | | T | 8 | | 1.69 | | 1.62 |
| | 18/08/2004 | 5.7 | L | 2 | 1.61 - 1.78 | 1.64 | 1.63 - 1.79 | 1.63 |
| | | | T | 2 | | 1.74 | | 1.77 |
| | 28/10/2004 | 4.6 | L | 2 | 1.48 - 1.64 | 1.50 | 1.49 - 1.59 | 1.52 |
| | | | T | 3 | | 1.50 | | 1.55 |

Existen algunas diferencias entre los periodos calculados, el problema es que los registros analizados son variados, en cuanto a intensidad, lugar y fecha de registro. Entre las conclusiones de este análisis se puede decir que existen diferencias entre el sitio SCT y el sitio de desplante del edificio TC y que hay una disminución del periodo dominante del suelo, la cual se podría explicar por la consolidación.

1.4 Descripción de la instrumentación

La instrumentación permanente consta de 23 acelerómetros uniaxiales Episensor (FBA-ES-U) conectados a dos registradores digitales Altus K2 de 16 bites y 12 canales cada uno. Adicionalmente se tienen dos acelerómetros triaxiales Episensor, un FBA-ES-T y un FBA-ES-SB, también conectados un registrador Altus K2 de 16 bites y 6 canales. El sistema de captura esta configurado para un funcionamiento maestro-esclavo el cual permite que se activen simultáneamente los tres registradores (Alcántara *et al*, 2004).

Los sensores uniaxiales se encuentran dentro de la estructura, distribuidos en los niveles apéndice, azotea, nivel 12, 7, 3 y sótano, en las direcciones L, T y V. El sensor ES-T se instaló en el terreno a 25 m del centro del edificio, orientado en las direcciones ortogonales. De igual forma el sensor ES-SB de pozo se ubicó debajo del de terreno a nivel de los estratos profundos.

En la tabla 1.2 se enlistan los registros de la instrumentación, así como su ubicación y orientación. En la figura 1.8 se muestra la posición de los sensores de la instrumentación permanente, las flechas indican la orientación del sensor.

Tabla 1.2 Registros derivados de la instrumentación

| Clave | Nivel | Ubicación | Orientación | Nombre |
|-------|---------------------|------------------|-------------|-----------|
| 01 | 16 (azotea) | centro | L | AZC (L) |
| 02 | 16 (azotea) | centro | T | AZC (T) |
| 03 | 12 | centro | L | N12C (L) |
| 04 | 7 | centro | L | N7C (L) |
| 05 | 3 | centro | L | N3C (L) |
| 06 | 3 | esquina noreste | T | N3NE (T) |
| 07 | 3 | esquina suroeste | T | N3SO (T) |
| 08 | sótano | centro | L | SOTC (L) |
| 09 | sótano | centro | T | SOTC (T) |
| 10 | terreno | campo libre | T | TERR (T) |
| 11 | terreno | campo libre | L | TERR (L) |
| 12 | terreno | campo libre | V | TERR (V) |
| 13 | 16 (azotea) | esquina noreste | T | AZNE (T) |
| 14 | 12 | esquina noreste | T | N12NE (T) |
| 15 | 7 | esquina noreste | T | N7NE (T) |
| 16 | 16 (azotea) | esquina suroeste | T | AZSO (T) |
| 17 | 12 | esquina suroeste | T | N12SO (T) |
| 18 | 7 | esquina suroeste | T | N7SO (T) |
| 19 | sótano | esquina noreste | V | SOTNE (V) |
| 20 | sótano | esquina noreste | T | SOTNE (T) |
| 21 | sótano | esquina sureste | V | SOTSE (V) |
| 22 | sótano | esquina suroeste | T | SOTSO (T) |
| 23 | sótano | esquina suroeste | V | SOTSO (V) |
| 24 | 18 (apéndice 2) | lateral noreste | L | APNE (L) |
| 25 | 18 (apéndice 2) | lateral noreste | T | APNE (T) |
| 26 | 18 (apéndice 2) | lateral suroeste | T | APSO (T) |
| 27 | 45m bajo el terreno | pozo | T | POZ (T) |
| 28 | 45m bajo el terreno | pozo | L | POZ (L) |
| 29 | 45m bajo el terreno | pozo | V | POZ (V) |

Durante la etapa de planeación de la instrumentación se realizó una inspección visual y una vibración ambiental preliminar con equipo portátil (VA1). La VA1 fue realizada con el objetivo de determinar las propiedades dinámicas del edificio TC, así como para establecer la ubicación de la instrumentación sísmica permanente. Se realizaron 22 pruebas con ocho acelerómetros uniaxiales, en total hubo 22 diferentes puntos instrumentados en los niveles 18, 16, 12, 7, 3, sótano y terreno (Murià-Vila *et al*, 2004a).

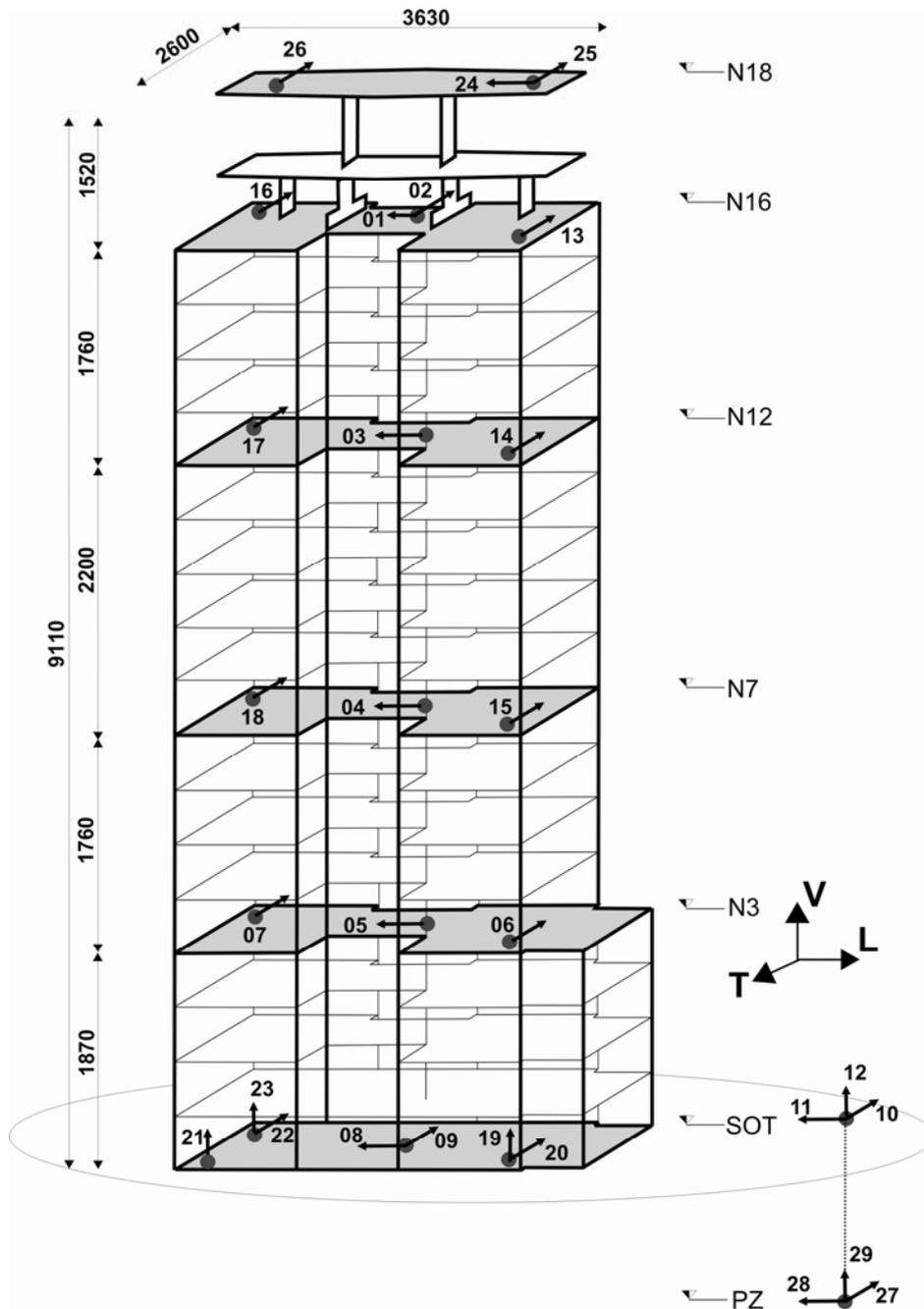


Figura 1.8 Ubicación y orientación de los sensores de la instrumentación permanente

Antes de completarse la instrumentación sísmica permanente en el edificio TC se instaló una instrumentación provisional (figura 1.9). La cual constó de tres sensores triaxiales, en azotea sótano y terreno, para registrar las aceleraciones en tres componentes ortogonales (L, T y V). Los sensores de azotea y sótano son IDS-3602A programado para una captura a 250 muestras por segundo. El sensor de terreno, de menor resolución, es un RDN-2 que captura a 100 muestras por segundo. El sistema de disparo es independiente.

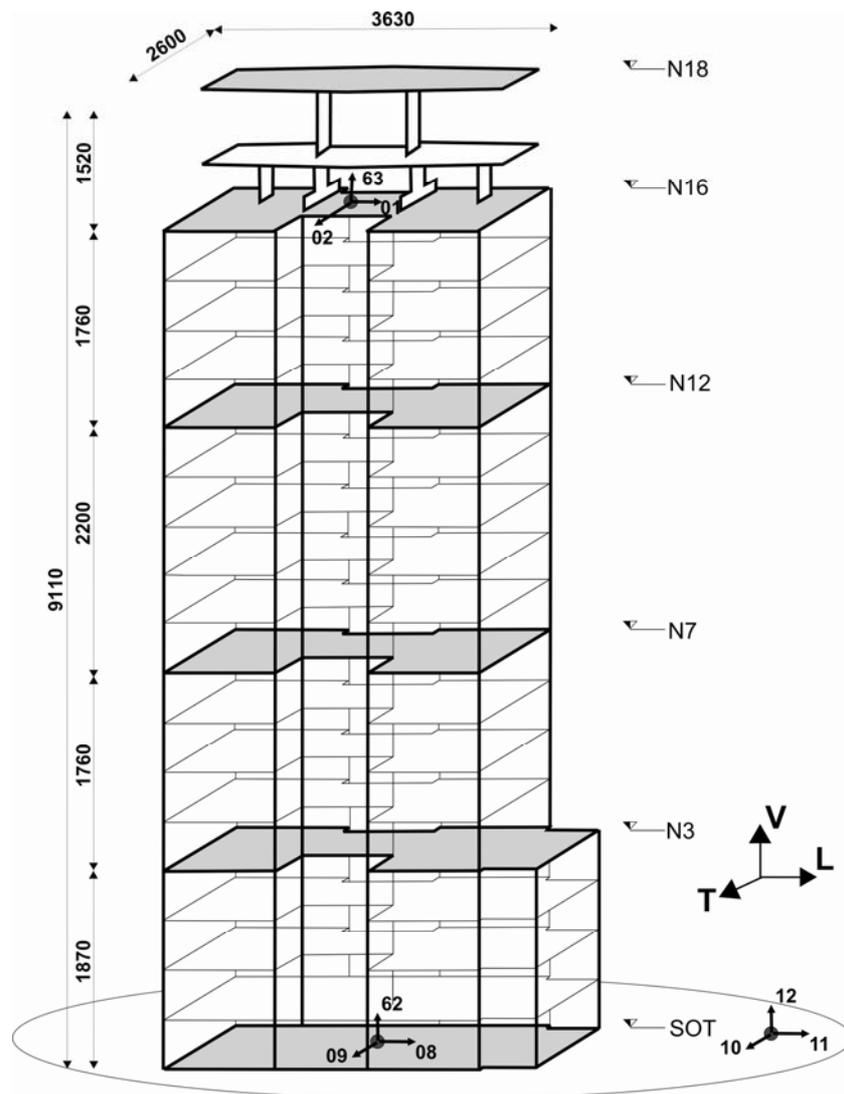


Figura 1.9 Ubicación y orientación de los sensores de la instrumentación provisional

1.5 Características de los registros sísmicos

Desde mediados de junio de 2004 hasta finales de 2005 se han registrado algunos sismos de baja intensidad. En este trabajo se analizarán los registros de tres sismos ocurridos en el año 2004 (eventos 04-1, 04-2, 04-3). Los primeros registrados en las costas de Oaxaca en la zona de subducción del pacífico mexicano y el último en el interior del estado de Guerrero. En la figura 1.10 se muestra la localización de los epicentros con respecto al edificio y en la tabla 1.3 se muestran las características principales de los sismos.

Con la instrumentación provisional se registró el sismo más intenso de los eventos analizados (04-1). Durante el sismo 04-1 hubo problemas de calidad, en especial con el sensor del terreno por lo cual y para no descartar información importante que pueda proporcionar este evento se trabajó con señales diezgadas y cortadas.

Los eventos sísmicos 04-2 y 04-3 se registraron con la instrumentación permanente, también con esta instrumentación se realizó una vibración ambiental (VA3). Durante el sismo 04-2 la instrumentación permanente no estaba completa, aun no se instalaban el sensor de pozo, por lo que para este evento no hay registros en este punto.

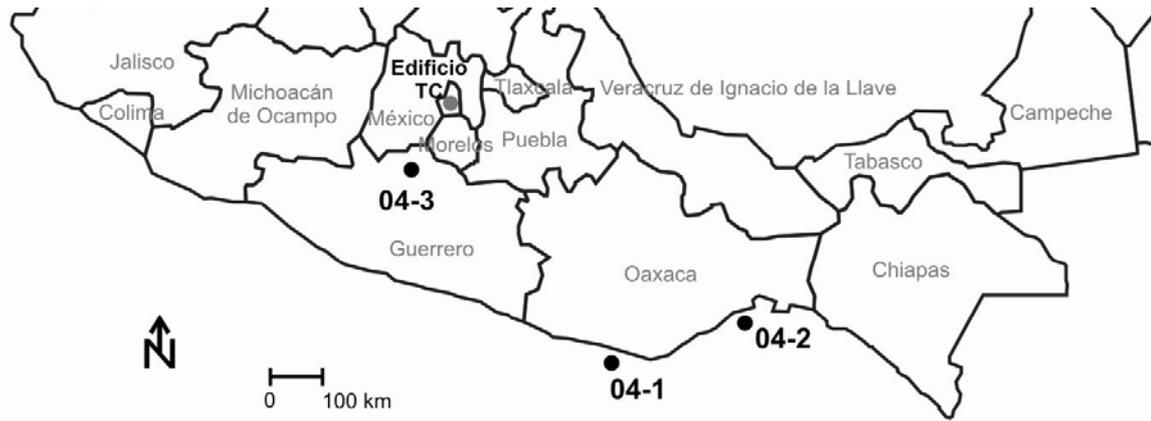


Figura 1.10 Localización de los epicentros de los sismos analizados

Tabla 1.3 Características principales de los sismos

| Evento | Ubicación | Fecha | Localización | Magnitud | Distancia Epicentral (km) | Profundidad focal (km) |
|--------|--------------------|------------|------------------|----------|---------------------------|------------------------|
| 04-1 | Pinotepa Oaxaca | 14/06/2004 | 16.03 N, 97.84 O | 5.8 | 396 | 10 |
| 04-2 | Salina Cruz Oaxaca | 18/08/2004 | 16.33 N, 95.14 O | 5.7 | 560 | 66 |
| 04-3 | Iguala Guerrero | 28/10/2004 | 18.34 N, 99.74 O | 4.6 | 134 | 51 |

La tabla anterior muestra las características generales de los sismos, pero también es importante conocer los efectos de sitio. Los parámetros que sirven para caracterizar el sismo en el sitio donde se registró están relacionados con la intensidad del sismo, aceleraciones máximas e intensidad de Arias (Arias, 1970), los cuales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1.4 Características en sitio de los sismos

| Evento | Duración del los registros analizado (s) | Intensidad de Arias (cm/s) | Aceleración máxima en el terreno (cm/s ²) | | | Aceleración máxima en el sótano (cm/s ²) | | | Aceleración máxima en la azotea (cm/s ²) | |
|--------|--|----------------------------|---|------|------|--|------|------|--|-------|
| | | | L | T | V | L | T | V | L | T |
| 04-1 | 90 | 1.040 | 8.70 | 7.73 | 4.02 | 5.75 | 7.10 | 0.87 | 13.59 | 11.07 |
| 04-2 | 119 | 0.076 | 1.81 | 1.70 | 0.64 | 1.31 | 1.56 | 0.42 | 2.91 | 3.24 |
| 04-3 | 153 | 0.045 | 2.08 | 2.57 | 2.09 | 1.00 | 1.14 | 1.13 | 2.71 | 2.31 |

Los tres sismos son de muy baja intensidad. La intensidad de Arias apenas fue mayor que la unidad en uno de los eventos. Como referencia en la estación SCT el sismo del 85 tuvo una intensidad de Arias de aproximadamente 344 cm/s.

El sismo de mayor magnitud (04-1) es el más intenso, pero el sismo 04-2 cuya magnitud es muy similar al anterior es menor en intensidad. Por el contrario los sismos 04-2 y 04-3 son diferentes en magnitud pero semejantes en intensidad.

Antes de poder analizar los registros y comenzar el estudio de edificio es necesario polarizar y sincronizar las señales, es decir, estar en el sentido correcto de acuerdo a la dirección de los componentes ortogonales (figura 1.8) y empezar en el mismo instante de tiempo. Las señales provenientes de los registros sísmicos tienen un filtrado pasa baja de 30 o 50 Hz dependiendo del tipo de registrador y se les hace una corrección línea base con referencia a las primeras 100 muestras.

En la figura 1.11 se comparan los registros del terreno en las direcciones L, T y V para los eventos sísmicos en cuestión. De igual forma en las figuras 1.12 y 1.13 se muestran los registros de sótano y azotea respectivamente.

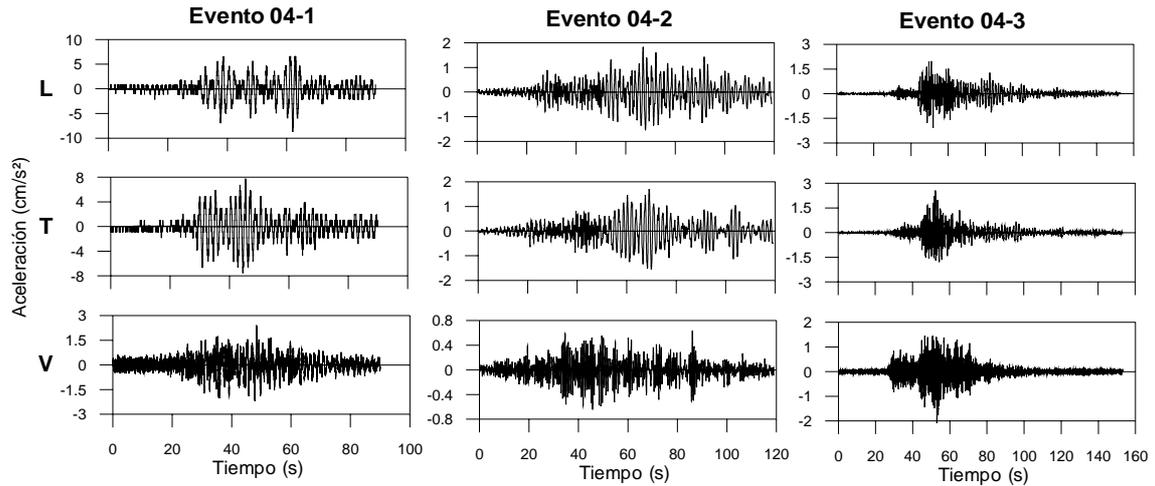


Figura 1.11 Comparación de los registros de la estación de campo

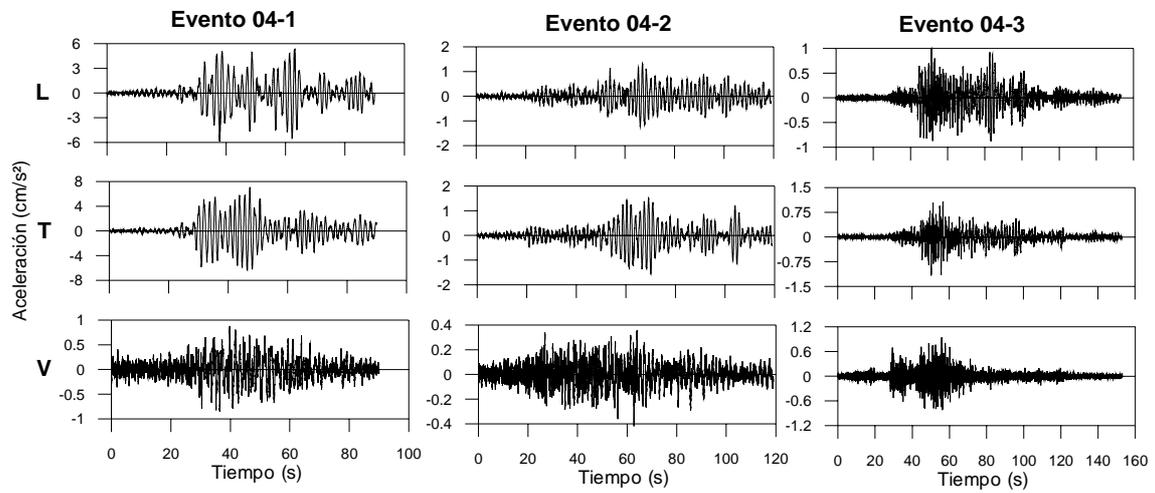


Figura 1.12 Comparación de los registros de la estación sótano

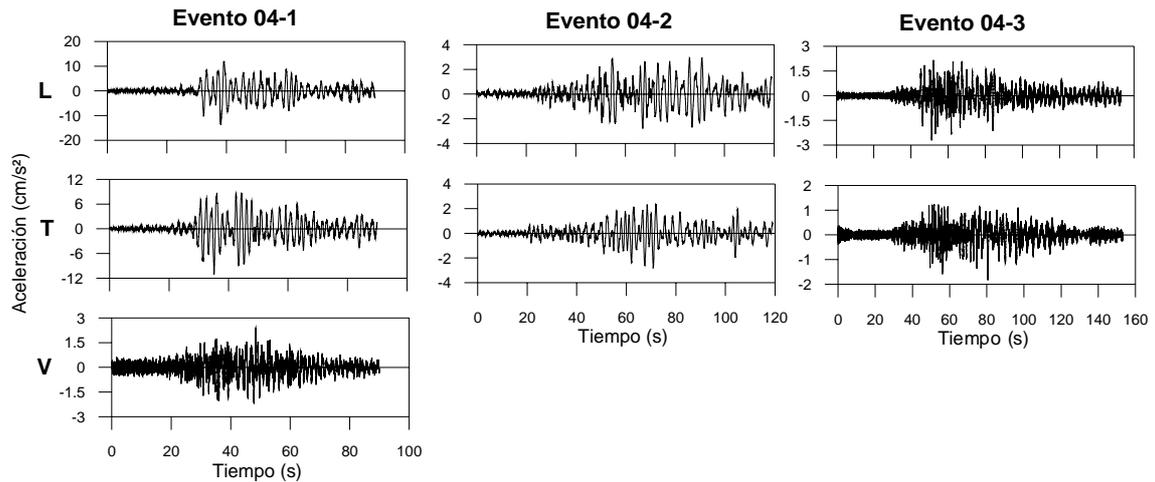


Figura 1.13 Comparación de los registros de la estación de azotea

1.6 Generación de señales

Idealmente se intenta que los sensores en los niveles instrumentados estén ubicados en el centro geométrico para identificación de las propiedades dinámicas en los componentes traslacionales, o bien en los extremos para el componente rotacional. Por razones de

distribución de espacios en el edificio no siempre es posible colocar los sensores en estas posiciones.

El estudio de edificio puede hacerse sin tener registros en las ubicaciones óptimas, aunque es conveniente conocer el movimiento de algunos puntos estratégicos para tener señales con las cuales se puede hacer la identificación de parámetros dinámicos reduciendo el efecto del acoplamiento de los movimientos.

Si se considera el sistema de piso como infinitamente rígido, y se puede calcular el movimiento del plano en cualquier instante de tiempo por medio de las señales registradas, entonces también se puede calcular el movimiento de todos los puntos dentro del plano. De esta forma se pueden extrapolar señales horizontales y verticales en cualquier punto del plano donde se encuentren los sensores.

Para estimar las propiedades dinámicas en los componentes traslacionales se extrapolan señales horizontales en los centros geométricos donde los efectos de torsión son menores; por el contrario cuando se estudia el movimiento de torsión, se generan señales en los extremos del nivel. En cuanto a señales verticales, estas se generan en los cuatro costados del sótano del edificio para su uso en la determinación del cabeceo.

En trabajos anteriores (Taborda, 2003) se ha utilizado señales extrapoladas en el análisis sísmico de edificios, sin embargo la metodología planteada para la extrapolación horizontal solo es aplicable a un arreglo particular de señales. En este trabajo se propone una metodología general para la extrapolación de señales horizontales (Cruz *et al*, 2006b) la cual se basó en planteamientos anteriores (Taborda y Murià-Vila, 2002a). La metodología para extrapolación de señales verticales es la misma que en el trabajo previo. Este nuevo procedimiento y su implementación en un programa de cómputo son abordados a detalle en el apéndice B.

Las características de la instrumentación sísmica permanente permiten la generación de señales horizontales en cualquier nivel instrumentado del edificio y la extrapolación de señales verticales del sótano. Para los eventos 04-2 y 04-3 se trabajó con señales en los componentes L y T extrapoladas en el centro geométrico de los niveles instrumentados, señales en T extrapoladas en los extremos norte y sur de las plantas, y en el sótano se extrapolaron señales verticales en el centro geométrico, en los extremos norte, sur, este y oeste. En la tabla 1.5 se enlistan los registros de la instrumentación así como su posición y orientación. Cabe mencionar que la ubicación de los sensores durante la VA1 fue muy similar a la posición de las señales extrapoladas.

Tabla 1.5 Registros generados con la extrapolación

| Clave | Nivel | Ubicación | Orientación | Nombre |
|-------|-------------|---------------------------------|-------------|-------------|
| 30 | 16 (azotea) | centro geométrico planta tipo H | L | AZCEN (L) |
| 31 | 16 (azotea) | centro geométrico planta tipo H | T | AZCEN (T) |
| 32 | 16 (azotea) | extremo lateral norte | T | AZLNOR (T) |
| 33 | 16 (azotea) | extremo lateral sur | T | AZLSUR (T) |
| 34 | 12 | centro geométrico planta tipo H | L | N12CEN (L) |
| 35 | 12 | centro geométrico planta tipo H | T | N12CEN (T) |
| 36 | 12 | extremo lateral norte | T | N12LNOR (T) |
| 37 | 12 | extremo lateral sur | T | N12LSUR (T) |
| 38 | 7 | centro geométrico planta tipo H | L | N7CEN (L) |
| 39 | 7 | centro geométrico planta tipo H | T | N7CEN (T) |
| 40 | 7 | extremo lateral norte | T | N7LNOR (T) |
| 41 | 7 | extremo lateral sur | T | N7LSUR (T) |
| 42 | 3 | centro geométrico planta tipo H | L | N3CEN (L) |
| 43 | 3 | centro geométrico planta tipo H | T | N3CEN (T) |
| 44 | 3 | extremo lateral norte | T | N3LNOR (T) |
| 45 | 3 | extremo lateral sur | T | N3LSUR (T) |
| 46 | 3 | centro geométrico del nivel | L | N3CG (L) |
| 47 | 3 | centro geométrico del nivel | T | N3CG (T) |
| 48 | 3 | extremo norte del nivel | T | N3LN (T) |
| 49 | 3 | extremo sur del nivel | T | N3LS (T) |
| 50 | sótano | centro geométrico planta tipo H | L | SOTCEN (L) |

| | | | | |
|----|-----------------|---------------------------------|---|------------|
| 51 | sótano | centro geométrico planta tipo H | T | SOTCEN (T) |
| 52 | sótano | extremo lateral norte | T | SOTNOR (T) |
| 53 | sótano | extremo lateral sur | T | SOTSUR (T) |
| 54 | 18 (apéndice 2) | centro geométrico planta tipo H | L | APCEN (L) |
| 55 | 18 (apéndice 2) | centro geométrico planta tipo H | T | APCEN (T) |
| 56 | 18 (apéndice 2) | extremo lateral norte | T | APLNOR (T) |
| 57 | 18 (apéndice 2) | extremo lateral sur | T | APLSUR (T) |
| 58 | sótano | extremo lateral norte | V | SOTNOR (V) |
| 59 | sótano | extremo lateral sur | V | SOTSUR (V) |
| 60 | sótano | extremo lateral este | V | SOTEST (V) |
| 61 | sótano | extremo lateral oeste | V | SOTOES (V) |
| 62 | sótano | centro geométrico planta tipo H | V | SOTCEN (V) |

En la figura 1.14 se muestra un diagrama del edificio TC con los puntos y las direcciones en donde se extrapolaron señales.

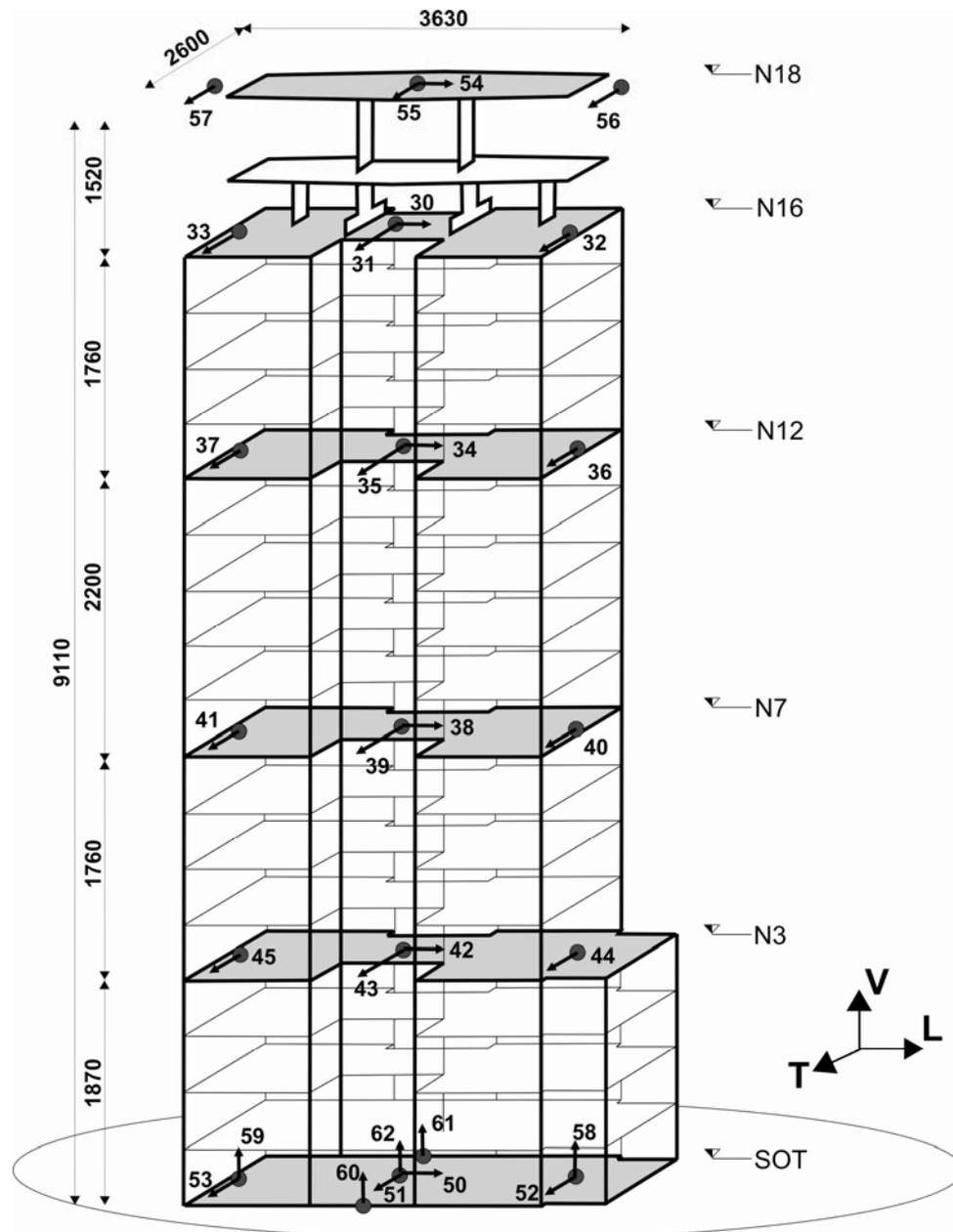


Figura 1.14 Señales generadas

En las siguientes figuras se muestran algunos de los registros extrapolados.

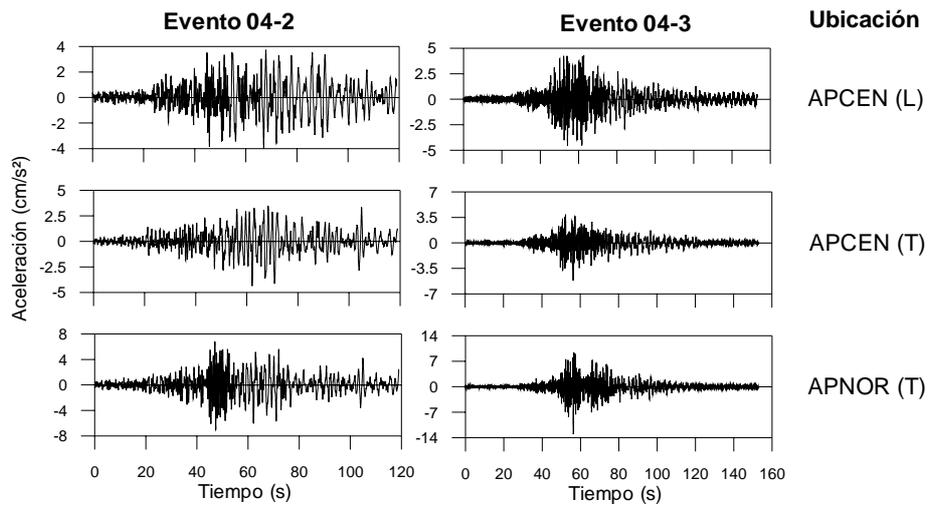


Figura 1.15 Comparación de los registros extrapolados en el nivel apéndice

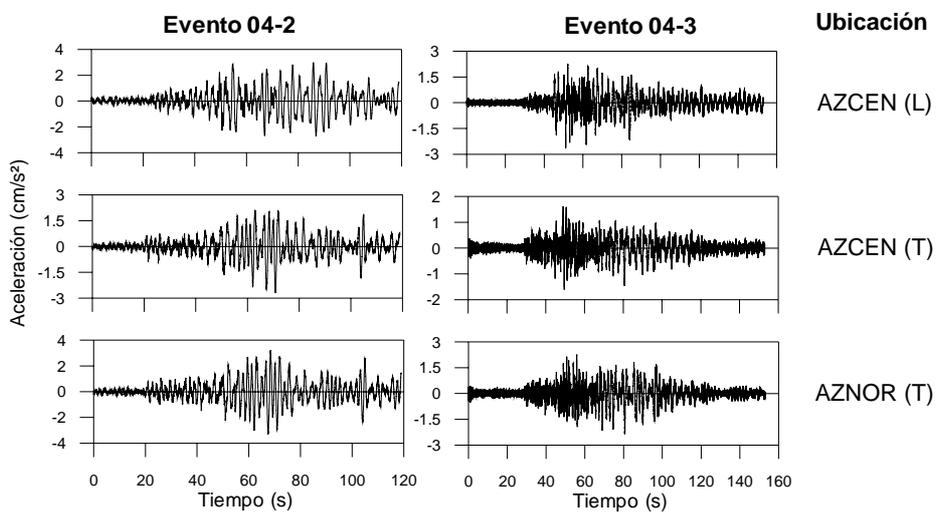


Figura 1.16 Comparación de los registros extrapolados en el nivel azotea

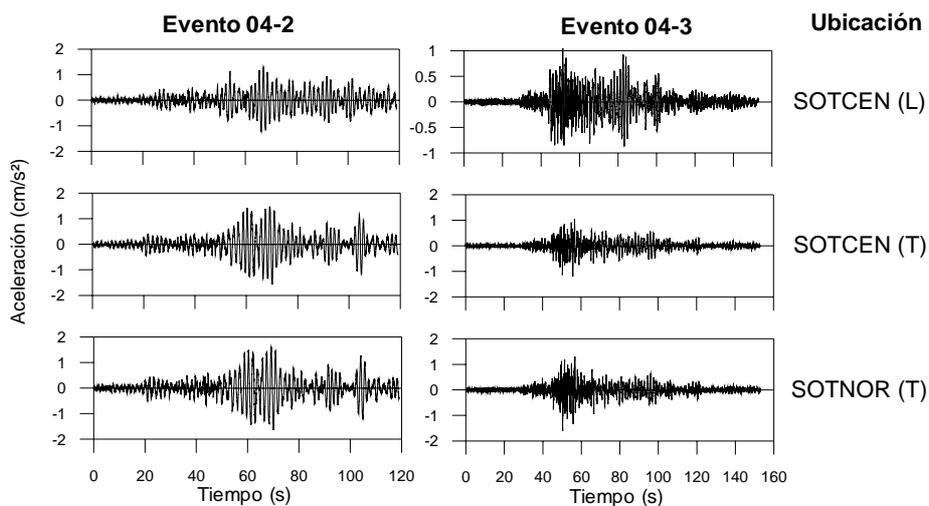


Figura 1.17 Comparación de los registros extrapolados en el nivel sótano

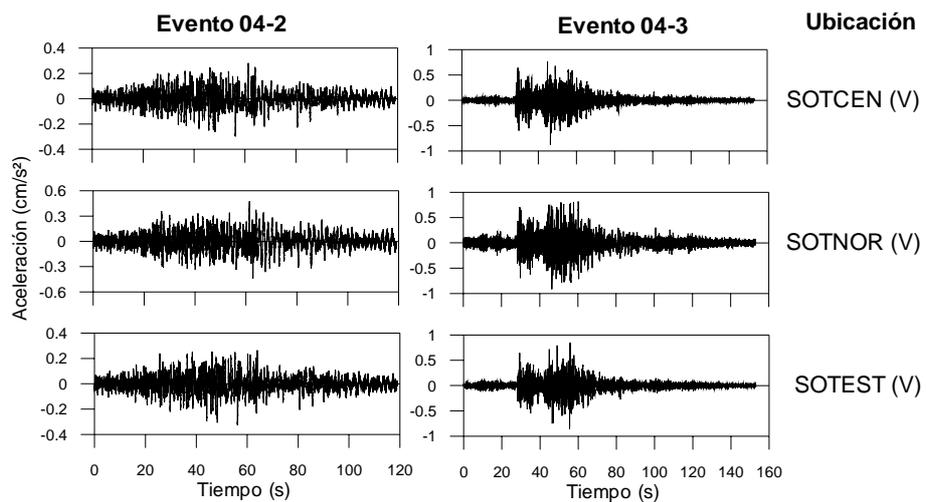


Figura 1.18 Comparación de los registros extrapolados en el nivel sótano dirección vertical

Capítulo 2 . METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

En este capítulo se expondrán técnicas que se usan en la interpretación de información de la instrumentación de estructuras que han dado buenos resultados en estudios anteriores y se plantearán nuevos procedimientos computacionales que mejoren el manejo de la información.

Para el análisis de estructuras existen diferentes técnicas y metodologías que sirven para estimar las propiedades dinámicas. Como ya se ha hecho en trabajos anteriores (Murià-Vila *et al*, 2001) estas metodologías pueden clasificarse en dos grupos, la metodología paramétrica y la no paramétrica.

Los métodos de tipo no paramétrico pueden definirse como el análisis directo de los registros que describen el comportamiento de la estructura, sin recurrir a un modelo analítico de ella. La estimación de los parámetros se hace valiéndose de artificios matemáticos que permitan identificar las propiedades que se desean conocer, en este caso las propiedades dinámicas del edificio en estudio; como frecuencias naturales de vibración, porcentaje de amortiguamiento crítico y forma modal.

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 seleccionó una metodología que ajusta la respuesta de un modelo a la que se ha registrado en el edificio, seleccionando señales de entrada y salida, según los componentes de movimiento que se buscan caracterizar.

La estimación paramétrica de propiedades dinámicas implica ventajas y desventajas con respecto a la metodología no paramétrica. A diferencia de la metodología no paramétrica es necesario la concepción de un modelo y un ajuste de sus propiedades, lo cual implica mayor dificultad en su estudio. Por otro lado la metodología paramétrica permite una mejor identificación de las propiedades dinámicas comparada con el análisis espectral en especial cuando se presentan comportamientos no lineales o fuerte acoplamiento (Pérez, 1995; Toro, 1997; Zapata *et al*, 1999; Murià-Vila *et al*, 2001)

2.1 Metodología no paramétrica de análisis

La metodología no paramétrica empleada se orienta al análisis, en el dominio del tiempo y de la frecuencia, de las señales disponibles en el edificio. Los análisis en el dominio del tiempo están enfocados al estudio directo de la señal. Los análisis en el dominio de la frecuencia, se basan en la interpretación de funciones que relacionan señales provenientes de dos puntos diferentes de la estructura, que son escogidos de acuerdo al tipo de propiedad que se quiera identificar.

2.1.1 Análisis espectral

Un análisis en el dominio de la frecuencia consiste en el análisis de funciones espectrales y se basa en la aplicación de la transformada de Fourier (Bendat y Piersol, 1989).

Los registros sísmicos o de vibración ambiental usados consisten en una señal de aceleración que corresponde a un cierto punto en la estructura o el terreno. Si se define a esta señal de aceleración como $x(t)$, su transformada de Fourier se encuentra dada por la expresión

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

La transformada de Fourier es una función compleja, si se aplica la identidad de Euler a la expresión anterior, la ecuación (2.1) puede escribirse de la siguiente manera

$$X(f) = \int_0^T x(t) \cos(2\pi f t) dt + i \int_0^T x(t) \operatorname{sen}(2\pi f t) dt \quad (2.2)$$

Una de las formas para expresar una señal $x(t)$ en el dominio de la frecuencia consiste en calcular su función de densidad espectral, también conocida como espectro de potencia, que es una función que representa la distribución de potencia de la señal con respecto de la frecuencia. Esta función se define como

$$S_{XX}(f) = X^*(f) \cdot X(f) \quad (2.3)$$

donde:

$X(f)$ transformada de Fourier de la señal

$X^*(f)$ conjugado de la transformada de Fourier de la señal

La información de las frecuencias negativas y positivas de la función de densidad espectral es la misma, debido a que dicha función es simétrica. Esto hace que sea más conveniente realizar el análisis de un solo lado del espectro, así se tiene

$$G_{XX}(f) = \begin{cases} 2S_{XX}(f) & \text{si } f > 0 \\ S_{XX}(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Si se tienen dos señales de aceleración correspondientes a dos puntos de la estructura, $x(t)$ y $y(t)$, sus transformadas de Fourier están dadas por

$$X(f) = \int_0^T x(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (2.5)$$

$$Y(f) = \int_0^T y(t) e^{-i2\pi f t} dt \quad (2.6)$$

Se define el espectro cruzado de potencia entre las dos señales $x(t)$ y $y(t)$ como

$$S_{XY} = X^*(f) \cdot Y(f) \quad (2.7)$$

procediendo de igual manera que con el espectro de potencia

$$G_{XY}(f) = \begin{cases} 2S_{XY}(f) & \text{si } f > 0 \\ S_{XY}(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

Una vez que se han obtenido los espectros de potencia de cada señal y los espectros cruzados de potencia entre pares de señales de aceleración, se procede a obtener ciertas relaciones entre dichas funciones, que permitan estimar, junto con la información de los espectros y mediante las consideraciones adecuadas, las propiedades dinámicas del sistema.

Las relaciones matemáticas adicionales de las cuales se hará uso son la función de transferencia, la función de coherencia y el ángulo de fase (Bendat y Piersol, 1989).

Función de Transferencia

Si se tienen dos señales de aceleración, $x(t)$ y $y(t)$, y sus correspondientes transformadas de Fourier $X(f)$ y $Y(f)$, la función de transferencia entre esas dos señales se define como

$$FT = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (2.9)$$

La función de transferencia puede obtenerse también a partir de los espectros de potencia de las señales:

$$FT = \left| \frac{S_{YY}(f)}{S_{XX}(f)} \right|^{\frac{1}{2}} = \left| \frac{G_{YY}(f)}{G_{XX}(f)} \right|^{\frac{1}{2}} \quad (2.10)$$

El cociente espectral anteriormente definido como función de transferencia es en realidad una función de respuesta, pero al igual que la verdadera función de transferencia en el dominio S de Laplace, es una transformación lineal entre dos señales (Thomson, 1998). La función de transferencia sirve para encontrar la relación de amplitudes que tienen dos señales.

Función de Coherencia

La función de coherencia se define como

$$\gamma_{XY}^2 = \frac{|S_{XY}(f)|^2}{S_{XX}(f)S_{YY}(f)} = \frac{|G_{XY}(f)|^2}{G_{XX}(f)G_{YY}(f)} \quad (2.11)$$

Se tiene entonces que

$$0 \leq \gamma_{XY}^2 \leq 1 \quad (2.12)$$

La función de coherencia permite estimar en función de la frecuencia, el grado de linealidad entre dos señales de aceleración $x(t)$ y $y(t)$. La escala para medir la linealidad varía de 0 a 1; los valores de coherencia inferiores a uno pueden deberse a: ruido en las señales o que no están correlacionadas; a efectos no lineales; a errores por falta de resolución numérica, o a ruido instrumental. En cambio, un valor de coherencia de uno significa que la relación entre las señales es completamente lineal.

Ángulo de Fase

El espectro cruzado de potencia resulta de la multiplicación de dos números complejos, $G_{XY}(f) \in \mathbb{C}$ y puede expresarse en forma polar de la manera siguiente

$$G_{XY}(f) = |G_{XY}(f)| e^{-i\theta_{XY}(f)} \quad (2.13)$$

Donde la amplitud, $|G_{XY}(f)|$, y ángulo de fase, $\theta(f)$, se determinan con las relaciones

$$|G_{XY}(f)| = \sqrt{C_{XY}^2 + Q_{XY}^2} \quad (2.14)$$

$$\theta(f) = \tan^{-1} \frac{Q_{XY}(f)}{C_{XY}(f)} \quad (2.15)$$

siendo

C_{XY} la parte real de $G_{XY}(f)$

Q_{XY} la parte imaginaria de $G_{XY}(f)$

$$0^\circ \leq |\theta(f)| \leq 180^\circ$$

El ángulo de fase es particularmente importante en la determinación de configuraciones modales y estimación de frecuencias de torsión de la estructura.

Cabe mencionar que las funciones antes definidas son afectadas por ruido instrumental o bien por el proceso numérico de pasar al dominio de la frecuencia. Es por eso que puede ser necesario tratamientos que se le dan a las señales y a los espectros como ventanas de ponderación, suavizado o filtrado.

2.1.2 Metodología para estimar las propiedades dinámicas

El estudio de las propiedades dinámicas del sistema suelo-estructura implica el análisis de la estructura, la cimentación y el suelo en conjunto.

Los métodos para la determinación de estas propiedades dinámicas involucran el uso de los espectros y cocientes espectrales a partir de pares de señales. Se eligen los cocientes según la propiedad dinámica que se quiere determinar, y se buscan características especiales en las funciones obtenidas tras el análisis espectral.

Con la metodología no paramétrica (análisis espectral) se pretende estimar las frecuencias naturales del sistema suelo-estructura en los componentes traslacionales (L y T), y el componente rotacional (R). También se calcularán aproximadamente el porcentaje de amortiguamiento crítico correspondiente al primer modo en los componentes traslacionales. Otra propiedad dinámica de interés que se obtendrá mediante la metodología no paramétrica es la forma modal.

2.1.2.1 Estimación de las frecuencias naturales y formas modales

Mediante el análisis espectral de las señales es posible estimar las frecuencias naturales del sistema, el procedimiento de identificación depende de la instrumentación y de las señales disponibles para su análisis. La identificación de frecuencias naturales se centrará en el estudio de las funciones de transferencia y se basa en el del factor de amplificación dinámica (FAD) estimado con los cocientes espectrales entre registros.

Debido a que los análisis de señales se hacen por pares, en forma de cocientes, es necesario seleccionar apropiadamente los registros que se analizarán y contar con señales en los dos componentes ortogonales T y L de terreno, sótano, niveles intermedios y azotea.

Se calculan los espectros de Fourier de las señales y dependiendo del número de niveles instrumentados, la localización y orientación de las señales se seleccionan cocientes que servirán para la identificar las frecuencias naturales.

En los cocientes azotea entre terreno y azotea entre sótano se buscan amplitudes máximas que correspondan a posibles frecuencias naturales del sistema. Estas frecuencias o intervalos de frecuencias se comprueban en la función de coherencia entre azotea y niveles intermedios.

Las frecuencias naturales de torsión además, pueden ser identificadas en cocientes de señales en el extremo entre señales en el centro del mismo nivel. Adicionalmente, se comprueba que para las frecuencias de torsión identificadas el valor del ángulo de fase entre señales lados opuestos en el mismo nivel sea cercano a 180° o -180° .

Para el procesamiento de las señales en el dominio de la frecuencia y para la identificación de frecuencias se hicieron mejoras en las subrutinas de cálculo (Murià-Vila *et al*, 1999) y en las macros para manejo de la información (Taborda y Murià-Vila, 2002b). Estas mejoras (Murià-Vila *et al*, 2006; Cruz *et al*, 2006c), se describen en los apéndices C y D. Con ello se logró una disminución en el tiempo de proceso y una automatización de la metodología antes descrita.

El porcentaje de amortiguamiento crítico del primer modo de vibrar asociado al sistema suelo-estructura, se estima aproximadamente mediante el método del factor de amplificación dinámica. En un sistema de un grado de libertad, para amortiguamientos pequeños y en la frecuencia fundamental se cumple

$$FAD \approx \frac{1}{2\xi} \quad (2.16)$$

La expresión anterior es válida cuando se puede despreciar la contribución de los modos superiores. Cuando no es el caso o se busca una mejor aproximación existen metodologías basadas en ajustes matemáticos (Taborda, 2003; Huerta, 2007).

Una vez que se estimaron las frecuencias o intervalos de frecuencia que tentativamente se asumen como frecuencias naturales del sistema en los componentes L, T y R, se procede a la determinación de la forma modal correspondiente a dichas frecuencias.

La forma modal se calcula con cocientes de amplitudes espectrales entre los niveles instrumentados con referencia al terreno o al sótano, obteniéndose amplitudes normalizadas con respecto a la azotea. La polaridad se obtiene mediante la fase entre las señales en los niveles y la señal de referencia. Si el valor absoluto del ángulo de fase es cercano a 0° indica señales en fase y valor cercano a 180° indica señales en fase opuesta. Los detalles de cómo calcular la forma modal se encuentra en el apéndice D.

2.1.3 Metodología de análisis de los efectos de interacción suelo-estructura

La flexibilidad del suelo-cimentación y los efectos de interacción suelo-estructura (ISE) pueden llegar a ser importantes al tratarse de terrenos blandos, por ejemplo la zona lacustre de valle de México. El análisis de la información proveniente de edificios instrumentados ha mostrado que es primordial la consideración de los efectos ISE para poder estimar adecuadamente la respuesta estructural (Murià Vila *et al.*, 1997 y 2000a).

La respuesta de una estructura es el resultado de la interacción entre diferentes elementos. El movimiento total es considerado como la suma de los movimientos de cuerpo rígido de la cimentación y los movimientos debidos a la flexibilidad de la estructura. Distinguir y caracterizar estos movimientos es uno de los objetivos principales al evaluar los efectos ISE.

2.1.3.1 Descomposición del movimiento

El sistema se idealiza según se ilustra en la figura 2.1a y además de los grados de libertad propios de la estructura se han incorporan cinco grados de libertad adicionales, cabeceo y traslación de la base en los componentes transversales y torsión de la base en el componente rotacional (figura 2.1b). Se hace esta simplificación al considerar que la cimentación es infinitamente rígida.

En los componentes traslacionales el movimiento total en el nivel "j" es el resultado de la suma de los movimientos en el plano del sistema idealizado. Estos movimientos son: traslación en la base (U_0) cabeceo en el nivel (θh) y el debido a la flexibilidad de la estructura (U_e).

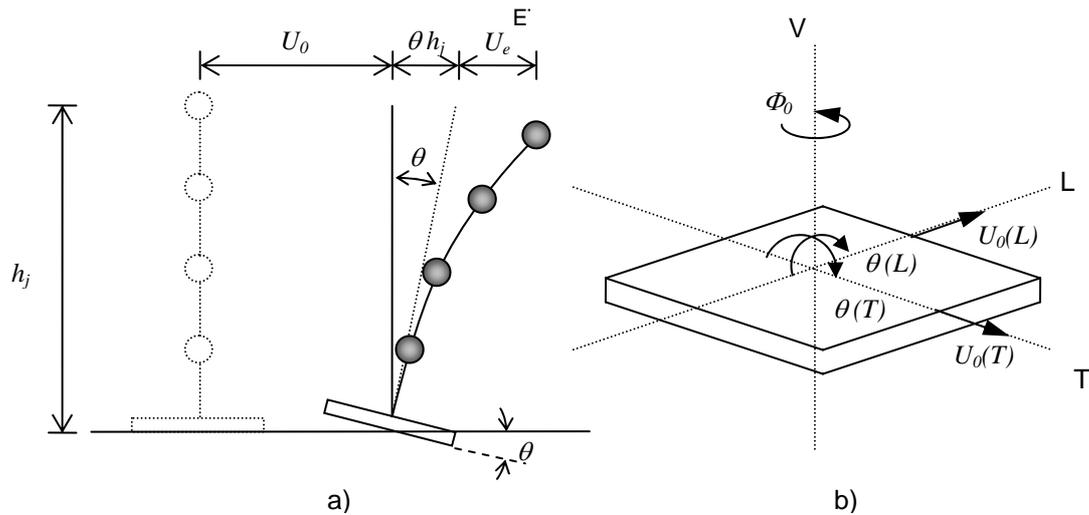


Figura 2.1 Idealización de sistema suelo estructura y grados de libertad en la base

La traslación total en el nivel "j" se puede expresar como

$$U_T^j = U_0 + \theta h_j + U_e^j \quad (2.17)$$

Y si se expresa la traslación del sótano como la suma la traslación del terreno más la traslación relativa de sótano se tiene

$$U_T^j = U_{terr} + U_0 + \theta h_j + U_e^j \quad (2.18)$$

donde

- U_T^j traslación total en el nivel j
- U_{terr} traslación del terreno
- U_0 traslación relativa de la base con respecto al terreno
- U_0 traslación absoluta de la base
- θh_j cabeceo en el nivel j, igual al giro de la base por la altura del nivel
- U_e^j deformación en el nivel j debida a la flexibilidad del edificio

De manera similar en el componente R, la torsión total de la azotea es la suma de la torsión en la base más la torsión debida a la flexibilidad de la estructura.

$$\Phi_T = \Phi_0 + \Phi_e \quad (2.19)$$

donde

- Φ_T rotación total
- Φ_0 rotación debido a la torsión de la base
- Φ_e rotación debida a la flexibilidad del edificio

Con el fin de diferenciar los movimientos no traslacionales, se toma como convención llamar giro al movimiento angular de la cimentación en el plano L o T, y rotación al movimiento alrededor del eje V.

De igual manera para este trabajo el cabeceo en el componente L se refiere al giro de la base alrededor del eje T por la altura (h), resultando en un movimiento traslacional en dirección de L.

Asimismo, el cabeceo en el componente T se refiere al giro de la base alrededor del eje L por la altura (h) resultando en un movimiento traslacional en dirección de T.

Las ecuaciones anteriores se emplean para generar las señales usadas en la estimación de efectos ISE tanto con las metodologías paramétricas como con las no paramétricas.

Algunos de los movimientos descritos anteriormente se obtienen directamente de los registros. Sin embargo, los movimientos de giro y rotación no corresponden a ningún registro medido y se tiene que generar por medio de operaciones entre las señales disponibles.

Las traslaciones se obtienen con las señales en azotea, sótano y terreno en los componentes L y T; de acuerdo a la instrumentación los registros que se usan son los siguientes

$$U_T = AZCEN \quad (2.20)$$

$$U_0 = SOTCEN \quad (2.21)$$

$$U_{terr} = TERR \quad (2.22)$$

El giro se puede obtener con los registros verticales en puntos extremos de la base en la dirección de análisis y conocida la distancia entre estos puntos, como se ilustra en la figura 2.2.

$$\theta = \frac{SOT1(V) - SOT2(V)}{D} \quad (2.23)$$

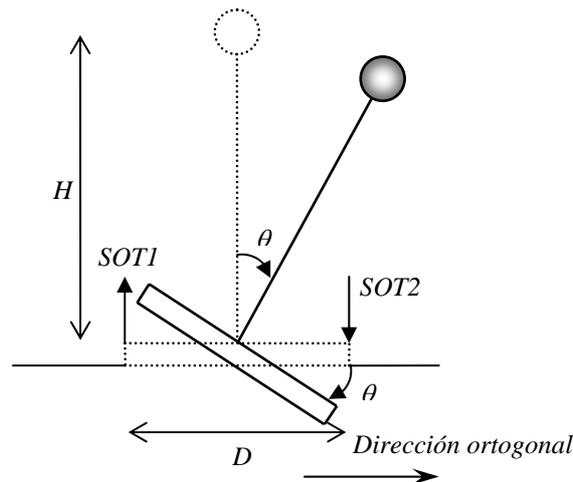


Figura 2.2 Determinación del cabeceo

De acuerdo a la instrumentación SOT1 y SOT2 se refiere a SOTNOR y SOTSUR, o SOTEST y SOTOES dependiendo del componente en que se calcule el cabeceo. Es importante reconocer el sentido de la traslación en los componentes L y T para determinar en la ecuación (2.23) a que extremo (norte o sur, este u oeste) corresponde las señales SOT1 y SOT2.

En el caso del edificio TC y de acuerdo a la convención de componentes y a las señales disponibles los giros en la base se calculan con

$$\theta(L) = \frac{SOTSUR(V) - SOTNOR(V)}{D_{SOT(L)}} \quad (2.24)$$

$$\theta(T) = \frac{SOTOES(V) - SOTEST(V)}{D_{SOT(T)}} \quad (2.25)$$

La rotación de la base y la azotea (Φ_T, Φ_0) se puede obtener de la diferencia de los registros de dos puntos opuestos (1 y 2) en cualquiera de las dos direcciones ortogonales del análisis, estas diferencias se dividen entre la distancia entre esos dos puntos, figura 2.2.

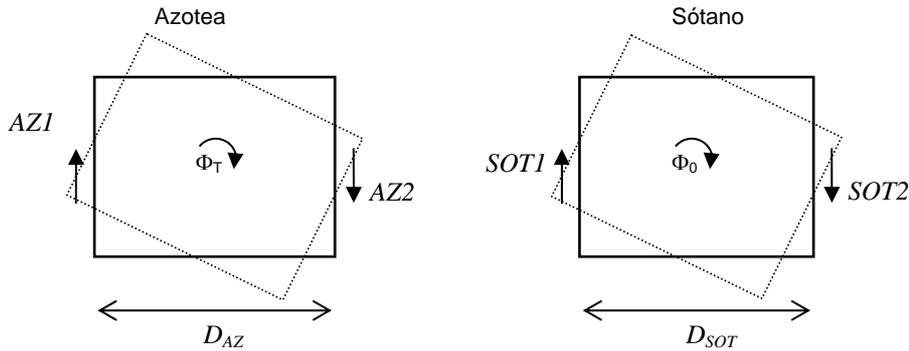


Figura 2.3 Determinación de la rotación

De acuerdo a las señales que se disponen se calculará el giro con los extremos norte y sur en el componente T. De esta forma se tiene

$$\Phi_T = \frac{AZNOR(T) - AZSUR(T)}{D_{AZ}} \quad (2.26)$$

$$\Phi_0 = \frac{SOTNOR(T) - SOTSUR(T)}{D_{SOT}} \quad (2.27)$$

El cálculo de los giros y las rotaciones puede hacerse tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. En el dominio del tiempo se resta directamente una señal de la otra y se divide entre el brazo, el signo de las amplitudes en la señal determinará el sentido del giro. En el dominio de la frecuencia se suman o se restan las amplitudes espectrales dependiendo de la fase entre las dos señales y se dividen entre el brazo, de esta forma se considera el sentido de las señales.

Es importante conocer la fase entre las señales para calcular el giro, ya que como lo indican las ecuaciones (2.23) a (2.27) el correcto cálculo del giro depende de esto. En la figura 2.4 se ilustra como determinar si se suma o restan las amplitudes de las señales con el ángulo de fase, con la misma filosofía que en la identificación de frecuencias de torsión. Si las señales están desfasadas las amplitudes se deben sumar y si se encuentran en fase se deben de restar.

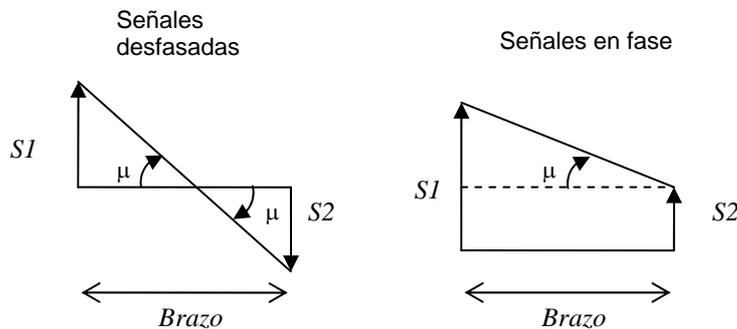


Figura 2.4 Determinación del sentido del giro

En la figura anterior S1 y S2 representan las señales verticales en caso del cálculo de giros y las señales laterales en caso de calcular rotaciones.

2.1.3.2 Cocientes espectrales para identificar efectos ISE

Al analizar el sistema suelo-estructura se señaló que el cociente [AZCEN/TERR] servía para identificar las propiedades del sistema, de igual forma existen cocientes espectrales FT que sirven para identificar las propiedades de los diferentes movimientos, las cuales serán llamadas FT_{ISE} .

Estas FT_{ISE} son cocientes donde se amplifica un determinado movimiento (cabeceo, traslación de la base o flexibilidad de la estructura), se usa la traslación total en la azotea como numerador y como denominador los movimientos que no se desea amplificar. Este tipo de cocientes ya se han usado en otros trabajos (Murià-Vila *et al*, 2004b) y han demostrado cumplir con sus propósitos.

Para amplificar el movimiento debido a la flexibilidad de la estructura se usa la FT_e la cual se define como

$$FT_e = \frac{U_T}{U_0 + H\theta} \quad (2.28)$$

La FT_{tb} sirve para identificar las frecuencias asociadas a la traslación de la base y se calcula como

$$FT_{tb} = \frac{U_T}{U_e + H\theta} \quad (2.29)$$

De igual manera se tiene para el cabeceo la FT_c

$$FT_c = \frac{U_T}{U_e + U_0} \quad (2.30)$$

No todos los términos de los denominadores de las FT_{ISE} son señales registradas por lo cual se tienen que genera algunas con las señales disponibles. De acuerdo con la ecuación (2.17) la FT_{tb} y FT_c también se pueden calcular de la de la siguiente forma

$$FT_{tb} = \frac{U_T}{U_T - U_0} \quad (2.31)$$

$$FT_c = \frac{U_T}{U_T - H\theta} \quad (2.32)$$

2.1.3.3 El método de Luco

El método de Luco (Luco, 1980) es un método simplificado que se basa en la descomposición modal de las ecuaciones de movimiento del sistema idealizado. En el método de Luco se hace un análisis en el plano en cada una de los componentes. En este análisis se incluyen los grados de libertad adicionales correspondientes a los movimientos de cuerpo rígido de la cimentación. El método de Luco se emplea con las frecuencias fundamentales del sistema suelo-estructura y se desprecia la participación de modos superiores.

Los resultados de la aplicación de este método en otras estructuras instrumentadas (Luco *et al*, 1987; Mendoza *et al*, 1991; Murià-Vila *et al*, 2004b) muestran su efectividad en la estimación de efectos ISE. Para la aplicación de este método será necesario usar las amplitudes espectrales de las señales y calcular algunos parámetros modales asociados a la estructura con base empotrada.

2.1.3.3.1 Frecuencias asociadas a la traslación

Con el método de Luco se puede obtener la frecuencia fundamental de traslación con base empotrada, la de traslación de la base y la de cabeceo de la base, así como las rigideces equivalentes de cada movimiento respectivamente. La frecuencia fundamental de vibrar del modelo de traslación del sistema suelo-estructura esta dada por la relación

$$\frac{1}{\tilde{f}^2} = \frac{1}{f_e^2} + \frac{1}{f_c^2} + \frac{1}{f_{tb}^2} \quad (2.33)$$

donde

- \tilde{f} frecuencia fundamental del sistema
- f_e frecuencia de la estructura sin traslación ni giro en la base
- f_c frecuencia natural suponiendo que la base solo puede girar (cabeceo) y con una superestructura infinitamente rígida
- f_{tb} frecuencia natural suponiendo que la base solo puede trasladarse y con una superestructura infinitamente rígida

También se puede escribir la ecuación (2.33) en términos del periodo

$$\tilde{T}^2 = T_e^2 + T_c^2 + T_{tb}^2 \quad (2.34)$$

Se pueden estimar algunas características de la cimentación y la estructura obteniéndose las siguientes relaciones aproximadas válidas en la cercanía de la frecuencia fundamental. (Luco, 1980).

$$f_{tb} = \tilde{f} \left(\sqrt{\frac{\beta_1 U_0}{U_T}} \right)^{-1} \quad (2.35)$$

$$f_c = \tilde{f} \left(\sqrt{\frac{\gamma_1 H \theta}{U_T}} \right)^{-1} \quad (2.36)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.35) y (2.36) en la ecuación (2.33)

$$f_e = \tilde{f} \left(\sqrt{1 - \frac{\beta_1 U_0}{U_T} - \frac{\gamma_1 H \theta}{U_T}} \right)^{-1} \quad (2.37)$$

Los parámetros β_1 y γ_1 se obtienen con las masas en cada nivel y la forma modal en los componentes traslacionales de la siguiente manera

$$\beta_1 = \frac{1}{M_1} \{\phi_1\}^T \{M\} \{1\} \quad (2.38)$$

$$\gamma_1 = \frac{1}{HM_1} \{\phi_1\}^T \{M\} \{h\} \quad (2.39)$$

donde

- $\{\phi_1\}$ vector de la primera forma modal con base empotrada
- $\{M\}$ matriz de masas
- M_1 masa modal del primer modo
- $\{h\}$ altura de cada nivel con respecto a la base

Las rigideces equivalentes de traslación horizontal K_H y de cabeceo K_R pueden estimarse con las relaciones siguientes

$$K_H = \beta_1^2 M_1 (2\pi f_{tb})^2 \quad (2.40)$$

$$K_R = \gamma_1^2 M_1 H^2 (2\pi f_c)^2 \quad (2.41)$$

La contribución de los movimientos de traslación y cabeceo de la base en la respuesta total de traslación de la estructura pueden estimarse aproximadamente con los cocientes U_0/U_T y $\theta H/U_T$ respectivamente, y la suma de estos cocientes representa la contribución total de los efectos ISE en la respuesta de traslación de la estructura.

2.1.3.3.2 Frecuencias asociadas a la torsión

De manera similar se obtendrán las frecuencias de torsión de la estructura con base empotrada y torsión de la base (Luco, 1980). Se necesita conocer la frecuencia fundamental de torsión del sistema suelo estructura, la respuesta rotacional en la base y en la azotea, y la masa rotacional de cada nivel en la estructura.

La frecuencia de torsión del sistema suelo-estructura en términos de la frecuencia de torsión de la estructura y de la base se da a través de la relación

$$\frac{1}{\tilde{f}_t^2} = \frac{1}{f_t^2} + \frac{1}{f_{rb}^2} \quad (2.42)$$

donde

- \tilde{f}_t frecuencia fundamental de torsión del sistema
- f_t frecuencia de torsión de la superestructura sin rotación de la base
- f_{rb} frecuencia de torsión suponiendo que su base solo puede girar en su plano y con una superestructura infinitamente rígida

También se puede escribir la ecuación (2.42) en términos del periodo

$$\tilde{T}_t^2 = T_t^2 + T_{rb}^2 \quad (2.43)$$

De manera semejante a la traslación se obtienen las siguientes relaciones aproximadas

$$f_{rb} = \tilde{f}_t \left(\sqrt{\beta_1 \frac{\Phi_0}{\Phi_T}} \right)^{-1} \quad (2.44)$$

Sustituyendo la ecuación (2.44) en la ecuación (2.42)

$$f_t = \tilde{f}_t \left(\sqrt{1 - \beta_1 \frac{\Phi_0}{\Phi_T}} \right)^{-1} \quad (2.45)$$

De igual forma que en la ecuación (2.38) el parámetro β_1 se obtiene con las masas rotacionales de cada nivel. Se usa la siguiente expresión

$$\beta_1 = \frac{1}{I_{z_1}} \{\phi_1\}^T \{I_z\} \{1\} \quad (2.46)$$

donde

- $\{\phi_1\}$ vector de la primera forma modal
- $\{I_z\}$ matriz de masas rotacionales
- I_{z_1} masa modal rotacional del primer modo

La rigidez equivalente de torsión K_{RV} puede estimarse con la relación

$$K_{RV} = \beta_1^2 I_{z_1} (2\pi f_{rb})^2 \quad (2.47)$$

La contribución de la torsión de la base a la respuesta de torsión en la azotea se puede estimar aproximadamente con el cociente Φ_0/Φ_T .

2.2 Metodología paramétrica de análisis

Los métodos paramétricos o estimación paramétrica son aquellos en los cuales se hace la identificación de las propiedades de un sistema a partir de la idealización de la estructura por medio de un modelo, a través del cual se busca reproducir la respuesta del sistema que se ha obtenido experimentalmente.

En este tipo de metodología, el objetivo es que el modelo represente de manera adecuada el comportamiento de la estructura. La comparación con datos experimentales es una de las formas de evaluar el grado de correspondencia entre el modelo y la estructura, así como la aproximación de las propiedades que se estimaron.

Para el análisis paramétrico se utilizó el programa de cómputo MIMO (*Multiple Input – Multiple Output*), que se basa en el método de superposición modal propuesto por Beck y Jennings (1980), e implementado por Li y Mau (1990), cuya validez ha sido satisfactoriamente comprobada en la identificación de las propiedades de estructuras instrumentadas (Pérez, 1995; Toro, 1997; Zapata *et al*, 1999; Murià-Vila *et al*, 2001; Palacios, 2003; Taborda, 2003; Correa, 2005).

2.2.1 Introducción al análisis por ventanas usando un programa de identificación de sistemas

El planteamiento de superposición modal supone la representación del sistema estructural como un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas, de N grados de libertad. Este sistema se transforma en un sistema de N ecuaciones diferenciales desacopladas de segundo orden, correspondientes a los modos clásicos de vibrar. La respuesta de un sistema es igual a la superposición del número total de modos de vibración, el método implica que la respuesta de un sistema puede representarse satisfactoriamente como la superposición de un número de modos dominantes, que puede ser menor que el número de grados de libertad totales de la estructura.

Para emplear el método, se hace un modelo de la estructura que represente adecuadamente su comportamiento. Para este modelo y a partir de ciertos datos iniciales, se calcula una respuesta dinámica, considerando que durante un mismo intervalo de tiempo la estructura presenta un comportamiento lineal. Los parámetros del sistema se determinan al ajustar la respuesta calculada con respecto de la experimental con base en el método de los mínimos cuadrados; en esta forma, se obtienen, para cada intervalo de tiempo, valores de frecuencias, porcentajes de amortiguamiento crítico, factores de participación modal y configuraciones modales para el modelo propuesto.

El programa MIMO permite el análisis de sistemas con múltiples entradas y salidas. Las excitaciones a las que está sometido el sistema se denotan como a_{gk} ($k=1,2,\dots,m$), y las respuestas reales del mismo como a_{oi} ($i=1,2,\dots,n$), donde m representa el número total de entradas y n el número de salidas.

La aceleración calculada en términos de sus respuestas modales se pueden expresar por medio de la siguiente ecuación

$$a_i = \sum_j \phi_{ij} \ddot{u}_j \quad (2.48)$$

donde

- a_i aceleración calculada
- \ddot{u}_j respuestas modales
- ϕ_{ij} las componentes de la forma modal del modo j en el grado de libertad i .

Las respuestas modales se definen por la ecuación de segundo orden

$$\ddot{u}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{u}_j + \omega_j^2 u_j = \sum_k P_{jk} a_{sk} \quad (2.49)$$

donde

- ξ_j fracción de amortiguamiento crítico del modo j
- ω_j frecuencia circular del modo j en rad/s
- P_{jk} factor de participación del modo j con respecto a la excitación k
- a_{gk} es la aceleración de excitación k .

La solución de esta expresión puede determinarse por medio de la integral de Duhamel, si se considera la linealidad que, para cada intervalo de tiempo, tiene la función de excitación $a_{gk}(t)$. La respuesta de aceleración del modo j , está dada por

$$\begin{aligned} \ddot{u}_j = e^{-\xi_j \omega_j t} & \left((-2\xi_j \omega_j \dot{u}_j(0) - \omega_j^2 u_j(0)) \cos(\omega_{dj} t) + \frac{1}{\omega_{dj}} (-\omega_j^2 (1 - 2\xi_j^2) \dot{u}_j(0) + \xi_j \omega_j^3 u_j(0)) \text{sen}(\omega_{dj} t) \right) \\ & + \sum_k P_{jk} \left(a_{gk}(t) + \frac{1}{\omega_{dj}} \int_0^t a_{gk}(\tau) e^{-\xi_j \omega_j (t-\tau)} (-2\xi_j \omega_j \omega_{dj} (t-\tau) - \omega_j^2 (1 - 2\xi_j^2)) \text{sen}(\omega_{dj} (t-\tau)) dt \right) \end{aligned} \quad (2.50)$$

donde

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

La introducción de las condiciones iniciales como parámetros desconocidos hace posible realizar la identificación por tramos asumiendo un comportamiento lineal en cada uno de ellos.

Este planteamiento utiliza el método de los mínimos cuadrados en la identificación para minimizar la función criterio J respecto de los parámetros modales a identificar ω_j , ξ_j , P_{jk} , \dot{u}_j , u_j y f_j . La función criterio es una función integral que evalúa el error cuadrático de la diferencia de las respuestas del modelo matemático con las del sistema real e indica cómo es el ajuste entre dichas respuestas, J representa un índice de error absoluto, y está dada por

$$J = \sum_i \sum_s (a_{0i}(s\Delta t) - a_i(s\Delta t))^2 \quad (2.51)$$

Para la determinación de los parámetros dinámicos en un sistema con múltiples entradas y salidas se siguen los pasos siguientes:

- Se determina el tamaño de la ventana o intervalo de tiempo de análisis, de manera que se tenga una resolución adecuada en frecuencia. Por lo general se emplean ventanas de 10 s y recomienda que el tamaño de la ventana sea al menos 3 veces el periodo fundamental de la estructura (Pérez, 1995).
- Se define los parámetros iniciales, que usualmente provienen de un estudio previo o de un análisis espectral. Luego de analizar la primera ventana, los parámetros iniciales corresponden a los del intervalo de tiempo anterior.
- Se hace la identificación de cada modo verificando que los valores a los cuales se llega sean razonables para el tipo de estructura y modo a identificar.
- Se comprueba la aproximación del modelo con la comparación en el tiempo y en la frecuencia de la señal que se calculó con el modelo y la señal medida experimentalmente; de forma cuantitativa se emplea el porcentaje de error relativo.

2.2.2 Modelos para el análisis de propiedades dinámicas del sistema

En estudios a otros edificios instrumentados, que emplean la misma metodología paramétrica (Toro, 1997; Murià-Vila *et al*, 2001; Zapata, 2001; Palacios, 2003; Taborda, 2003; Correa, 2005) se ha llegado a refinar el procedimiento para identificar las propiedades dinámicas del sistema suelo-estructura. Es con base en los resultados de estos estudios es que se escogieron los modelos del sistema que se analizarán en este trabajo.

Se nombrarán modelos SIST a los modelos para identificar las propiedades dinámicas del sistema suelo-estructura. Para estimar adecuadamente estas propiedades se analizarán modelos en tres dimensiones (3D), que a diferencia de modelos planos dan un enfoque general del sistema en sus tres componentes L, T y R; así como los efectos de acoplamiento entre sus modos.

Los modelos utilizados pueden clasificarse en modelos chicos y modelos grandes. En los modelos chicos se usan como respuesta las señales del nivel azotea, y en los modelos grandes además de azotea, se usan señales de otros niveles instrumentados. Ambos tipos de modelos se utilizan para estimar las frecuencias naturales, amortiguamientos y participaciones de cada uno de los modos. La diferencia es que con los modelos grandes se pueden calcular las formas modales y las participaciones de los modos en las señales de los diferentes niveles instrumentados.

Para identificar las propiedades dinámicas del sistema en este trabajo se emplearon tres modelos diferentes, un modelo 3D-SIST-Chico y dos modelos grandes 3D-SIST-GLR y 3D-SIST-GT. El evento 04-2 se estudió con el modelo chico y modelos grandes, el evento 04-3 solamente se estudió con el modelo chico.

2.2.2.1 Modelos 3D-SIST Chicos

El modelo 3D-SIST-Ch es un modelo en tres dimensiones para determinar las propiedades del sistema suelo-estructura, cuyas excitaciones, EL y ET, son las señales del terreno en los dos componentes ortogonales de traslación (TERR(L), TERR(T)). Las respuestas 1L y 1T son las señales relativas al terreno en azotea (AZCEN(L)-TERR(L) y AZCEN(T)-TERR(L)). La respuesta en torsión 1R se calcula como la diferencia entre las señales en el componente T de AZNOR y AZCEN.

También se propone un modelo chico sin la descomposición de la señal de respuesta en torsión (3D-SIST-ChNR). Este modelo está concebido para los casos cuando la instrumentación es limitada y no se cuenta con señales en los extremos. Dependiendo de la calidad de los registros y de efecto de la torsión en las señales de traslación, es posible identificar parámetros dinámicos correspondientes al movimiento de torsión en este tipo de modelos a pesar de no tener la señal 1R del modelo 3D-SIST-Ch.

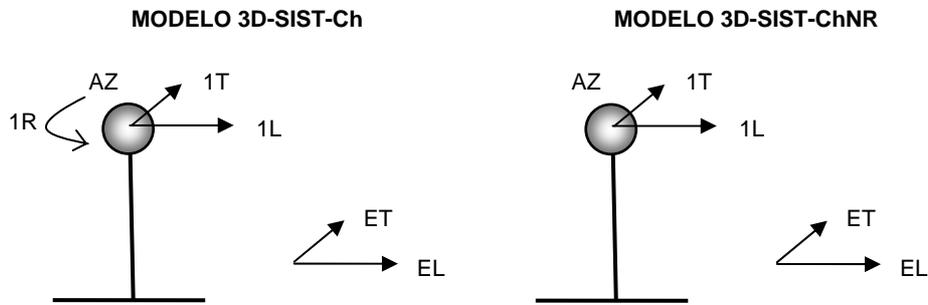


Figura 2.5 Modelos 3D-SIST Chicos

2.2.2.2 Modelos 3D-SIST-Grandes

Se presentan dos tipos de modelos grandes: uno para estimar esencialmente las propiedades dinámicas en los componentes L y R (3D-SIST-GLR) y otro para las propiedades en el componente T (3D-SIST-GT). Ambos modelos estiman las propiedades en tres componentes; sin embargo, se tiene más información en determinados componentes debido a un mayor número de señales. Con los modelos grandes, además de las propiedades dinámicas identificadas por los modelos chicos, es posible calcular la forma modal (3D-SIST-GLR para la forma modal en L y 3D-SIST-GT para T) y la participación de los modos en las señales de niveles intermedios.

Igual que en el modelo chico las excitaciones en ambos modelos son las señales de terreno. Y las señales de respuesta se obtienen al calcular la señal relativa entre el centro de cada nivel y el terreno. Las respuestas en torsión en cada nivel se calculan como la señal lateral norte en el componente T menos la señal en el centro, evidentemente también en T.

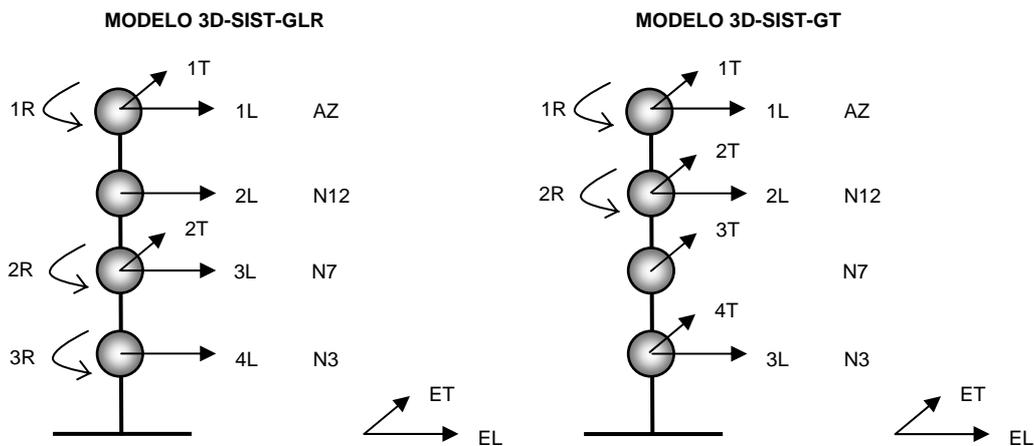


Figura 2.6 Modelos 3D-SIST Grandes

2.2.3 Modelos para el análisis de efectos de interacción suelo-estructura

Una de las mejores formas estimar las frecuencias asociadas a los movimientos de la cimentación es por medio del uso de modelos paramétricos para la identificación de efectos ISE. Los resultados de estos modelos en otros edificios instrumentados (Murià-Vila *et al*, 2004b; Correa y Murià-Vila, 2005), han sido comparados con resultados del análisis no paramétricos, demostrándose sus beneficios.

La manera de establecer las señales de excitación y de respuesta para los modelos ISE es similar a la que se usó en los modelos SIST. La esencia es escoger bien estas señales para que el modelo identifique las propiedades dinámicas del movimiento que se quiere estudiar, tomando en cuenta que el modelo, a través de la superposición modal, empleará las señales de excitación para generar las señales de respuesta.

Se han definido tres modelos ISE, 3D-ISE-EST, 3D-ISE-CAB y 3D-ISE-TRAS para identificar las propiedades de la estructura con cimentación fija, cabeceo de la base con estructura rígida y traslación de la base con estructura rígida, respectivamente.

En todos los modelos ISE las señales de repuesta (R_L y R_T) serán la señal AZCEN menos la excitación (E_L y E_T), la cual será diferente de acuerdo al modelo. Dependiendo del modelo la señal de excitación esta compuesta por la suma de los movimientos de: traslación de la base, cabeceo y flexibilidad de la estructura; sin incluir el movimiento que se quiere analizar con el modelo. De esta forma el modelo converge a modos cuyas propiedades dinámicas son características de un sistema en particular, en ocasiones el acoplamiento entre los sistemas impide una correcta identificación.

Los movimientos que forma parte de la excitación pueden calcularse como la suma de dos movimientos, o dada la igualdad en la ecuación (2.17), se puede calcular como una la resta del movimiento total menos uno de los movimientos. De hecho las señales de excitación son equivalentes al denominador de los cocientes espectrales definidos en las ecuaciones (2.28) a (2.32).

En el modelo de la estructura con giro y traslación de la base restringidos (que es equivalente a tener base empotrada) la excitación es la suma de la traslación absoluta de la base más el cabeceo. En el modelo de cabeceo la excitación corresponde a la traslación absoluta del sótano más el movimiento debido a la flexibilidad de la estructura, el cual se puede calcular como la traslación total menos el cabeceo. Por último, en el modelo de traslación de la base la excitación se calcula como la traslación total menos la traslación de la base, lo cual es equivalente a el cabeceo más el movimiento debido a la flexibilidad.

Para comprender mejor cuales son las señales de excitación y respuesta de los modelos ISE, en la tabla 2.1 a la tabla 2.2 se describen, para cada modelo, el movimiento que se busca representar y la forma de calcular las señales. Los movimientos mencionados se pueden calcular con los registros disponibles de acuerdo a las ecuaciones (2.20) a (2.25).

Tabla 2.1 Señales para el modelo 3D-ISE-EST

| | Descripción | Forma de calcular |
|-------|---|---|
| E_L | Excitación correspondiente a la suma del movimiento de traslación de la base y el movimiento de cabeceo en azotea, en el componente L | $E(L) = U_0(L) + H\theta(L)$ |
| E_T | Excitación correspondiente a la suma del movimiento de traslación de la base y el movimiento de cabeceo en azotea, en el componente T | $E(T) = U_0(T) + H\theta(T)$ |
| R_L | Respuesta en la azotea en el componente L relativa la señal E_L | $R(L) = U_T(L) - E(L)$ $R(L) = U_T(L) - (U_0(L) + H\theta(L))$ |
| R_T | Respuesta en la azotea en el componente T relativa la señal E_T | $R(T) = U_T(T) - E(T)$ $R(T) = U_T(T) - [U_0(T) + H\theta(T)]$ |

Tabla 2.2 Señales para el modelo 3D-ISE-TRAS

| | Descripción | Forma de calcular |
|-------|--|--|
| E_L | Excitación correspondiente a la suma el movimiento de cabeceo en azotea y el movimiento en azotea debido a la deformación del edificio, en el componente L | $E(L) = H\theta(L) + U_e(L)$ $E(L) = H\theta(L) + [U_T(L) - U_0(L) - H\theta(L)]$ $E(L) = U_T(L) - U_0(L)$ |
| E_T | Excitación correspondiente a la suma el movimiento de cabeceo en azotea y el movimiento en azotea debido a la deformación del edificio, en el componente T | $E(T) = H\theta(T) + U_e(T)$ $E(T) = H\theta(T) + [U_T(T) - U_0(T) - H\theta(T)]$ $E(T) = U_T(T) - U_0(T)$ |
| R_L | Respuesta en la azotea en el componente L relativa la señal E_L | $R(L) = U_T(L) - E(L)$ $R(L) = U_0(L)$ |
| R_T | Respuesta en la azotea en el componente T relativa la señal E_T | $R(T) = U_T(T) - E(T)$ $R(T) = U_0(T)$ |

Tabla 2.3 Señales para el modelo 3D-ISE-CAB

| | Descripción | Forma de calcular |
|-------|---|--|
| E_L | Excitación correspondiente a la suma del movimiento de traslación de la base y el movimiento en azotea debido a la deformación del edificio, en el componente L | $E(L) = U_0(L) + U_e(L)$ $E(L) = U_0(L) + [U_T(L) - U_0(L) - H\theta(L)]$ $E(L) = U_T(L) - H\theta(L)$ |
| E_T | Excitación correspondiente a la suma del movimiento de traslación de la base y el movimiento en azotea debido a la deformación del edificio, en el componente T | $E(T) = U_0(T) + U_e(T)$ $E(T) = U_0(T) + [U_T(T) - U_0(T) - H\theta(T)]$ $E(T) = U_T(T) - H\theta(T)$ |
| R_L | Respuesta en la azotea en el componente L relativa la señal E_L | $R(L) = U_T(L) - E(L)$ $R(L) = H\theta(L)$ |
| R_T | Respuesta en la azotea en el componente T relativa la señal E_T | $R(T) = U_T(T) - E(T)$ $R(T) = H\theta(T)$ |

2.3 Metodología analítica para estimar las rigideces dinámicas del sistema suelo-cimentación

La estimación de las rigideces que se asocian a los movimientos de traslación, cabeceo y torsión de la cimentación con el método de Luco es uno de los muchos procedimientos que existen para cuantificar estos parámetros. En la literatura existen diferentes métodos de estimación (Avilés, 2004; Dobry y Gazetas, 1988; Gazetas, 1991a; Gazetas 1991b; Kaynia y Kausel, 1982; Mamoon *et al*, 1990; Novak y Aboul-Ella, 1978; Wolf y von Arx, 1982).

En este trabajo se pretende emplear métodos analíticos que consideren dos características importantes de la estructura, cimentación con pilotes y efectos de grupo entre pilotes. Los métodos que se usan son el programa Dyna5 (Novak *et al*, 1995) y el método simplificado de Dobry y Gazetas (1988).

2.3.1 Modelos con el programa Dyna5

El programa Dyna5 permite la evaluación de la rigidez del cajón mediante las expresiones de Novak y Beredugo (1972), Beredugo y Novak (1972) y Kausel y Ushijima (1979). Para el análisis de los efectos de grupo, el programa Dyna5 utiliza los factores de interacción estáticos de Poulos y Davis (1980), y los factores dinámicos de Kaynia y Kausel (1982).

Mediante el programa comercial Dyna5 es posible estudiar diferentes modelos del cajón de cimentación y el sistema de pilotes (figura 2.7). El suelo puede considerarse con su estratigrafía real o bien pueden usarse las propiedades asociadas a un manto de suelo homogéneo.

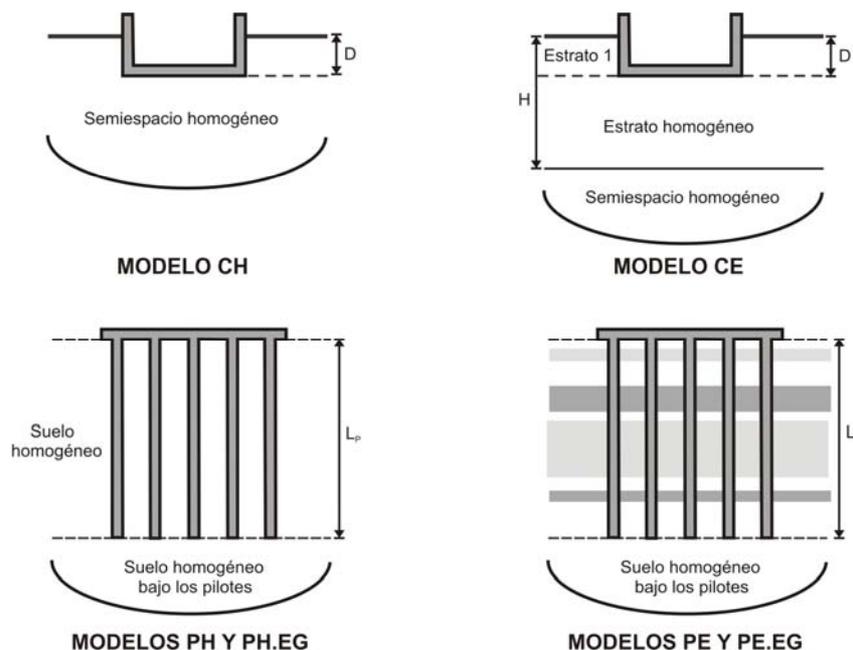


Figura 2.7 Modelos de la cimentación

Las características de los modelos de la cimentación se describen en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Descripción de modelos de cimentación

| Modelo | Descripción |
|--------------|--|
| CH | En este modelo se considera el cajón enterrado en un semiespacio homogéneo. |
| CE | Aquí se modela el cajón como apoyado en un estrato homogéneo. Las propiedades de la capa superficial pueden especificarse separadamente. Subyaciendo al estrato se considera un semiespacio homogéneo. |
| PH | Consiste en un grupo de pilotes, que se asume perfectamente unido al cajón de cimentación, enterrado en un semiespacio homogéneo. No se consideran los efectos de grupo. |
| PH.EG | Igual que el modelo PH pero se incluye el análisis de los efectos de grupo. |
| PE | En este modelo el grupo de pilotes se considera enterrado en un suelo estratificado. |
| PE.EG | Similar al modelo PE, pero se incluye el análisis de los efectos de grupo. |

De acuerdo con las NTCDS-RCDF (2004) y la propuesta de Kobori *et al* (1991) se plantearon cuatro combinaciones para el estudio de las rigideces de la cimentación, que se definen en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Modelos finales de la cimentación

| Nombre | Combinación | Descripción |
|-------------|-------------------|--|
| H | CH + PH | Modelos donde se suman la contribución del cajón y los pilotes. El suelo se considera homogéneo. |
| H.EG | CH + PH.EG | |
| E | CE + PE | Modelos donde se suman la contribución del cajón y los pilotes. El suelo se considera con la estratigrafía real del sitio. |
| E.EG | CE + PE.EG | |

2.3.2 El método simplificado

El método simplificado propuesto por Dobry y Gazetas (1988) se basa en la solución acústica que gobierna la propagación de ondas desde una superficie cilíndrica. Mediante algunas simplificaciones, la solución mencionada se usa para generar factores de interacción entre pilotes que dependen de la frecuencia de excitación, ciertas propiedades del suelo y la relación de espaciamiento S/d , donde S y d son la separación y el diámetro de los pilotes, respectivamente.

Un análisis a detalle de la validación y alcances del método simplificado así como consideraciones tanto de tipo analítico como empírico, se tratan con mayor profundidad en Cruz *et al* (2006a) y Cruz (2007). También en estas referencias se proponen factores de interacción para el componente de torsión los cuales no se incluyen en el trabajo de Dobry y Gazetas (1998).

Para la aplicación del método simplificado se elaboró un programa de cómputo (Cruz *et al*, 2006a; Cruz, 2007). Los datos básicos que el programa necesita son: las propiedades de un pilote representativo del grupo y las propiedades del suelo donde se encuentra enterrado, así como la ubicación geométrica de los pilotes del arreglo. El programa calcula la impedancia de un pilote mediante la aproximación de Novak y Aboul-Ella (1978) y Novak y Howell (1978). Esto permite analizar suelos estratificados, donde las propiedades de cada capa de suelo pueden definirse por separado. Para calcular la impedancia de grupo, considerando los efectos de interacción, es necesario definir un semiespacio homogéneo equivalente a partir del suelo estratificado real. Esto se hace al aplicar el método de Gómez (2000) con el cual es posible establecer el periodo equivalente de un suelo estratificado y la velocidad de onda de cortante correspondiente.

Capítulo 3 . RESULTADOS DE LA ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS Y EFECTOS DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA

En este capítulo presenta los resultados de la estimación de propiedades dinámicas del sistema suelo-estructura, la estructura con base empotrada y de los demás subsistemas que se asocian con los efectos ISE. Para todos los eventos (sismos y VA) se identificaron las frecuencias naturales del sistema, se hizo al menos un modelo paramétrico para cada evento sísmico, se identificaron efectos ISE con el método de Luco en una VA y en dos eventos sísmicos (04-2 y 04-3).

El evento 04-2, por ser el más intenso con instrumentación permanente se escogió para un análisis más detallado con modelos paramétricos grandes. También para este evento la estimación de efectos ISE fue más completa, se hicieron modelos paramétricos para la identificación de propiedades dinámicas de la cimentación y la estructura con base empotrada. En este evento también se aplicó el método de Luco por ventanas.

3.1 Estimación de las propiedades dinámicas del sistema

Como se mencionó, la estimación de las propiedades dinámicas del sistema se basó en dos metodologías diferentes, la paramétrica y la no paramétrica. Los resultados de ambas metodologías se presentan y cuando fue posible se hizo una comparación y comentarios al respecto.

Se presenta la identificación de las frecuencias naturales por medio del análisis espectral y el ajuste de los modelos paramétricos. El porcentaje de amortiguamiento crítico del modo fundamental de traslación en cada componente se calculó con el FAD y con los modelos, el uso de estos últimos también permitió estimar el amortiguamiento de los modos superiores y en el componente rotacional. También se traza la forma modal asociada a las frecuencias naturales que se identificaron. Con los modelos paramétricos modales fue posible el cálculo del factor de participación de los modos que se identificaron.

3.1.1 Análisis espectral

Se analizaron los espectros y cocientes espectrales de tres sismos y dos VA. El tipo de evento y a las características de la instrumentación en cada evento determinaron los cocientes espectrales que se pueden calcular y analizar. En todos los eventos se calcularon las funciones de transferencia [AZ/TERR] y [AZ/SOT], de esta forma fue posible estimar al menos la frecuencia fundamental y la fracción de amortiguamiento crítico en los componentes traslacionales para todos los eventos. Para los modos superiores se establecen intervalos de frecuencia, debido a su poca participación no es posible identificar puntualmente una sola frecuencia.

En los eventos sísmicos 04-2, 04-3 y las VA se que contó con una mayor cantidad de puntos instrumentados lo cual permitió una mejor identificación del las frecuencias naturales y dio la posibilidad del cálculo de las formas modales.

La identificación de propiedades dinámicas se hizo con la metodología del capítulo 3; sin embargo, dependiendo del tipo de instrumentación, se escogieron diferentes cocientes espectrales en cada evento, la diferencia radica en el número de niveles con instrumentación y la posición de estos en el plano de cada nivel. En los eventos sísmicos 04-2 y 04-3 los cocientes que se analizaron incluyen señales extrapoladas, en cambio los eventos VA y el sismo 04-1 se trabajó con señales originales registradas en los puntos donde se colocó la instrumentación.

Para la VA1 se empleó el programa IFCIIA (Guzman, *et al*, 1992), el cual permite la captura y procesamiento espectral convencional. En los otros eventos se usó otro programa recientemente actualizado (Murià-Vila *et al*, 2006). Para la graficación e interpretación del análisis espectral se usaron macros para hojas de cálculo (Cruz *et al*, 2006c). Las pruebas de VA se procesaron a 2048 y 4096 puntos, su uso una ventana de Hanning y un filtro pasa bajas de 30 Hz. En los eventos sísmicos los espectros se calcularon con el total de la señal sin ventanas de ponderación o filtrado adicional, se uso un suavizado de media móvil (Trifunac, 1972).

En el evento 04-1 se identificaron ocho intervalos de frecuencias (como se mencionó, no siempre es posible identificar puntualmente las frecuencias naturales) correspondientes a los tres primeros modos en los componentes traslacionales y dos en el componente rotacional. En los demás eventos, debido a una instrumentación más completa, se identificaron cuatro modos en el componente L, cuatro en T y tres en R.

La identificación de las frecuencias naturales en los componentes L y T se hizo con cocientes azotea entre terreno. En el caso de los eventos VA1, 04-2 y 04-3 se usaron los cocientes $[AZCEN(L)/TERR(L)]$ y $[AZCEN(T)/TERR(T)]$, en los eventos 04-1 y VA3 se usaron $[AZC(L)/TERR(L)]$ y $[AZC(T)/TERR(T)]$ (figura 3.1 para L y figura 3.2 para T).

Los intervalos identificados se comprobaron en los cocientes azotea entre sótano y cuando fue posible cocientes entre niveles intermedios. De esta forma se usaron los cocientes $[AZCEN(L)/SOTCEN(L)]$ y $[AZCEN(T)/SOTCEN(T)]$, para los eventos VA1, 04-2 y 04-3 y los cocientes $[AZC(L)/SOTC(L)]$ y $[AZC(T)/SOTC(T)]$ para los eventos 04-1 y VA3. En los eventos VA1, 04-2 y 04-3 los cocientes de niveles intermedios que se usaron fueron $[AZCEN(L)/NIVCEN(L)]$, $[AZNOR(T)/NIVNOR(T)]$, $[AZSUR(T)/NIVSUR(T)]$. Para el evento VA3 los cocientes fueron $[AZC(L)/NIVC(L)]$, $[AZNE(T)/NIVNE(T)]$, $[AZSO(T)/NIVSO(T)]$. Las gráficas de estos espectros y sus cocientes se encuentran en el apéndice A.

Para la determinación de las frecuencias naturales de torsión, se analizaron las señales entre el centro de la azotea y un punto extremo de la misma; por lo que se escogió el cociente $[AZNOR(T)/AZCEN(T)]$ para los eventos VA1, 04-2 y 04-3; y el cociente $[AZNE(T)/AZC(T)]$ en el evento VA3 (figura 3.3). Para complementar esta identificación, también se analizó el ángulo de fase entre puntos opuestos en azotea. De esta manera, se estudiaron las señales de azotea norte y azotea sur, es decir el cociente $[AZNOR(T)/AZSUR(T)]$ (VA1, 04-2, 04-3) y el cociente $[AZNE(T)/AZSO(T)]$ (VA3), estas gráficas se muestran en la figura 3.4. En los cocientes azotea extremo entre terreno, o azotea extremo entre sótano centro (apéndice A) también se puede identificar al menos la frecuencia fundamental de torsión.

En el evento 04-1, como no se contó con sensores en los extremos, la identificación de las frecuencias naturales en el componente R se hizo en la función de transferencia $[AZCEN(T)/TERR(T)]$ tomando como referencia los intervalos que se identificaron en los otros eventos. A pesar de tratarse de registros en el centro fue posible identificar las frecuencias de torsión.

En los apéndices, para encontrar sus principales frecuencias de vibración se hizo un análisis similar al anterior. Se consideró que los dos niveles apéndice actúan como un subsistema de la estructura principal, con su base en la azotea del edificio (nivel 16) y el nivel AP2 como nivel superior del subsistema. Estas gráficas se muestran de la figura 3.5 a la figura 3.7.

Los resultados del análisis espectral se encuentran resumidos en las tablas 3.1 a 3.3 para los componentes L, T y R. En la tabla 3.4 se muestra el porcentaje de amortiguamiento crítico aproximado con el método del FAD.

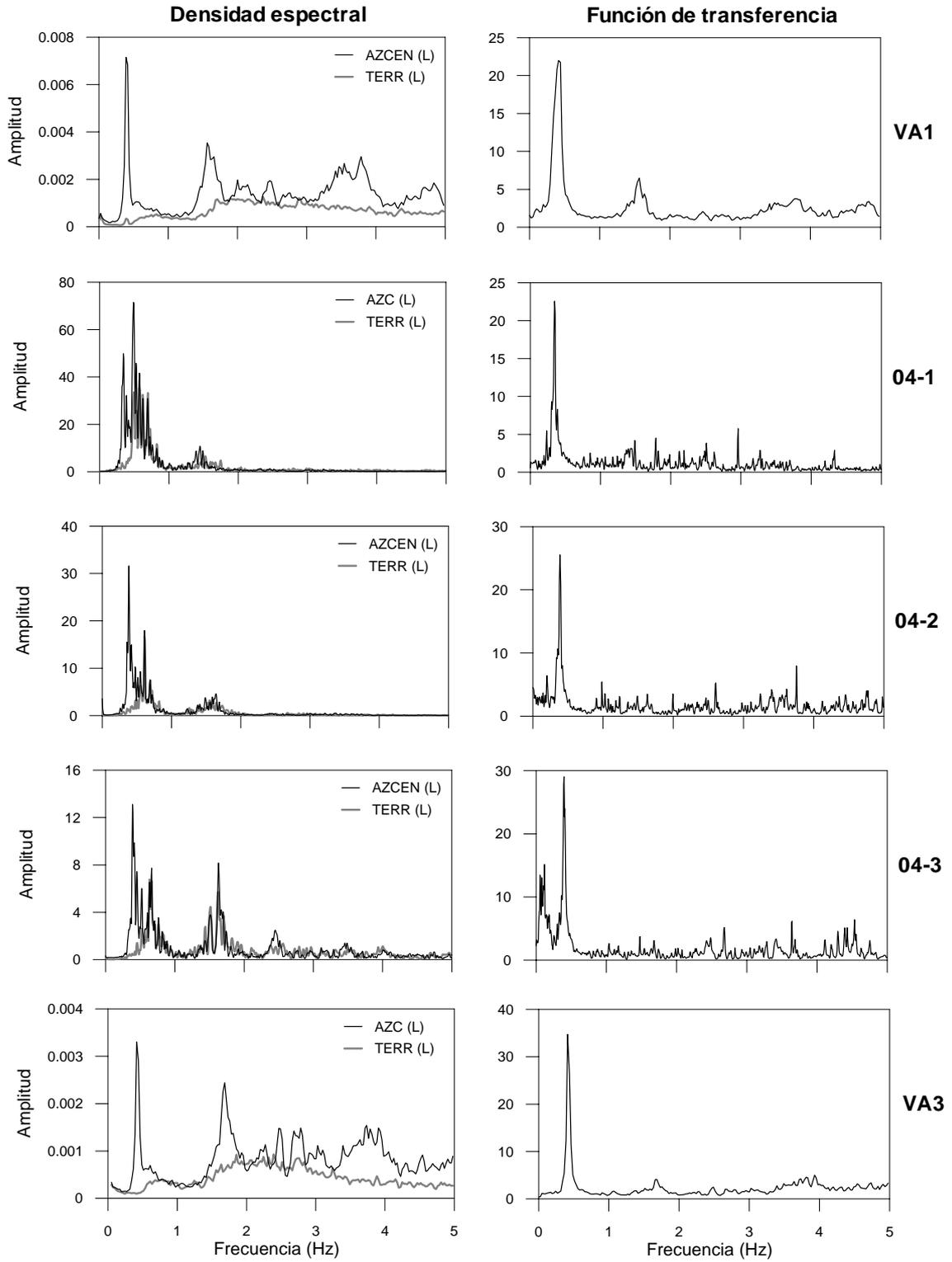


Figura 3.1 Espectros y función de transferencia de las señales azotea centro y terreno en dirección L

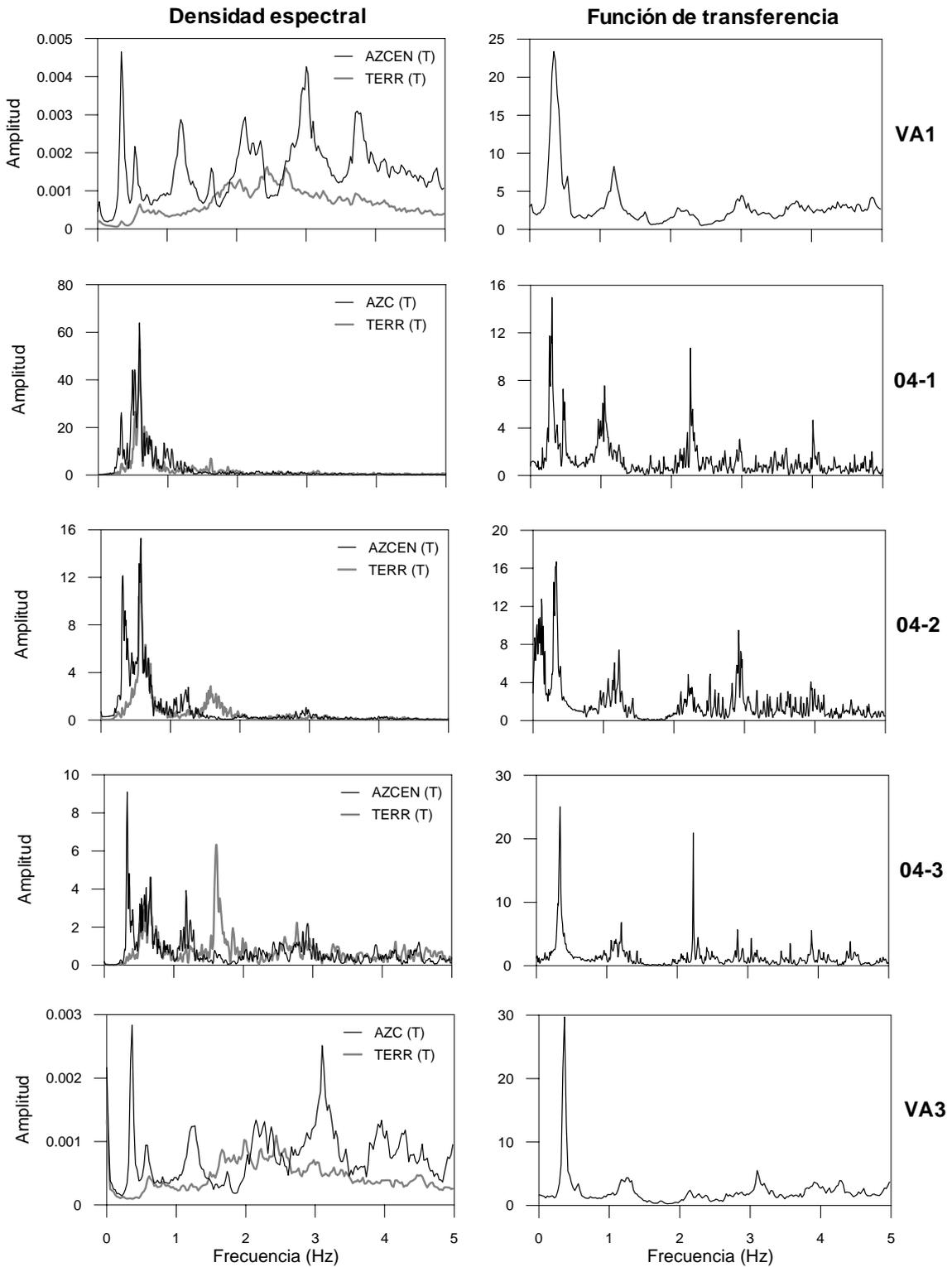


Figura 3.2 Espectros y función de transferencia de las señales azotea centro y terreno en dirección T

Tabla 3.1 Frecuencias naturales del sistema en el componente L

| Evento | Intervalo de frecuencias identificado (Hz) | | | |
|--------|--|---------------|---------------|---------------|
| | Modo 1L | Modo 2L | Modo 3L | Modo 4L |
| VA1 | 0.391 | 1.514 - 1.709 | 3.564 - 3.955 | 4.541 - 5.127 |
| 04-1 | 0.348 | 1.410 - 1.508 | 3.101 - 3.333 | |
| 04-2 | 0.385 | 1.471 - 1.654 | 3.516 - 3.662 | 4.599 - 4.822 |
| 04-3 | 0.397 | 1.550 - 1.740 | 3.375 - 3.564 | 4.376 - 4.846 |
| VA3 | 0.415 - 0.439 | 1.636 - 1.758 | 3.613 - 4.102 | 4.810 - 5.225 |

Tabla 3.2 Frecuencias naturales del sistema en el componente T

| Evento | Intervalo de frecuencias identificado (Hz) | | | |
|--------|--|---------------|---------------|---------------|
| | Modo 1T | Modo 2T | Modo 3T | Modo 4T |
| VA1 | 0.342 | 1.172 - 1.270 | 2.881 - 3.174 | 4.199 - 4.492 |
| 04-1 | 0.293 - 0.305 | 0.995 - 1.105 | 2.228 - 2.325 | |
| 04-2 | 0.33 | 1.160 - 1.239 | 2.856 - 3.009 | 3.918 - 4.083 |
| 04-3 | 0.336 | 1.093 - 1.294 | 2.826 - 2.991 | 3.876 - 4.065 |
| VA3 | 0.366 | 1.221 - 1.294 | 3.076 - 3.125 | 4.150 - 4.346 |

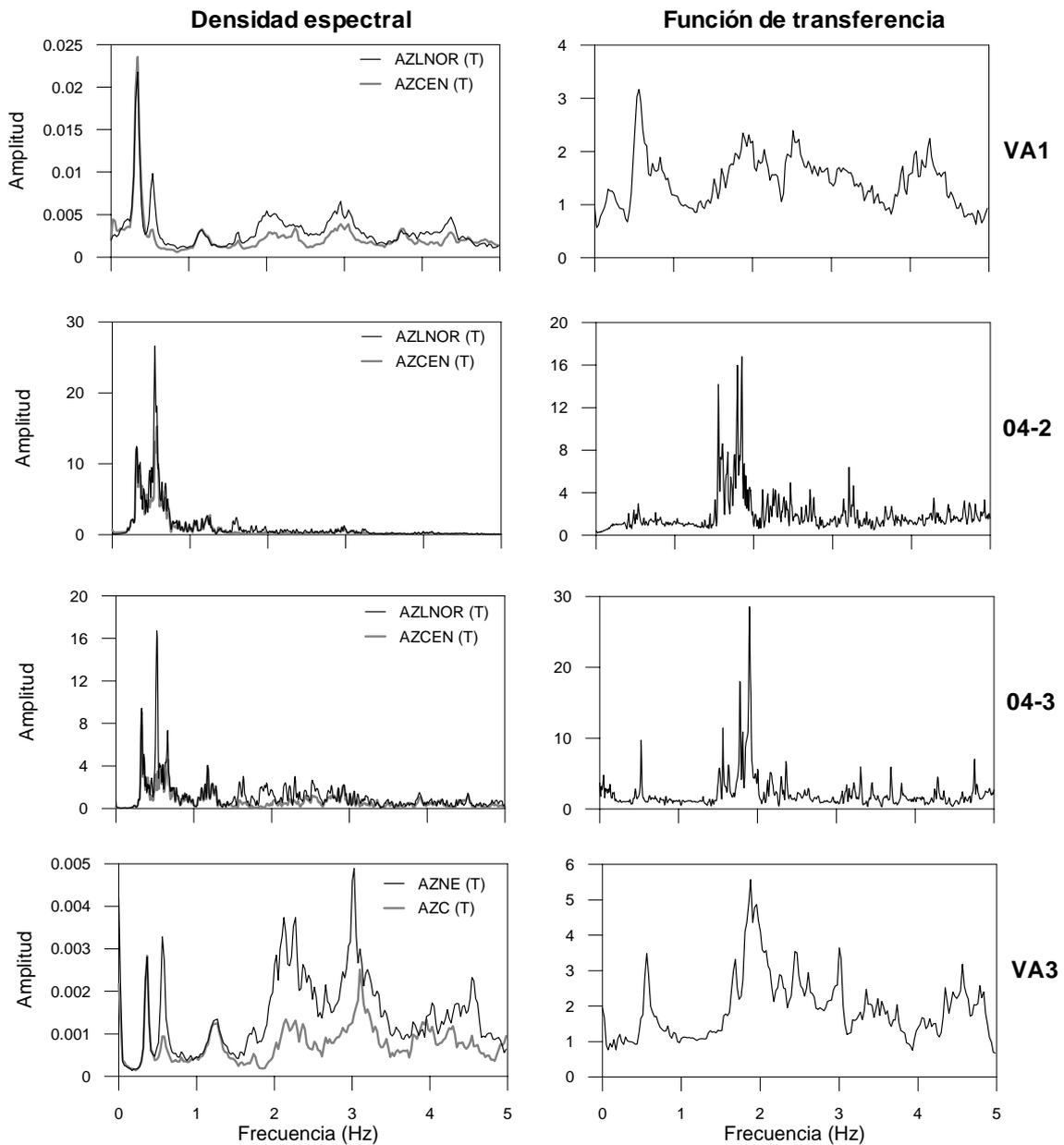


Figura 3.3 Espectros y función de transferencia de las señales azteca norte y azteca centro en dirección T

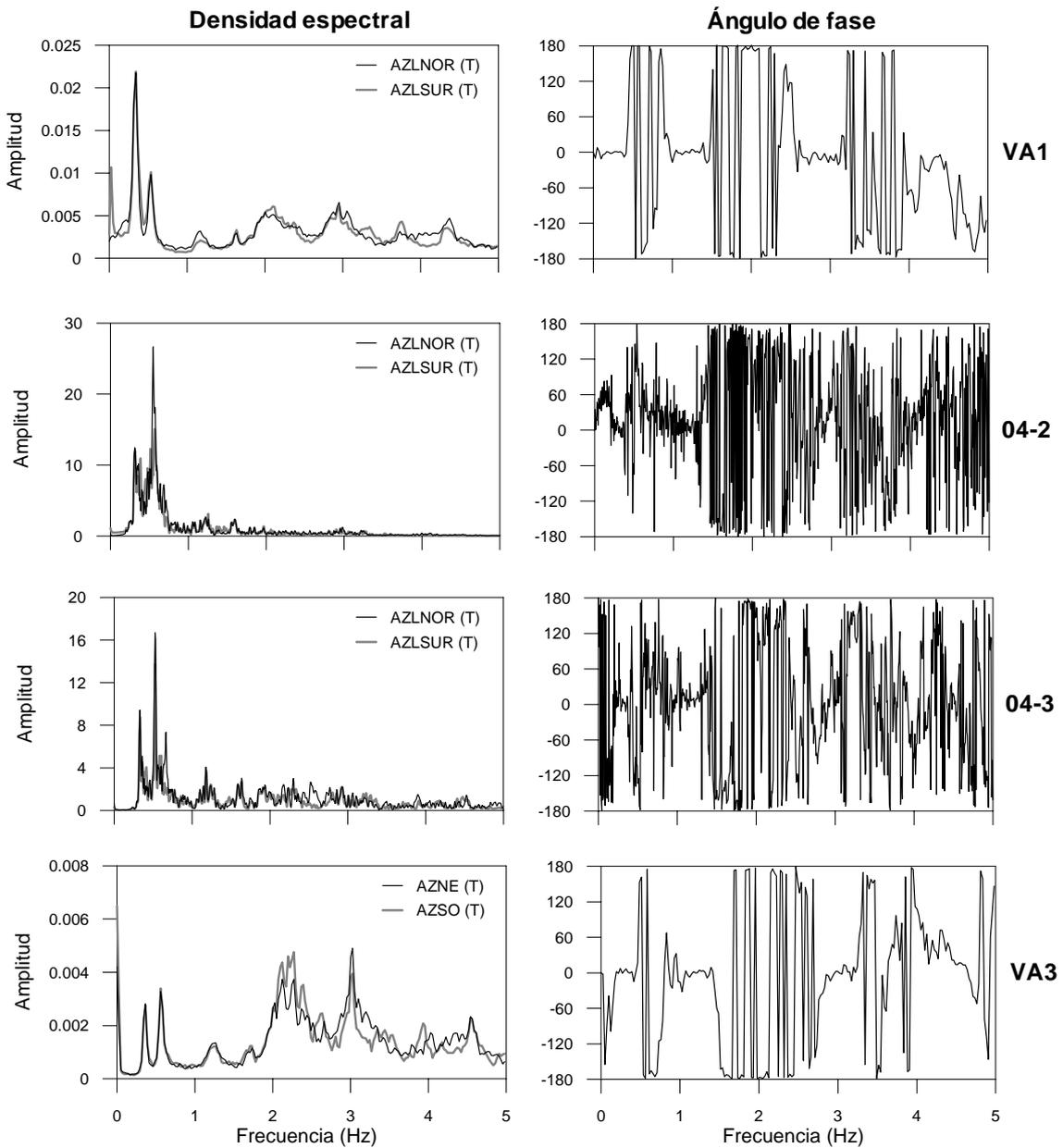


Figura 3.4 Espectros y ángulo de fase de las señales azotea norte y azotea sur en dirección T

Tabla 3.3 Frecuencias naturales del sistema en el componente R

| Evento | Intervalo de frecuencias identificado (Hz) | | |
|--------|--|---------------|---------------|
| | Modo 1R | Modo 2R | Modo 3R |
| VA1 | 0.537 | 1.758 - 2.002 | 3.369 - 3.516 |
| 04-1 | 0.464 - 0.494 | 1.685 - 1.746 | |
| 04-2 | 0.531 - 0.562 | 1.929 - 2.026 | 3.192 - 3.326 |
| 04-3 | 0.507 - 0.537 | 1.825 - 2.045 | 3.156 - 3.271 |
| VA3 | 0.562 | 1.831 - 2.271 | 3.320 - 3.564 |

Tabla 3.4 Porcentaje de amortiguamiento crítico del primer modo

| | VA1 | 04-1 | 04-2 | 04-3 | VA3 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| L | 2.37% | 2.21% | 1.96% | 1.72% | 1.44% |
| T | 2.14% | 3.34% | 3.00% | 2.00% | 1.68% |

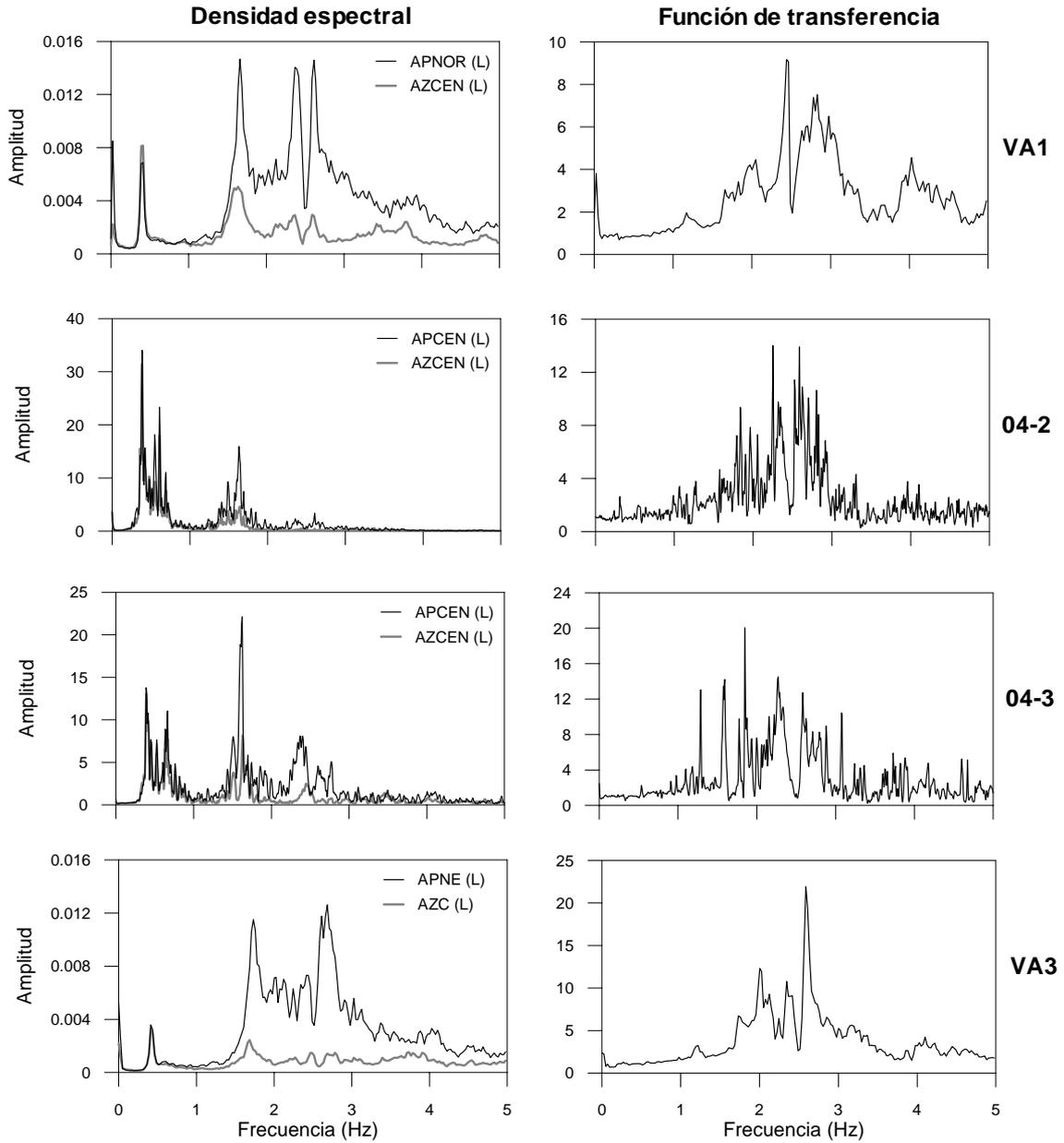


Figura 3.5 Espectros y función de transferencia de las señales AP2 norte y azotea centro en dirección L

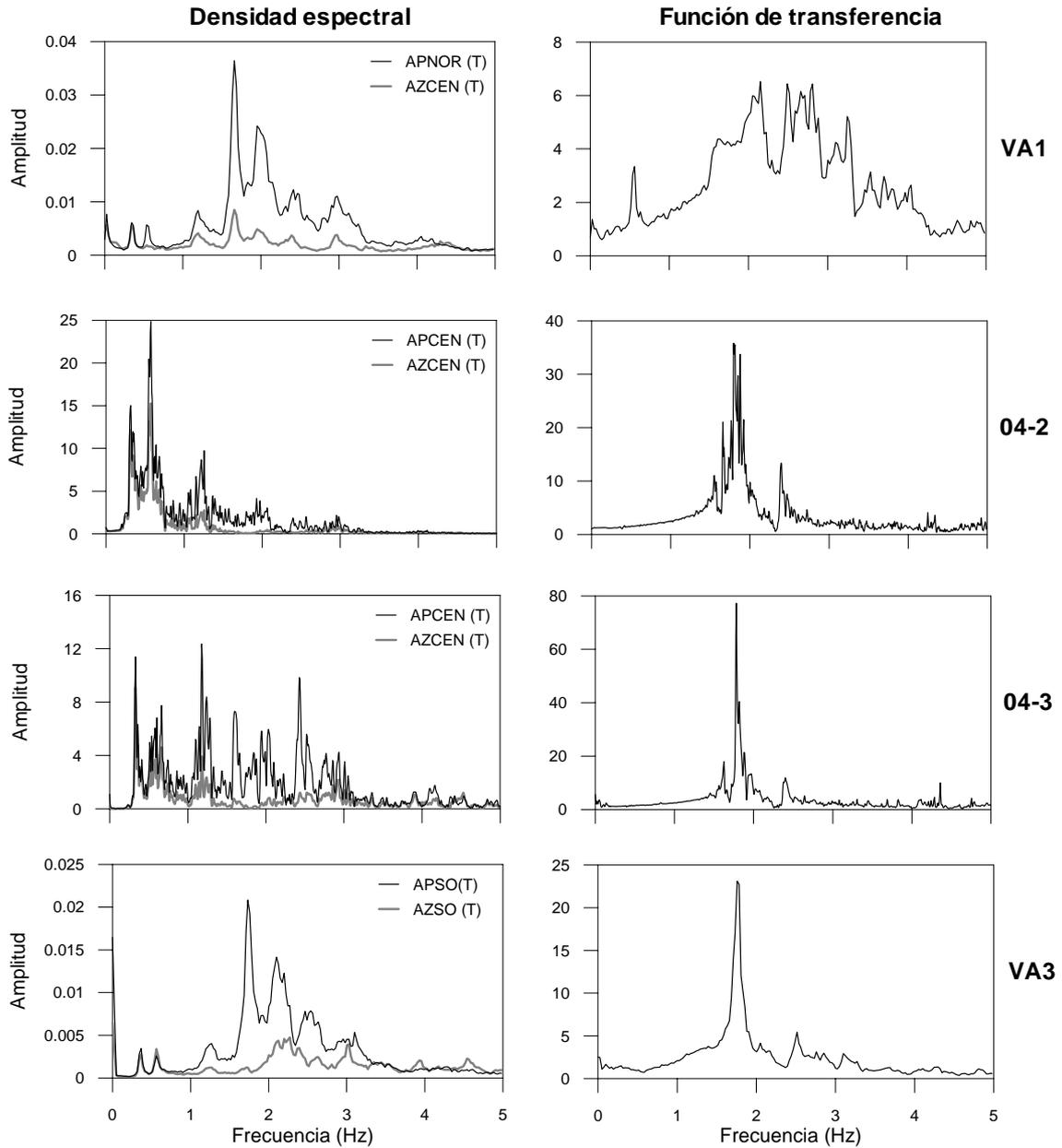


Figura 3.6 Espectros y función de transferencia de las señales AP2 norte y azotea centro en dirección T

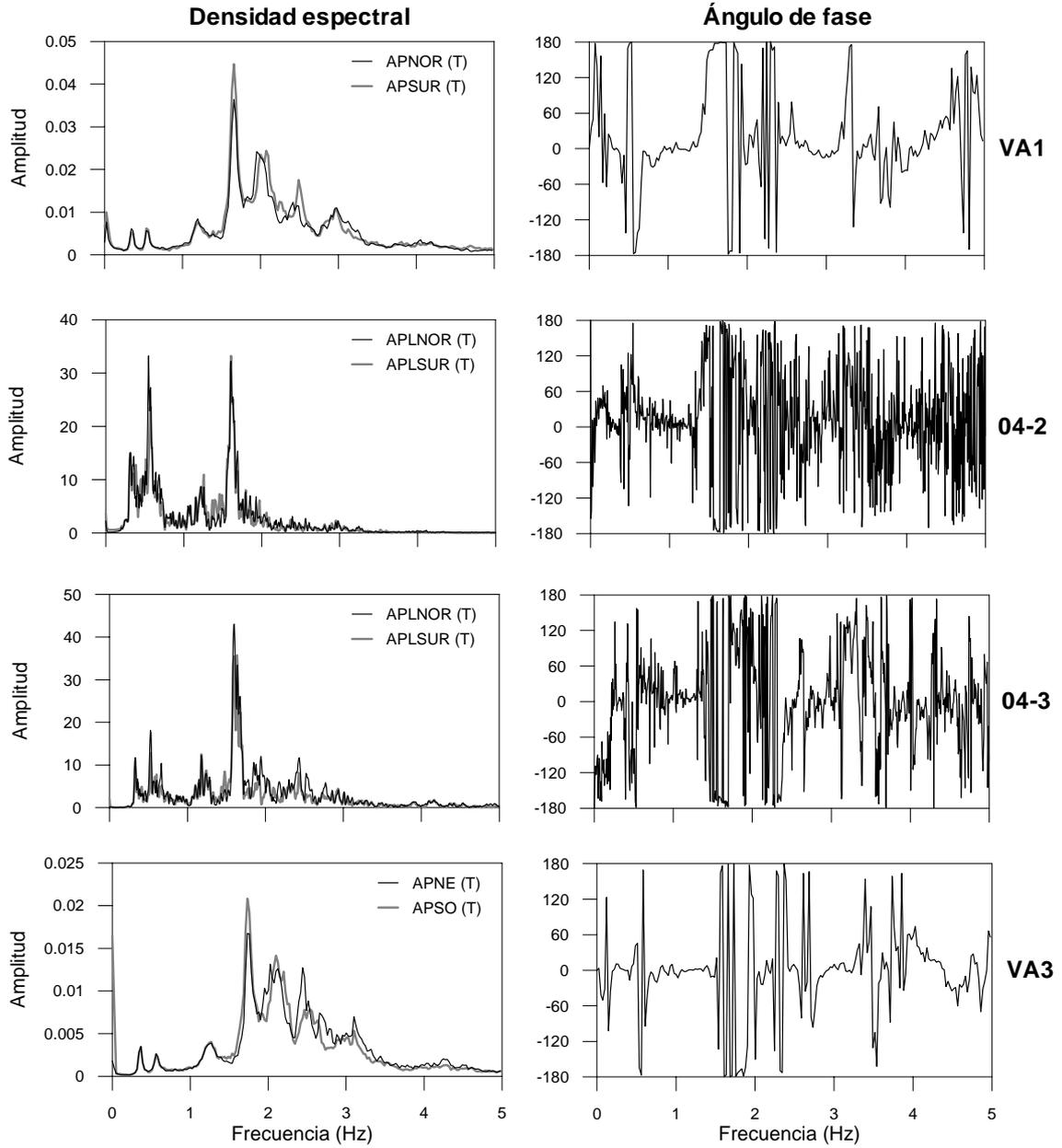


Figura 3.7 Espectros y ángulo de fase de las señales AP2 norte y AP2 sur en dirección T

En los eventos VA1, 04-2 y 04-3 se calculó la forma modal representativa de las frecuencias identificadas. Para el componente L la forma modal corresponde a la que se calculó en el centro geométrico con los cocientes $[NIVCEN(L)/SOTCEN(L)]$ basándose en la metodología del apéndice D. De igual forma para el componente T y R se usa la forma modal calculada en los extremos norte y sur, con los cocientes $[NIVNOR(T)/SOTNOR(T)]$ y $[NIVSUR(T)/SOTSUR(T)]$. La forma modal se trazó con dos variantes una hasta el nivel azotea (figura 3.8) y otra que toma en cuenta los apéndices (figura 3.9).

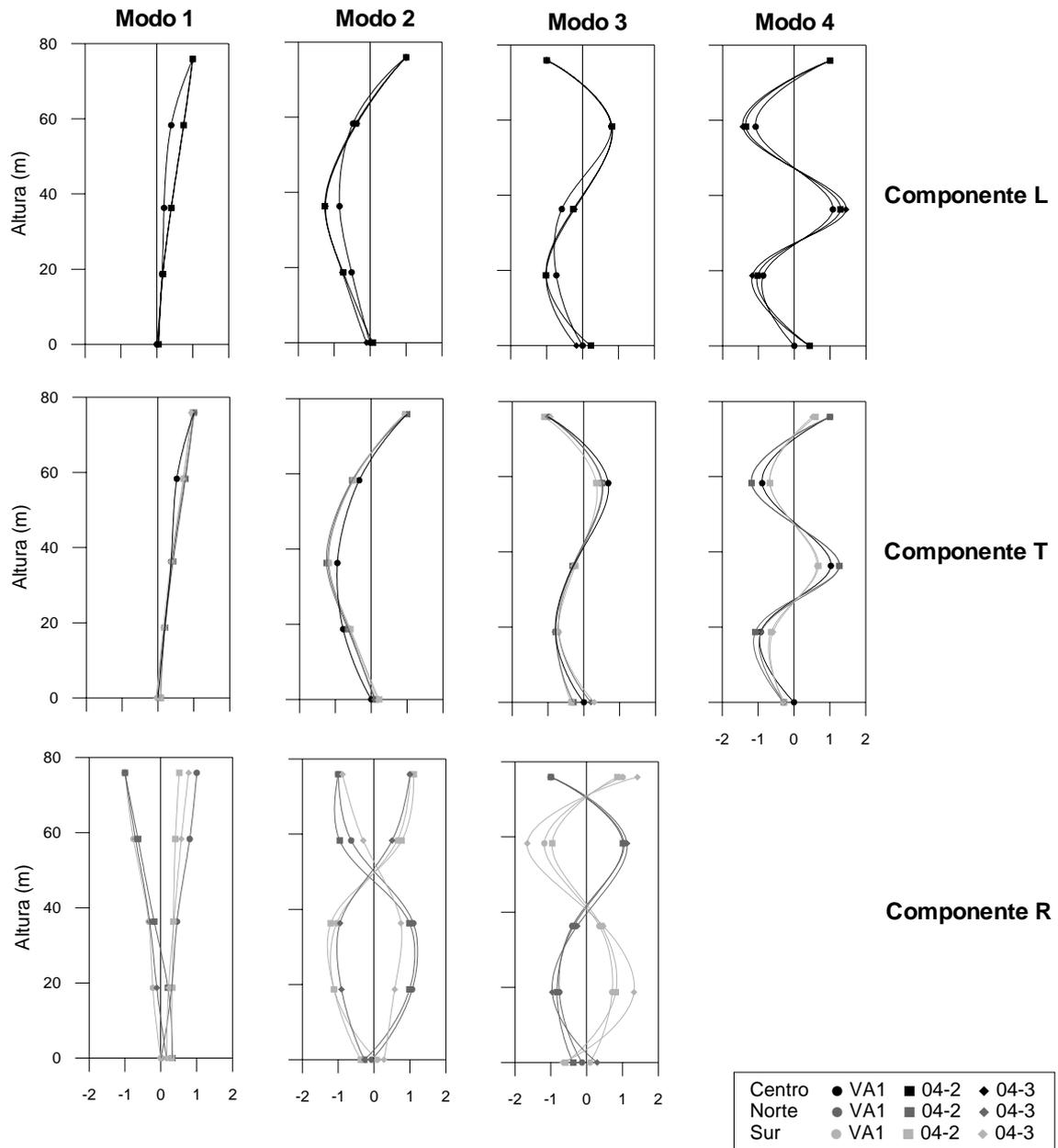


Figura 3.8 Formas modales calculadas con los registros de los eventos sísmicos y VA1

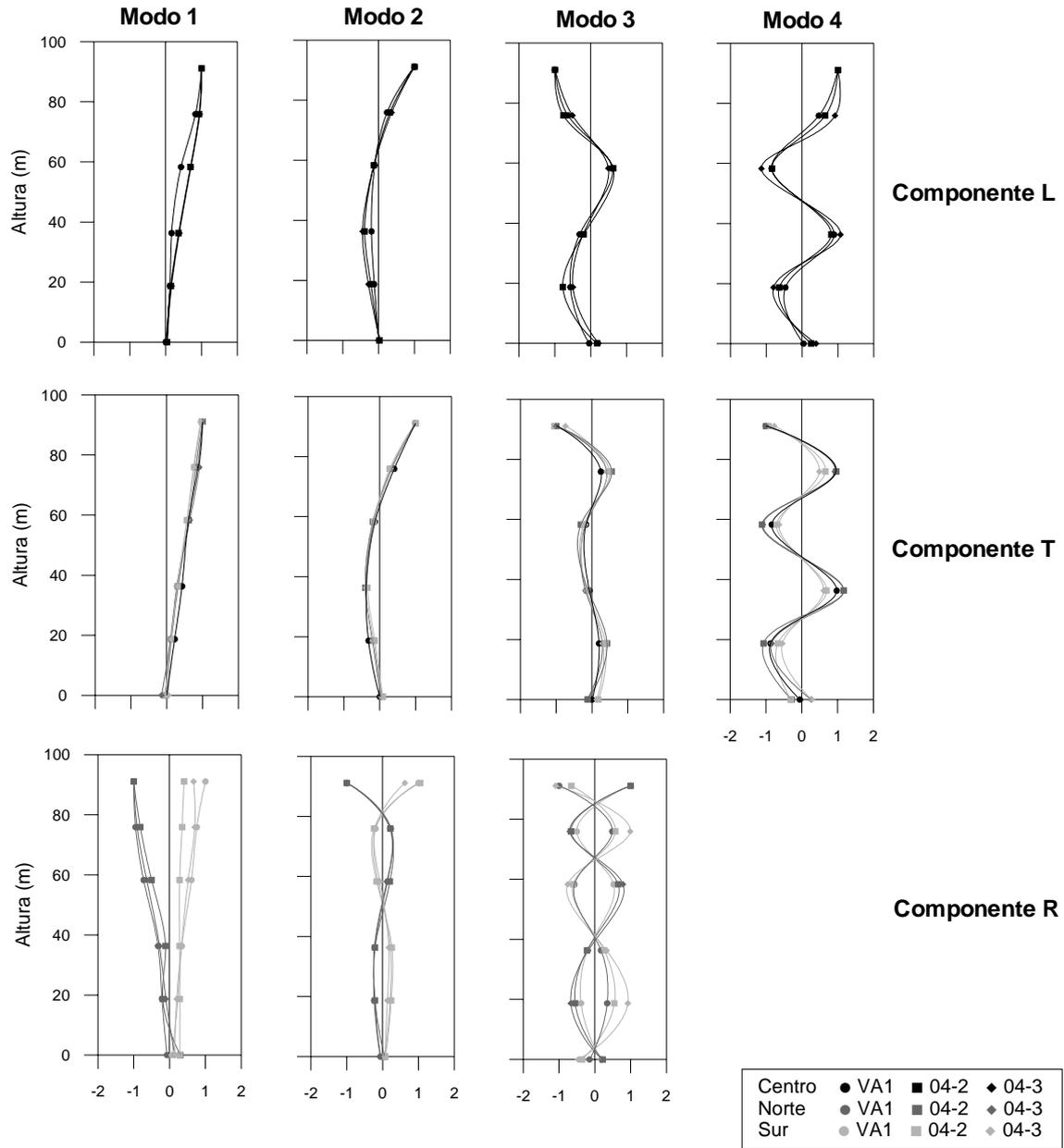


Figura 3.9 Formas modales incluido apéndice calculadas con los registros de los eventos sísmicos y VA1

3.1.2 Análisis paramétrico

Mediante el análisis paramétrico se obtuvieron frecuencias naturales, porcentaje de amortiguamiento crítico, forma modal y participación que corresponden a cada uno de los modos identificados. Los resultados del análisis paramétrico corresponden a modelos chicos para los eventos sísmicos 04-1, 04-2 y 04-3; y dos modelos grandes solamente para el evento 04-2, dados los resultados similares en los modelos y la poca diferencia entre este evento y el 04-3. El evento 04-1 se analizó con el modelo 3D-SIST-ChNR ya que con la instrumentación provisional no existen los registros para calcular la señal de respuesta en torsión, de igual manera se empleó este modelo en los eventos 04-2 y 04-3 para validar la identificación de modos de torsión si tener una señal en la cual el efecto de torsión se enfatice.

Los eventos sísmicos se dividieron en ventanas de tamaño variable de acuerdo a la intensidad, lo suficientemente cortas para mostrar la variación de parámetros a lo largo del evento y lo adecuadamente extensas para tener suficiente información en la ventana y hacer una correcta

identificación. Se procuró que en las ventanas no se mezclaran las diferentes etapas del sismo, la fase de bajas amplitudes con la fase intensa, o fase intensa con vibración libre.

En el proceso de identificación, los modos se ordenan y nombran de menor a mayor de acuerdo al valor de la frecuencia y al componente al cual se asocian. Generalmente este orden coincide con el porcentaje de participación del modo en las señales del componente donde predomina y es referencia de la importancia del modo en las respuestas.

En todos los eventos y con todos los modelos se logro una adecuada identificación de los diferentes parámetros dinámicos. Con cada modelo al menos se identificaron las frecuencias fundamentales en L, T y R. Los errores fueron usualmente menores que 40% y en la mayoría de las señales de respuesta la contribución de los modos que se identificaron fue mayor a 80%. Estos criterios de ajuste han sido los usados en otros trabajos similares (Toro, 1997; Murià-Vila *et al*, 2001; Zapata, 2001; Palacios, 2003; Taborda, 2003; Correa, 2005) y garantizan una buena aproximación.

Hubo dificultades en la estimación de algunos amortiguamientos y en la identificación de modos superiores. La identificación de los modos superiores se dificultó debido a su poca participación y al acoplamiento entre ellos. En estos casos se recurrió a la comparación entre modelos y a los resultados del análisis no paramétrico.

En el caso de los amortiguamientos el problema, debido a errores numéricos, consiste en que el valor al que converge el modelo no es propio para el tipo de estructura. Cuando esto sucede se fija el amortiguamiento del modo conflictivo a un valor más adecuado y se continua con la identificación de los demás parámetros. Los valores a los cuales se fija el amortiguamiento no son valores arbitrarios, se basan en la intensidad del movimiento en la ventana y se toma como referencia las demás ventanas y otros resultados para el mismo evento, buscando favorecer la frecuencia que se identificó antes de fijar el valor del amortiguamiento. A lo largo del trabajo con varios modelos se notó que el valor fijado del amortiguamiento tiene poca influencia en la identificación de los otros parámetros y que no hay gran diferencia en cuanto a errores al usar el amortiguamiento que se identificó o un propuesto.

En las figuras 3.10 a 3.12 se muestran los resultados de los modelos paramétricos en los componentes L, T y R. En línea continua se presenta el valor de la frecuencia estimada del análisis espectral de la señal completa. Para L y T se grafican las frecuencias y amortiguamientos de los primeros dos modos, para R solamente el modo fundamental. En el caso del evento 04-2 también se presentan los resultados de un modelo grande. En estas figuras además se muestran los errores, en la señal de azotea en el respectivo componente, al final de la identificación con todos los modos. Las participaciones de los modos mencionados en las señales de azotea y otros niveles instrumentados para el evento 04-2 se presentan en la figura 3.13.

En la figura 3.12 se grafican la señal de respuesta en azotea en el componente R para los eventos en que fue posible calcularla y la señal de respuesta en azotea en el componente T, dado que la participación de modo de torsión es mayor en el componente T con respecto a L. De igual forma los errores para los modelos 3D-SIST-ChNR corresponden a la señal de de traslación en T. En esta misma figura también se grafican los resultados de la estimación de frecuencias y amortiguamientos del primer modo de torsión con el modelo 3D-SIST-ChNR en los eventos 04-2 y 04-3.

Los dos tipos de modelos grandes, 3D-SIST-GLR y 3D-SIST-GT, tienen señales en común y los resultados de ambos son casi iguales y se confirman entre si, es por eso que en las figuras antes mencionadas solamente se grafican los resultados de un modelo grande. En el caso de gráficas correspondientes a los componentes L y R se presentan los resultados del modelo 3D-SIST-GLR y para el componente T resultados del modelo 3D-SIST-GT.

Las gráficas correspondientes a los modos superiores para los eventos 04-2 y 04-3, así como las comparaciones entre las señales medidas y las calculadas de todos los modelos se encuentran en el apéndice A.

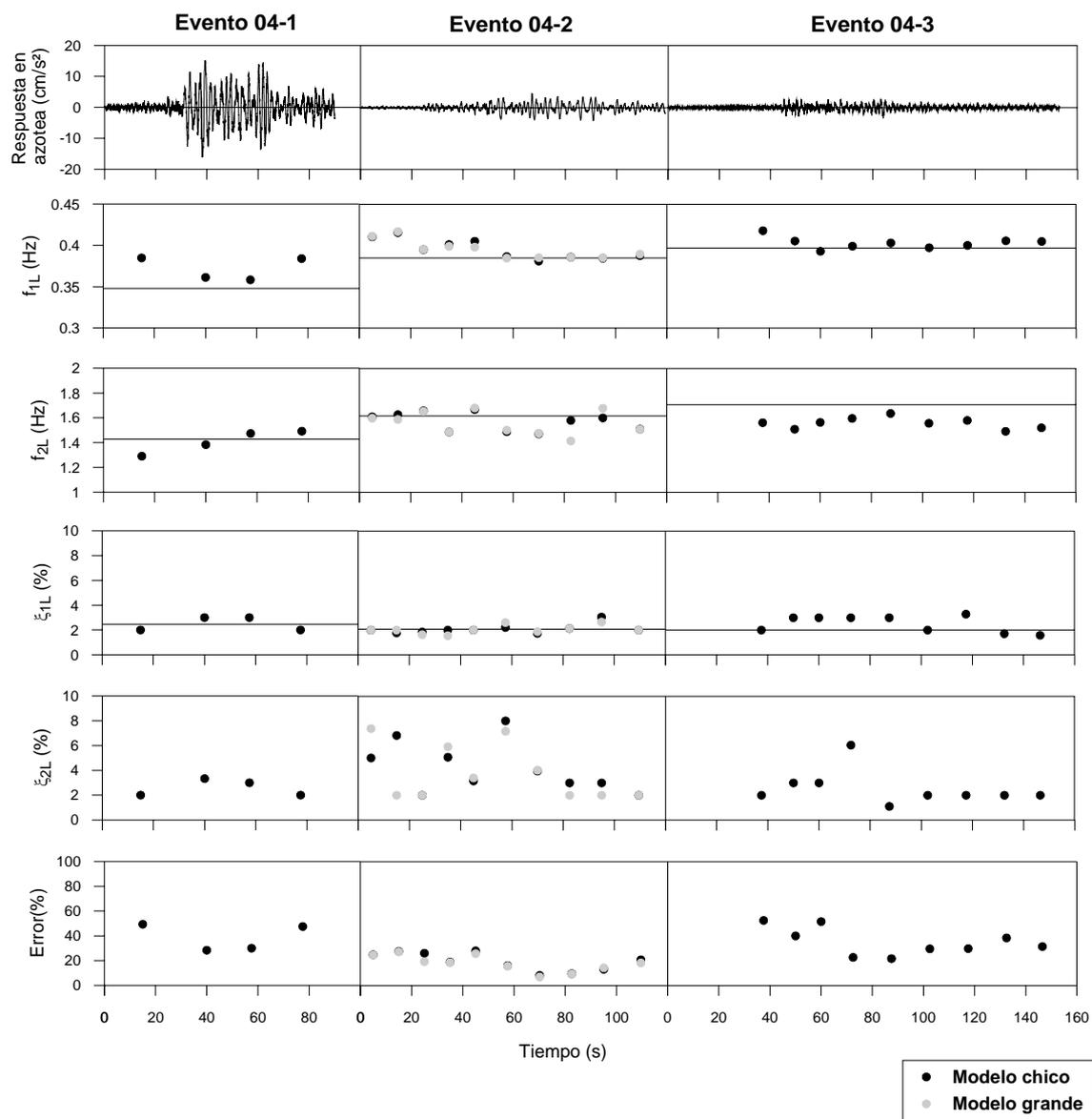


Figura 3.10 Resultado de los modelos paramétricos del sistema en el componente L

El evento 04-1 se dividió en cuatro ventanas sin traslape, la primera de 30 s, la segunda y tercera de 20 y 15 s respectivamente (correspondientes a fase intensa) y la cuarta de 15 s; se escogieron ventanas grandes ya que las amplitudes no varían significativamente y dieron mejores resultados en cuanto a identificación de frecuencias y errores que ventanas más chicas. El sismo 04-2 se dividió en 10 ventanas, unas de 10 s y otras de 15 s, de acuerdo a la intensidad del movimiento en cada una de ellas y al número máximo de puntos que se pueden procesar en los modelos grandes. El evento 04-3 se dividió en 11 ventanas, dos de 10 s al inicio de la fase intensa y el resto de 15 s; las amplitudes bajas de las señales de las primeras dos ventanas impidieron que se pudiera obtener una buena identificación de las propiedades dinámicas en estas ventanas por lo que se descartan.

Con los registros en el evento 04-1 se pudieron identificar satisfactoriamente cinco modos, dos en el componente L, dos en T y uno en R, a pesar de no tener la descomposición de la señal de respuesta en torsión. Para el evento 04-2 en los tres modelos y en todas las ventanas se identificaron 12 modos, 4 en cada componente. En el sismo 04-3 en las ventanas comprendidas entre 65 s y el final del registro se identificaron 12 modos, que corresponden a los cuatro primeros modos en cada componente, identificados anteriormente en los modelos de los otros eventos y en el análisis espectral. En las ventanas 3, 4 y 5 (de 30 a 65 s), se

encontraron 13 modos, los cuales son los mismos que en las otras ventanas más un modo no identificado previamente, cuyo valor de frecuencia es muy cercano a la del primer modo en L.

En cuanto al amortiguamiento, las dificultades para obtener valores apropiados se presentaron en general en los modos superiores, en el componente R (incluso desde el primer modo), en todo el evento 04-1, y en las ventanas con amplitudes pequeñas. Al fijar el amortiguamiento fuera de escala aumenta el error entre 1 y 5%, sin embargo se mejora la identificación de los siguientes modos y permite que el modelo represente de manera adecuada al sistema que está identificando.

En las gráficas de las figuras 3.10 a 3.12 se puede observar la variación de los valores de frecuencia en el tiempo, y su comportamiento en las etapas del sismo. En la fase inicial de amplitudes bajas, hay valores altos de frecuencia mientras que van disminuyendo, por lo general, en la fase intensa del sismo (sobre todo los primeros modos de vibrar) y una posterior recuperación en la fase final del sismo. En el evento 04-1, los cambios en los valores de frecuencia son más drásticos de una ventana a otra. Para la primera ventana tenemos frecuencias del orden de una VA, en la ventana siguiente, las frecuencias corresponden a las que se identificaron espectralmente con la señal completa del evento, y en la última ventana tienen un valor intermedio.

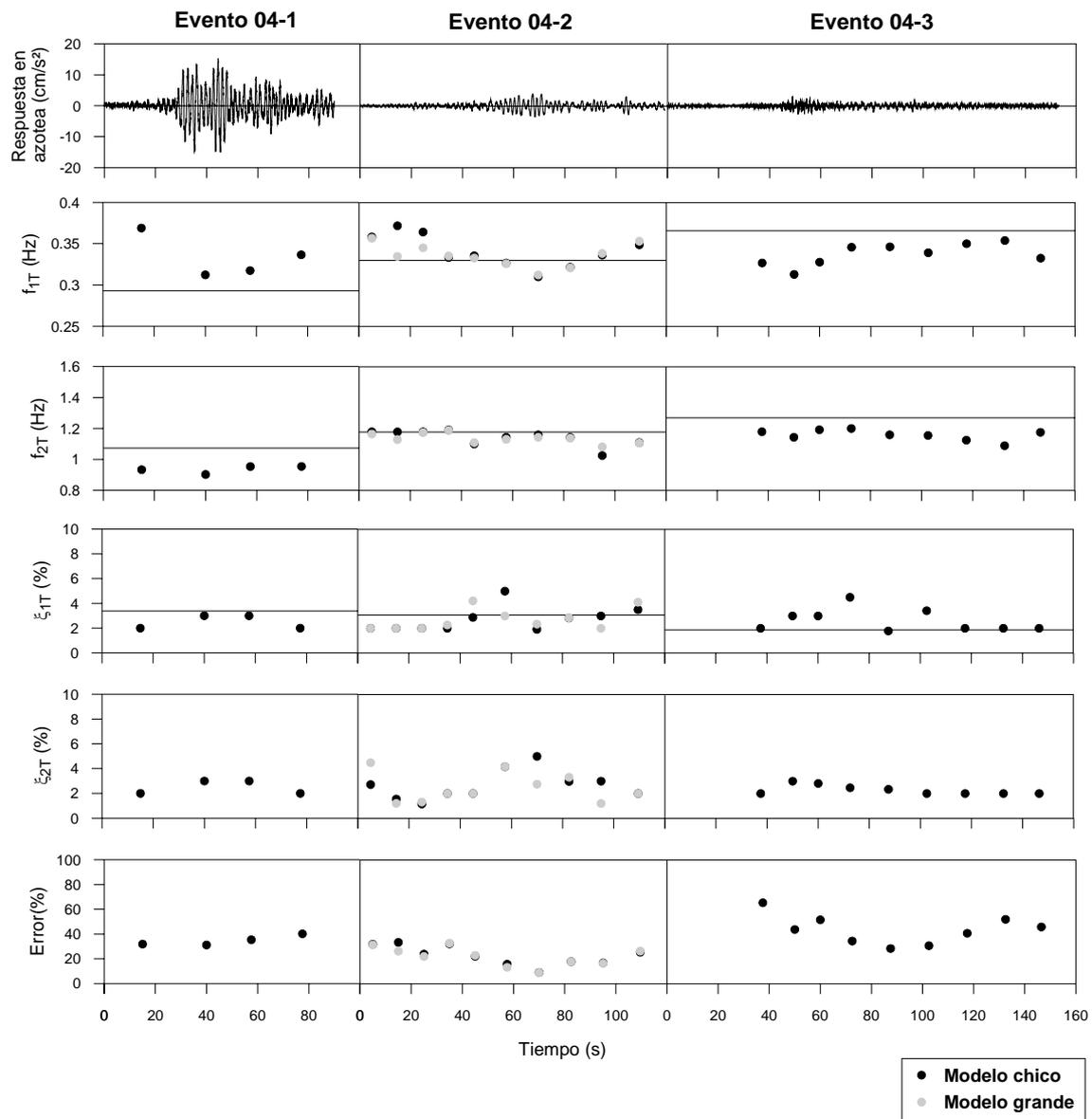


Figura 3.11 Resultado de los modelos paramétricos del sistema en el componente T

Para el componente R la variación de frecuencias parece ser mayor en los evento 04-2 y 04-3 que en el evento 04-1, que es el más intenso. Esta situación se cree es atribuible principalmente a la calidad de los registros de terreno en el evento 04-1 y no a la falta de una señal de torsión. El análisis de los eventos 04-2 y 04-3 con el modelo 3D-SIST-ChNR muestra que la identificación, al menos de los primero cinco modos tridimensionales (1L, 1T, 1R, 2L y 2T), es similar a modelos 3D-SIST-Ch. Obviamente se desconocen las participaciones en el movimiento de torsión y no se tienen errores directamente relacionados con el componente, pero las frecuencias son equivalentes a las encontradas con modelos completos.

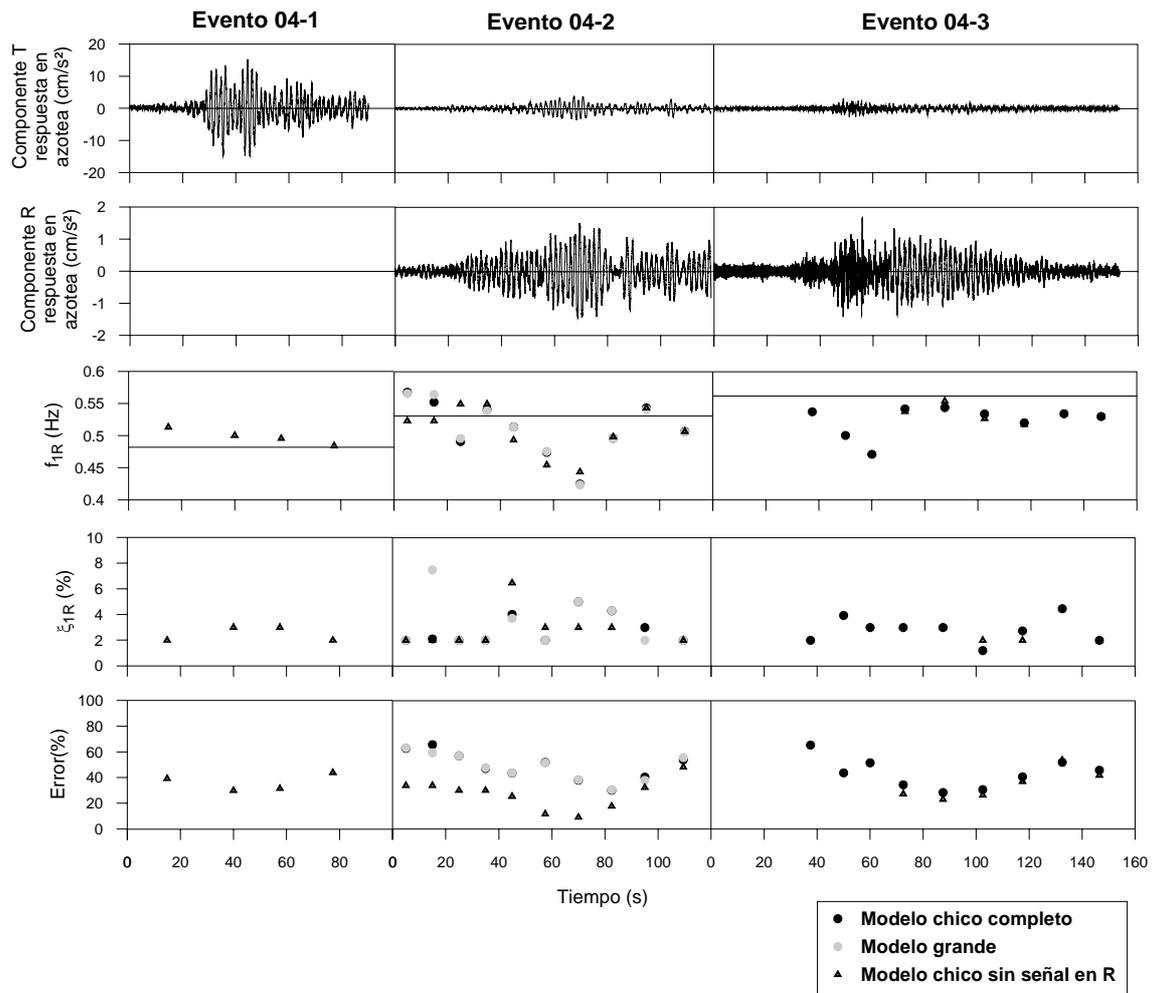


Figura 3.12 Resultado de los modelos paramétricos del sistema en el componente R

Los primeros dos modos, en los tres componentes, se identificaron sin dificultades, en cambio para el tercer y cuarto modo se tuvieron complicaciones. Estas se atribuyen a la baja participación de los modos superiores y al acoplamiento. En cuanto a este punto, cabe destacar el fuerte acoplamiento entre el tercer modo en L y tercer modo en R, el cual no fue evidente en el análisis espectral.

Como es de esperarse, el modo fundamental en cada componente predomina en sus respectivas señales de respuesta y; en las señales de niveles que se encuentren en un punto donde la amplitud modal es máxima, la participación del modo en cuestión es considerable (por ejemplo el segundo modo en la respuesta en el nivel 7 en los componentes L y T). En el evento 04-1, la participación total en las señales de los componentes L y T de los modos identificados fue aproximadamente de 75% en la primera y última ventana, y de 90% en las ventanas intermedias. En los eventos 04-2 y 04-3 los modos fundamentales en L y T en la señal de azotea en su respectiva dirección tienen entre 90 y 98% del total de la participación de todos

los modos, en comparación con el evento 04-1 donde la participación de los modos fundamentales es entre 80 y 90% del total.

En ocasiones, debido a la baja contribución y al acoplamiento, los modos superiores no predominan en el componente al cual se asocian. En el caso de la participación de los modos de torsión, esta no es tan alta en las señales de este componente, como lo son las participaciones de los modos traslacionales en las señales correspondientes, esto provoca que las señales de torsión sean las que presentan un mayor acoplamiento.

En el evento 04-3 se identificó una fluctuación en el valor de la frecuencia del modo fundamental en el componente T, en tres ventanas del evento. Esta fluctuación se manifiesta como un modo adicional a los identificados en otras ventanas y en los otros modelos, pero no es lo suficientemente trascendental como para diferenciarse del intervalo de frecuencias del modo fundamental identificado en el análisis espectral. Para estudiar a detalle esta fluctuación se hicieron comparaciones entre procesos con y sin el modo en cuestión y se analizó el evento con modelos planos, de esta forma se aclara que el modo no identificado previamente es propio del sistema y se asocia a un comportamiento no lineal del modo fundamental en T.

De esta forma en las ventanas 3, 4 y 5 se identifican cinco modos en el componente T, el modo fundamental, debido a la fluctuación, se identificó en el análisis paramétrico como dos modos, el modo 1T correspondiente al que se identificó anteriormente y el modo 2T, que es el modo no identificado previamente. Los siguientes modos 3T, 4T y 5T corresponden a los modos superiores también identificados anteriormente. En estas ventanas el modo 2T, tiene mayor participación en la señal de respuesta en dirección T que el modo 1T cuya frecuencia es menor. Inclusive en estas ventanas el modo 2T tiene mayor participación en la señal de respuesta en dirección L que el segundo modo en este componente (2L). En las siguientes ventanas las participaciones se comportaron de manera similar a los modelos del evento 04-2 y el orden de los modos se reestablece.

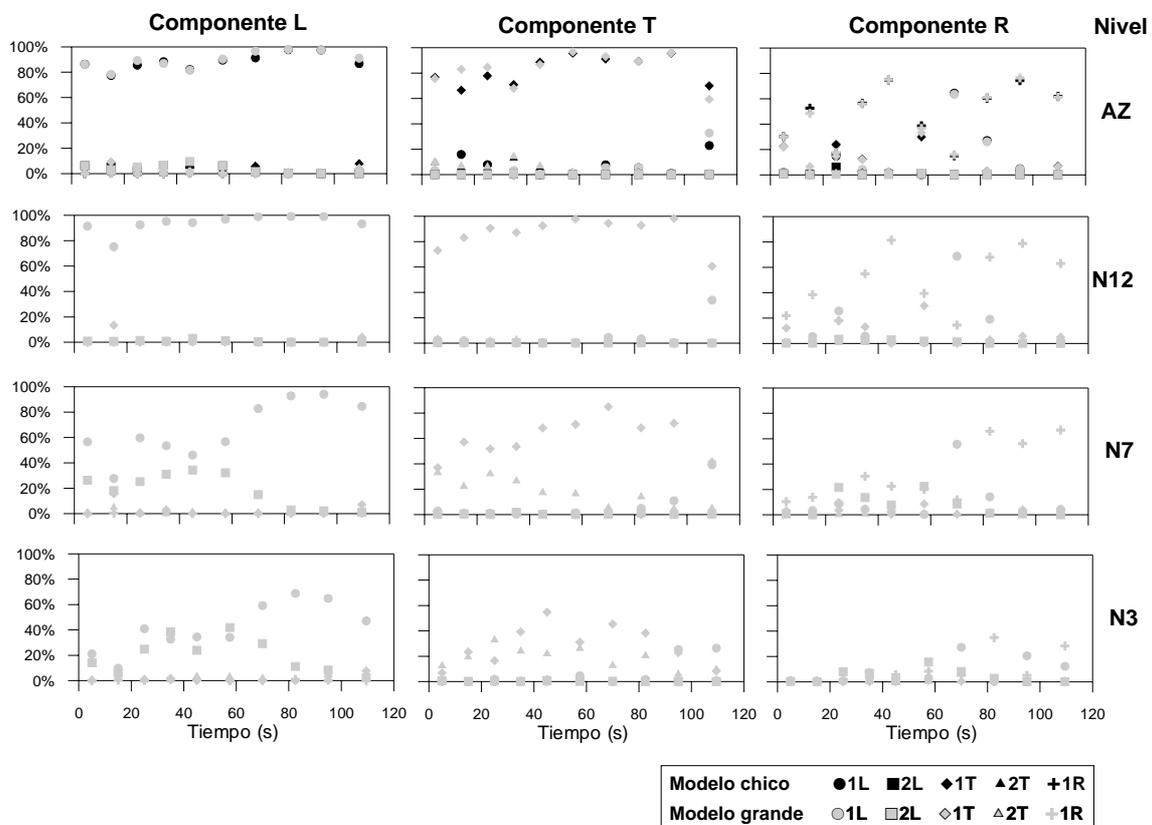


Figura 3.13 Participación de los primeros modos en los modelos paramétricos

3.2 Estimación de los efectos de interacción suelo-estructura

En edificios desplantados en suelos blandos, como el edificio TC, los efectos ISE influyen en la respuesta dinámica del sistema. Para evaluar las características de los efectos ISE se usarán las metodologías que se plantearon en el capítulo 3 y posteriormente se compararán los resultados, en cuanto a rigideces, con un estudio analítico de la cimentación.

Para los eventos sísmicos 04-2 y 04-3, por medio del análisis espectral se estimaron las frecuencias del movimiento de traslación y giro de la base, así como de la estructura con base empotrada. Para el evento 04-2, se obtuvieron, a través de los modelos paramétricos, las propiedades dinámicas de los movimientos antes mencionados. El método de Luco se aplicó en la VA3 y en los eventos sísmicos con instrumentación permanente, además el evento 04-2 se dividió en ventanas y cada una de ellas se analizó con el método de Luco.

3.2.1 Análisis espectral

Una de los primeros acercamientos al estudio de los efectos ISE se da a través del cálculo de los cocientes espectrales [SOT/TERR], en el cual de manera general advierte la presencia de efectos ISE. En la figura 3.14 se muestran estos cocientes en los componentes L y T para todos los eventos que se analizaron.

En estos cocientes se nota una diferencia entre el movimiento del terreno y el movimiento del sótano. En frecuencias bajas (menores a 1 Hz) la diferencia es pequeña y el valor del cociente oscila en la unidad, para frecuencias mayores las diferencias se incrementan. Este fenómeno se puede explicar debido un filtrado natural de la cimentación, ya que la rigidez de esta abate los movimientos cuya longitud de onda son menores a la longitud de la cimentación.

Espectralmente los cocientes [SOT/TERR] se usan para exponer de manera general los efectos ISE. Los cocientes de las ecuaciones (3.28) a (3.32) se usan para determinar las frecuencias, o intervalos de frecuencia, que se asocian a los movimientos de modelo idealizado para el estudio de los efectos ISE.

Para determinar las propiedades dinámicas de la estructura con base empotrada se emplea el cociente espectral FT_e de la ecuación (3.28) en los eventos 04-2 y 04-3. En el evento 04-1 a falta de señales para calcular el cabeceo, lo más cercano a una estructura con base empotrada es un sistema sin traslación en la base; de esta forma para este evento se usará, a manera de aproximación, el cociente [AZ/SOT] para comparar la estructura con el sistema. En estos cocientes se identificaron las frecuencias fundamentales y porcentajes de amortiguamiento resumidos en la tabla 3.5.

En cuanto a frecuencias fundamentales, los valores del sistema suelo-estructura son apenas un poco menores que los de la estructura con base empotrada. En el evento 04-2 la frecuencia de la estructura resultó 6.2 y 3.6% mayor para los componentes L y T, respectivamente. Para el evento 04-3 las diferencias fueron del 12.3% en L y 3.6% en T. En el evento 04-1 la diferencia entre la frecuencia fundamental del sistema y la estructura sin traslación de la base fue de aproximadamente 2% en ambas direcciones. Estos resultados muestran que en los eventos 04-2 y 04-3 hay mayores diferencias entre los componentes L y T en cuanto a la comparación de las frecuencias del sistema y la estructura.

Los valores del porcentaje de amortiguamiento crítico son muy similares también y aunque en algunos casos menores en la estructura, como es de esperarse, no siempre se cumple. Para ejemplificar estas diferencias se presentan en la figura 3.15 y 3.16, el cociente espectral [AZ/TERR] y el FT_e [AZ/(SOT+CAB)] así como los espectros de las señales con que se calcularon.

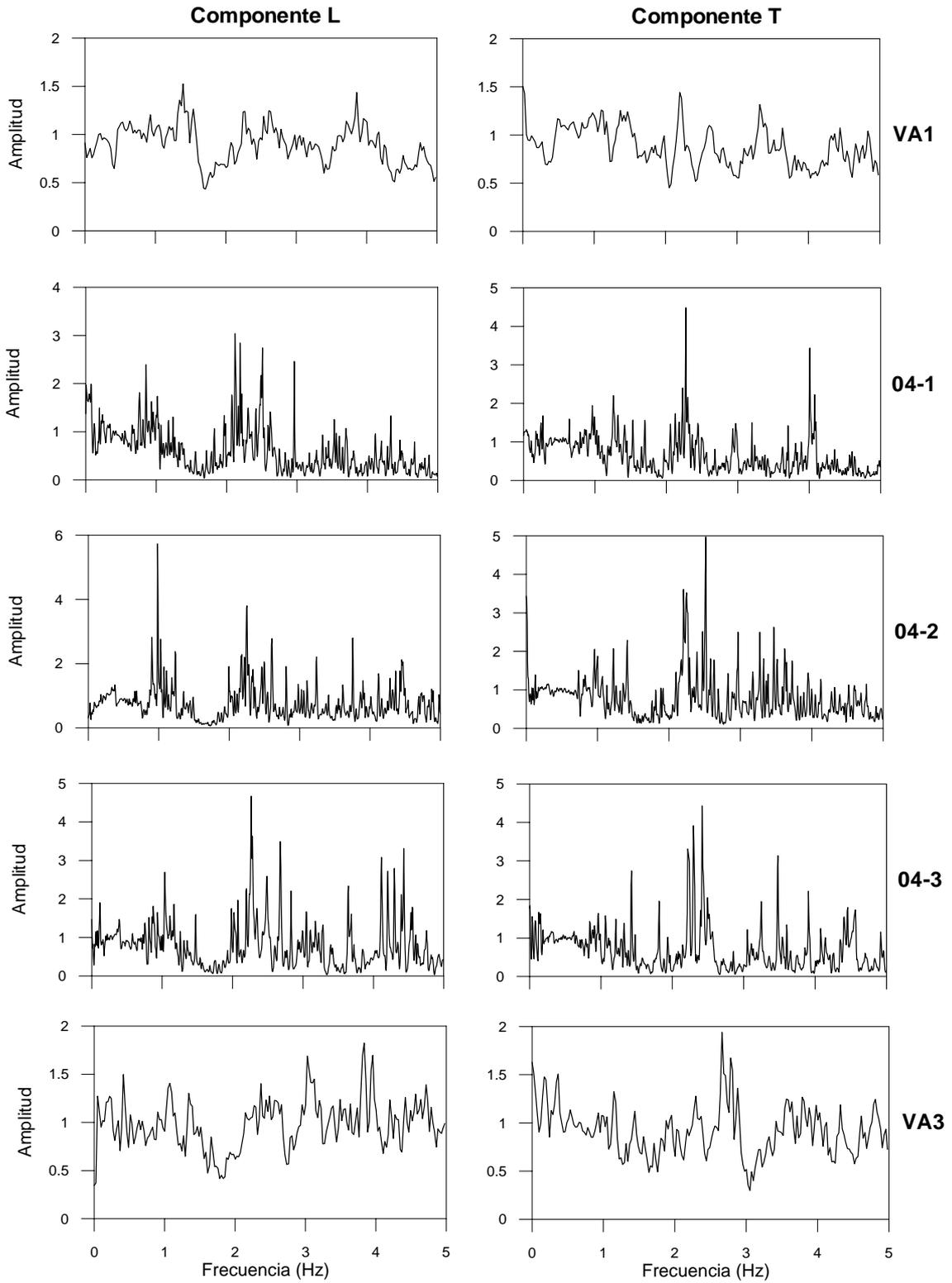


Figura 3.14 Función de transferencia [SOT/TERR] eventos analizados

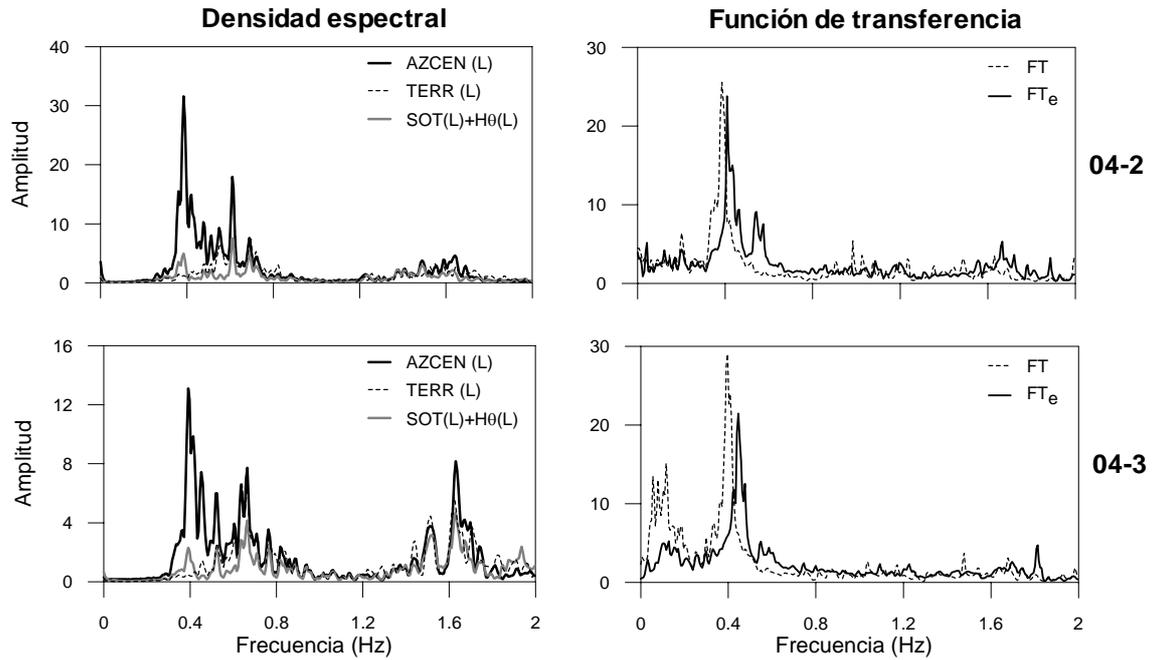


Figura 3.15 Espectros y FT para el sistema suelo-estructura y la estructura con base empotrada en L

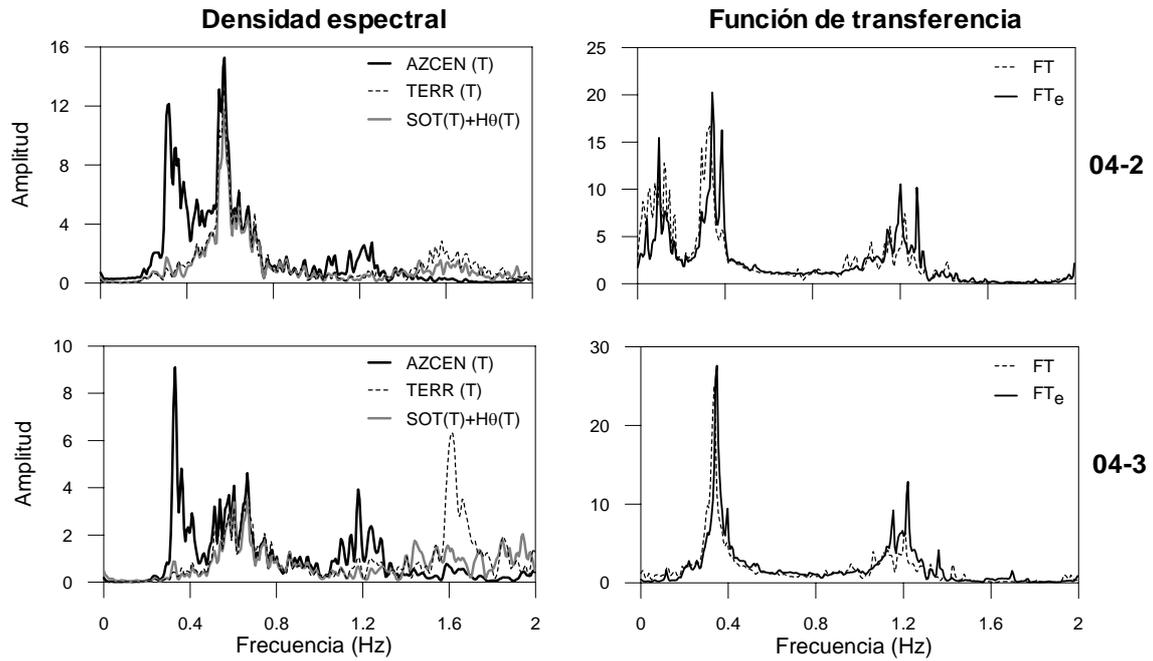


Figura 3.16 Espectros y FT para el sistema suelo-estructura y la estructura con base empotrada en T

Tabla 3.5 Propiedades dinámicas de la estructura con base empotrada

| | 04-1 | | 04-2 | | 04-3 | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | L | T | L | T | L | T |
| Frecuencia (Hz) | 0.354 | 0.299 | 0.409 | 0.342 | 0.446 | 0.348 |
| Amortiguamiento (%) | 2.09 | 1.90 | 2.10 | 2.47 | 2.33 | 1.81 |

A diferencia de la FT_e , los cocientes espectrales para identificar las frecuencias de traslación la base FT_{tb} , ecuación (3.31) y cabeceo FT_c , ecuación (3.32) no presentan una frecuencia única representativa. Estos resultados son consecuencia de la complejidad de los movimientos de la cimentación y la dificultad para aislarlos. De esta manera, en estos cocientes se identificaron intervalos de frecuencias, los cuales servirán de referencia para el estudio de los efectos ISE con el método de Luco y el análisis paramétrico.

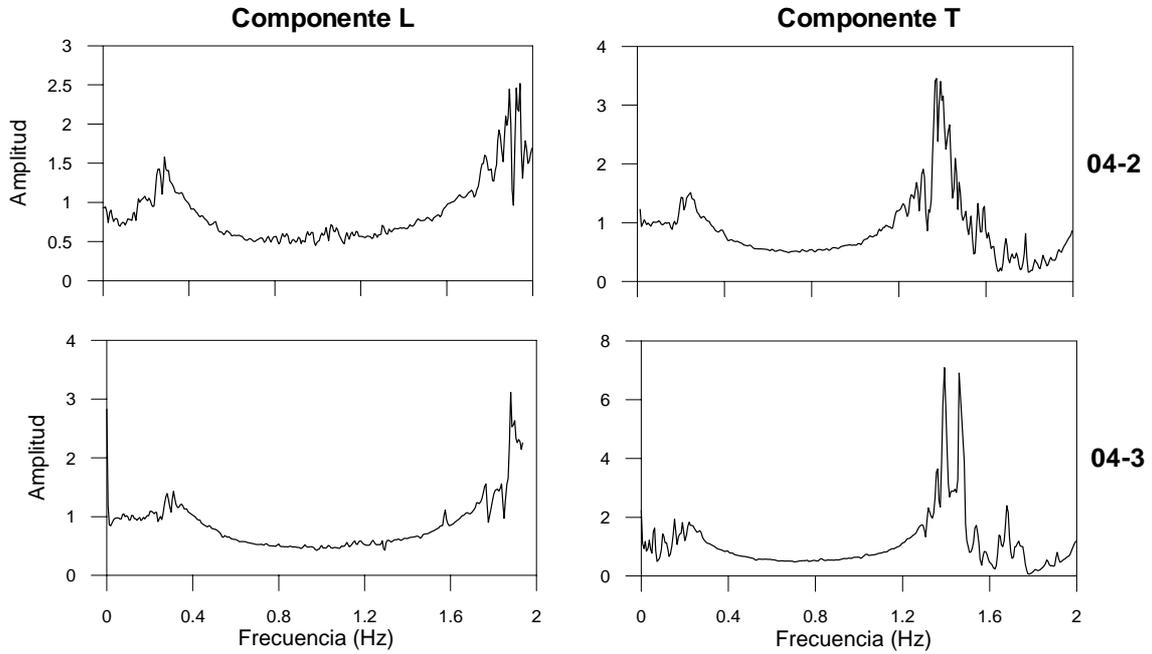


Figura 3.17 Cociente espectral FT_{tb}

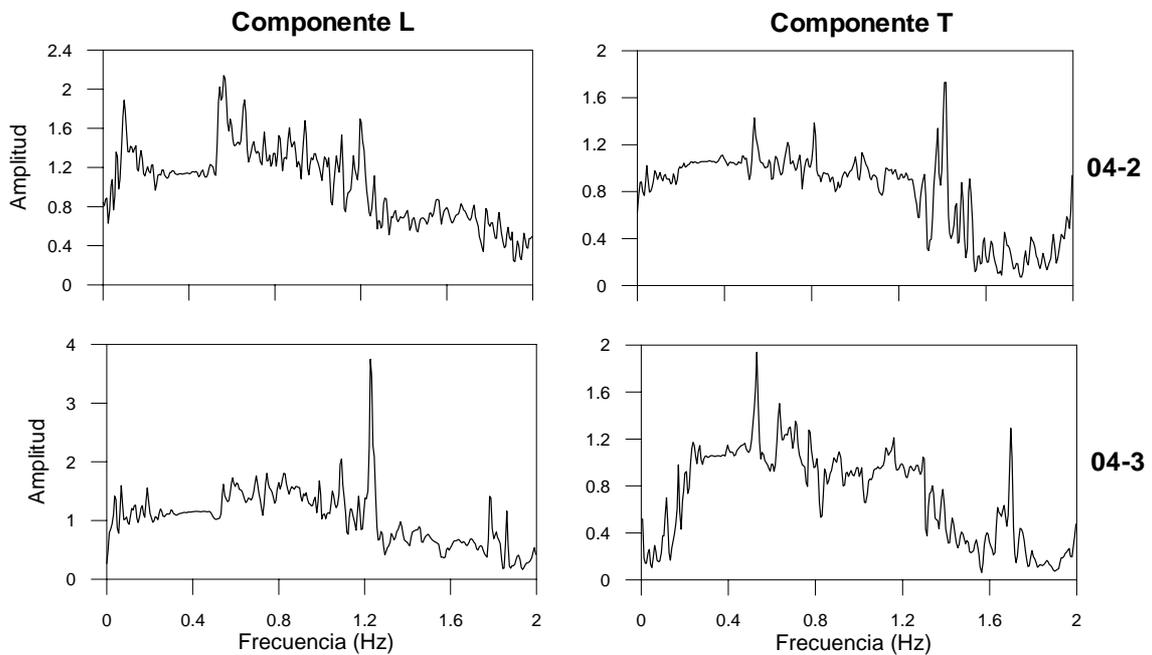


Figura 3.18 Cociente espectral FT_c

3.2.2 Resultados del método de Luco

Con el método de Luco se pudieron estimar las frecuencias de los movimientos de cuerpo rígido de la cimentación y de la estructura con base empotrada. Además, por medio del método es posible calcular las rigideces de la cimentación que se asocian a estos movimientos, los cuales se compararán posteriormente con resultados analíticos.

Como se indicó al plantear la metodología para la aplicación del método de Luco, es necesario el cálculo de algunos parámetros modales para los cuales se necesita la forma modal con base empotrada, y las masas e inercias rotacionales de cada nivel. La forma modal se obtuvo del análisis espectral, y las propiedades de los entresijos del trabajo de Ferretiz (2007). El análisis se hizo en las frecuencias fundamentales de cada dirección con los valores de la identificación espectral.

De esta forma se analizaron con el método de Luco los eventos VA3, 04-2 y 04-3, de la tabla 3.6 a la tabla 3.8 se muestran los resultados para cada uno de los eventos en los componentes L, T y R. El evento 04-2 se dividió en ventanas para estimar la variación de los efectos ISE en los componentes traslacionales a lo largo del evento.

Para los eventos analizados con el método de Luco se calcularon los giros y las rotaciones en el dominio del tiempo y la frecuencia. Los resultados, al menos para este edificio y en los eventos que se analizaron, fueron mejores con los cálculos en el dominio de tiempo.

Tabla 3.6 Resultados Luco componente L

| Parámetro | Evento | | |
|----------------------------------|--------|-------|-------|
| | 04-2 | 04-3 | VA3 |
| f_e (Hz) | 0.446 | 0.464 | 0.48 |
| f_{tb} (Hz) | 1.311 | 1.306 | 1.677 |
| f_c (Hz) | 0.941 | 0.948 | 0.95 |
| K_H (N/m) $\times 10^9$ | 0.973 | 0.967 | 1.833 |
| K_R (N·m/rad) $\times 10^{12}$ | 1.517 | 1.54 | 1.671 |

Tabla 3.7 Resultados Luco componente T

| Parámetro | Evento | | |
|----------------------------------|--------|-------|-------|
| | 04-2 | 04-3 | VA3 |
| f_e (Hz) | 0.363 | 0.361 | 0.411 |
| f_{tb} (Hz) | 1.033 | 1.245 | 1.353 |
| f_c (Hz) | 1.228 | 1.371 | 0.996 |
| K_H (N/m) $\times 10^9$ | 0.721 | 1.048 | 1.22 |
| K_R (N·m/rad) $\times 10^{12}$ | 2.767 | 3.447 | 1.84 |

Tabla 3.8 Resultados Luco componente R

| Parámetro | Evento | | |
|-------------------------------------|--------|-------|-------|
| | 04-2 | 04-3 | VA3 |
| f_{rb} (Hz) | 2.434 | 2.761 | 2.733 |
| f_t (Hz) | 0.544 | 0.541 | 0.574 |
| K_{RV} (N·m/rad) $\times 10^{12}$ | 0.719 | 0.925 | 0.89 |

Con el propósito de exponer la contribución del cabeceo y la traslación de la base al movimiento total en azotea, en la figura 3.19 se presenta la comparación de los espectros de estos movimientos en los componentes L y T, así como la comparación de los espectros de la rotación en la base y la azotea. Ya que los resultados del método de Luco dependen en gran medida de las amplitudes espectrales y las relaciones entre estas, se estudió la estabilidad de estos valores en la vecindad de las frecuencias de análisis. En la figura 3.20, en la vecindad de la frecuencia de identificación, se muestra la variación de la contribución del cabeceo y la traslación de la base en los componentes L, T y la contribución de la rotación de la base en la rotación total en azotea, para los eventos que se analizaron.

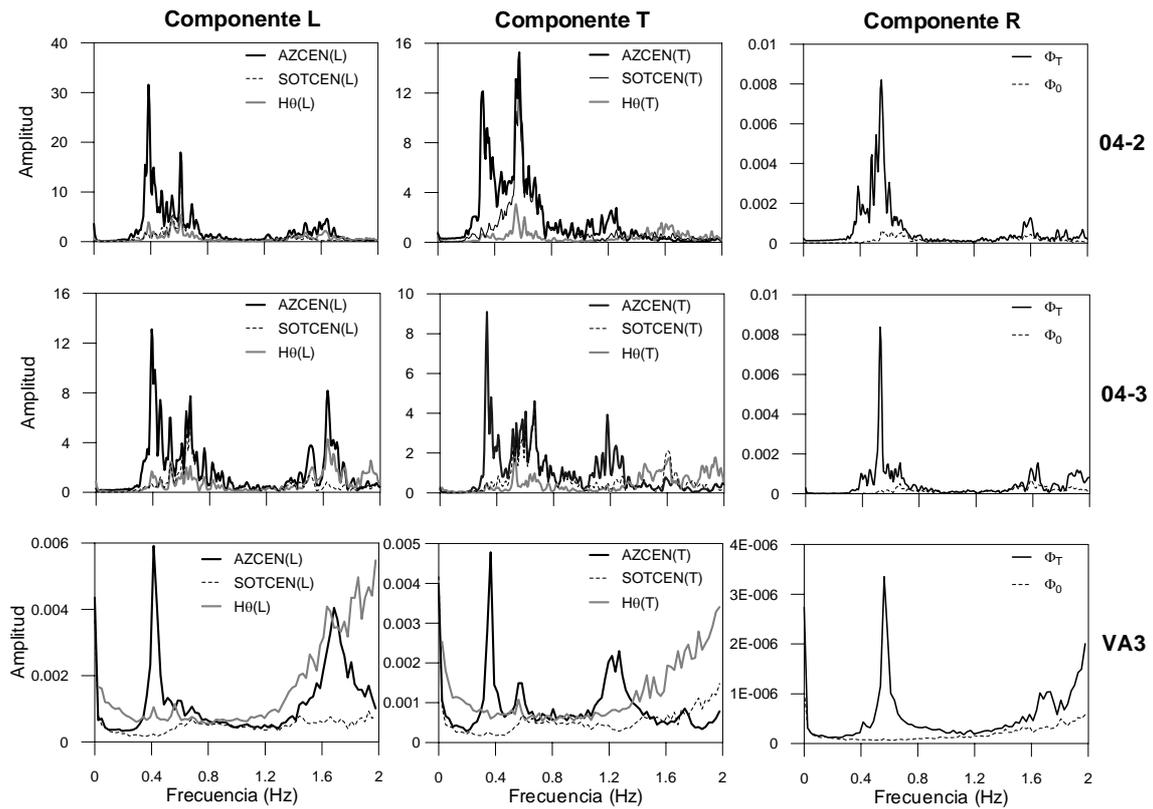


Figura 3.19 Comparación de espectros de los movimientos de la base y la estructura

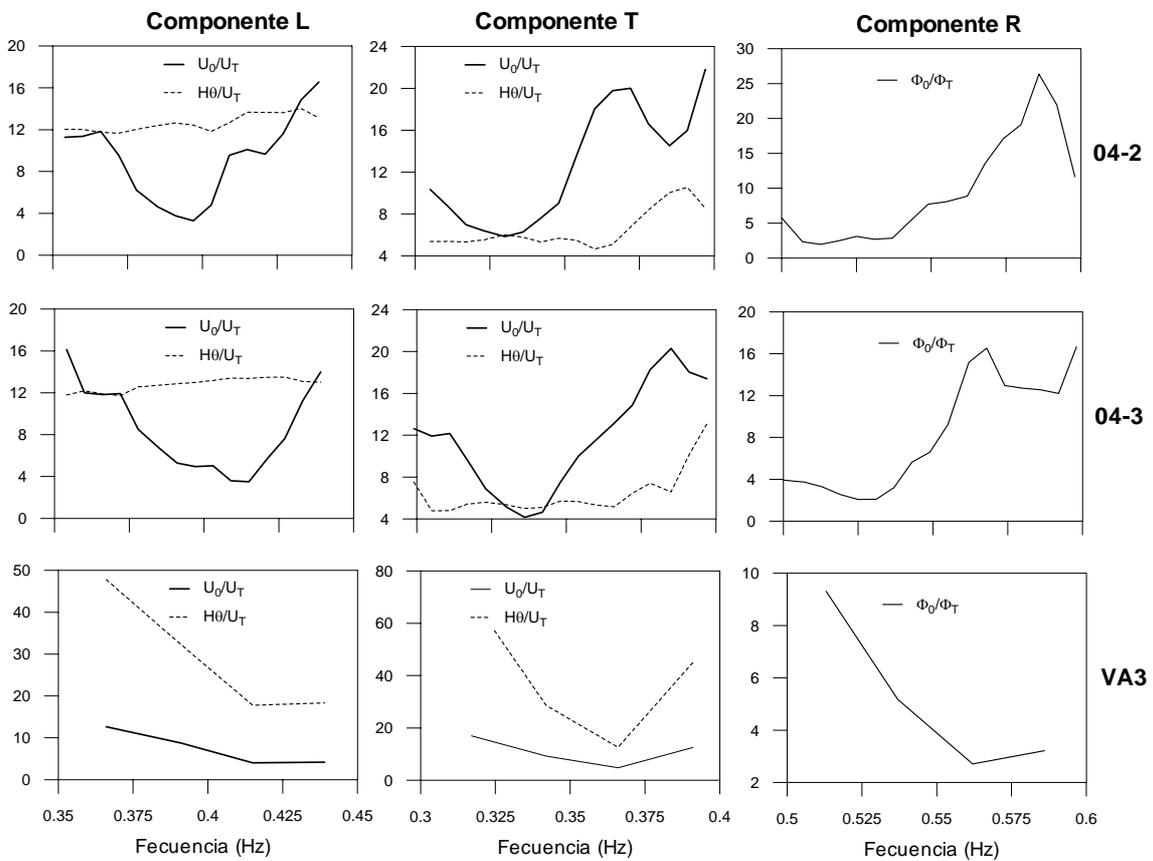


Figura 3.20 Variación de relaciones de amplitudes

Al comparar la variación de parámetros se puede notar que en los componentes traslacionales las mayores variaciones se presentan en la VA3, mientras que en los eventos sísmicos permanece aproximadamente estable en la vecindad de la frecuencia fundamental del sistema. En estos eventos, en el componente L la participación del cabeceo representa alrededor del 12% del movimiento total de azotea y la traslación de la base representa entre 3 y 6%. En el componente T el cabeceo y la traslación de la base tienen participaciones semejantes entre 4 y 7.5%. Las comparaciones anteriores se refieren a los resultados con el cálculo del giro en el dominio del tiempo, los resultados con el cálculo en el dominio de la frecuencia presentan una mayor dispersión.

En cuanto al proceso de Luco por ventanas se trabajaron ventanas de 10 y 20 s sin traslape y 5% de *taper*, giros calculados en el tiempo y en la frecuencia. Otra variación fue en las frecuencias de sistema suelo-estructura usadas, en un caso se usaron las frecuencias identificadas espectralmente en cada ventana y en otro caso las frecuencias estimadas con el modelo 3D-SIST-Chico en este evento. Los mejores resultados (figura 3.21) se obtuvieron en las ventanas de 20 s, con el cálculo del giro en el dominio del tiempo y con las frecuencias del sistema del modelo paramétrico.

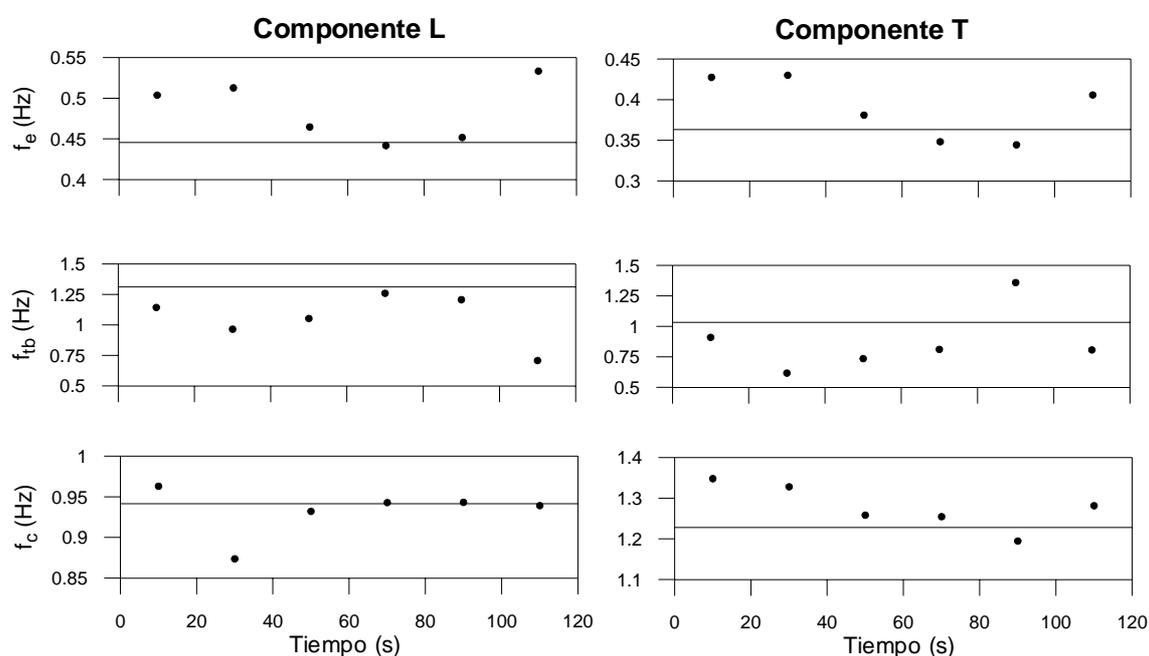


Figura 3.21 Frecuencias estimadas con el método de Luco en el evento 04-2

3.2.3 Análisis paramétrico

Con los modelos ISE de las tablas 3.1 a 3.3 para determinar las características dinámicas de los movimientos de la base y estructura empotrada se analizó el evento 04-2. Dadas las semejanzas entre este evento y el 04-3 en los resultados de las metodologías anteriores se omitió un estudio con este último evento.

Los modelos que se plantean son modelos tridimensionales con respuestas en un solo nivel (azotea), que permiten estimar propiedades dinámicas en L y T al mismo tiempo; y analizar el acoplamiento de los modos de manera eficaz, como se comprobó en este trabajo y estudios anteriores de otros edificios (Murià-Vila *et al*, 2004b; Correa y Murià-Vila, 2005).

En general, se obtuvieron buenos resultados con los modelos de la estructura y cabeceo, pero al igual que en otros edificios (Taborda, 2003; Correa 2005) el modelo de traslación de la base presentó mayores dificultades y no se logró hacer una adecuada identificación. Los resultados del modelo de la estructura fueron semejantes a los obtenidos en el análisis espectral y con el método de Luco. Con el modelo de cabeceo se identificó una variedad de frecuencias que

corresponden con el intervalo establecido en el cociente FT_c y que se aproximan a la frecuencia identificada con Luco. Las frecuencias identificadas con el modelo de traslación por su poca participación y los grandes errores no permiten formular conclusiones.

3.2.3.1 Modelo paramétrico de la estructura

El modelo 3D-ISE-EST se procesó en ventanas de 10 s sin traslape. De igual forma que en los modelos paramétricos del sistema, los menores errores y mayores participaciones se concentraron en la fase intensa del sismo, asimismo algunos amortiguamientos se fijaron.

En este modelo se identificaron las propiedades dinámicas de los modos fundamentales en los componentes traslacionales de la estructura con base empotrada. Los resultados son semejantes a los obtenidos con la metodología no paramétrica. Es decir, que las frecuencias son más altas y los amortiguamientos son mayores en comparación con los del sistema suelo-estructura a partir de los modelos 3D-SIST. Los resultados se grafican en confrontación con los del modelo 3D-SIST-Ch en la figura 3.22.

El objetivo de este modelo se limita al análisis y comparación de los modos fundamentales en traslación y los resultados indican que estos contribuyen en más del 90%, en la mayoría de las ventanas.

Se puede notar que en todas las ventanas las frecuencias del sistema suelo-estructura estimadas con el modelo 3D-SIST-Ch son menores que las frecuencias estimadas con el modelo 3D-ISE-EST a pesar de que las diferencias son pequeñas. Los amortiguamientos también presentan esta disposición aunque los valores son más dispersos. En cuanto a los porcentajes de participación no existe una tendencia apreciable.

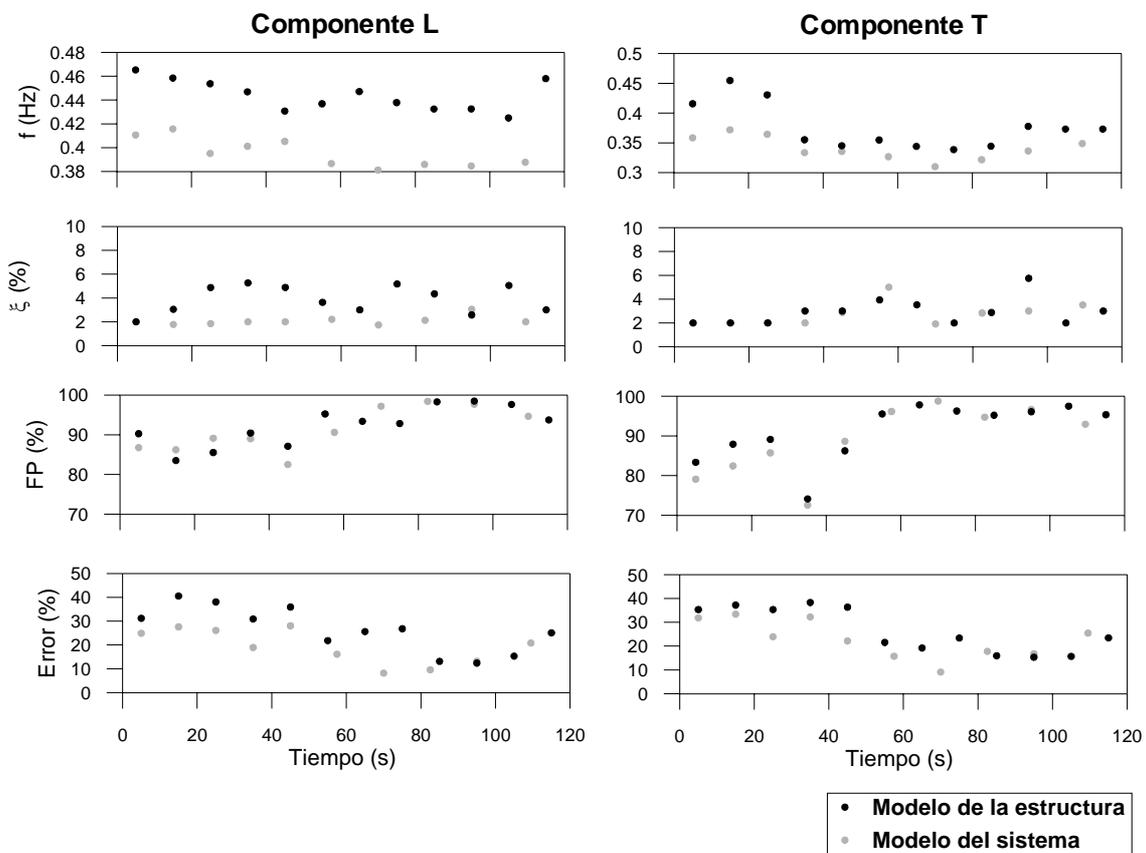


Figura 3.22 Comparación modelo 3D-ISE-EST y 3D-SIST-Ch

3.2.3.2 Modelo paramétrico de traslación de la base

Al igual que con otros edificios, JAL (Zapata, 2001) y SIS (Taborda 2003), el análisis de la traslación de la base con modelos paramétricos no presentó buenos resultados, debido a la poca participación de este movimiento en la respuesta del sistema, derivando en bajas amplitudes que no permiten hacer una adecuada identificación.

Se trabajó con dos modelos, el primero con las señales originales y el segundo aplicando un filtro pasa altas a 0.6 Hz. Se detectó el predominio de la frecuencia del suelo (0.55 Hz), la cual se trató de eliminar con el filtrado.

En el modelo con señales filtradas se logró disminuir la influencia de la frecuencia dominante del sitio y se identificaron algunas frecuencias semejantes a las demás metodologías. Pese a estas aparentes coincidencias, los movimientos asociados a estas frecuencias tienen muy poca participación, los errores son mayores al 70% y no se logra reproducir las señales experimentales.

Las frecuencias identificadas en el modelo con señales filtradas se presentan en graficas de burbujas donde el tamaño representa la participación y se comparan con los resultados de las otras metodologías en la figura 3.23. No hay que descartar que en estudios del edificio con eventos sísmicos más intensos se obtengan mejores resultados, por lo cual es importante establecer un antecedente para futuras comparaciones.

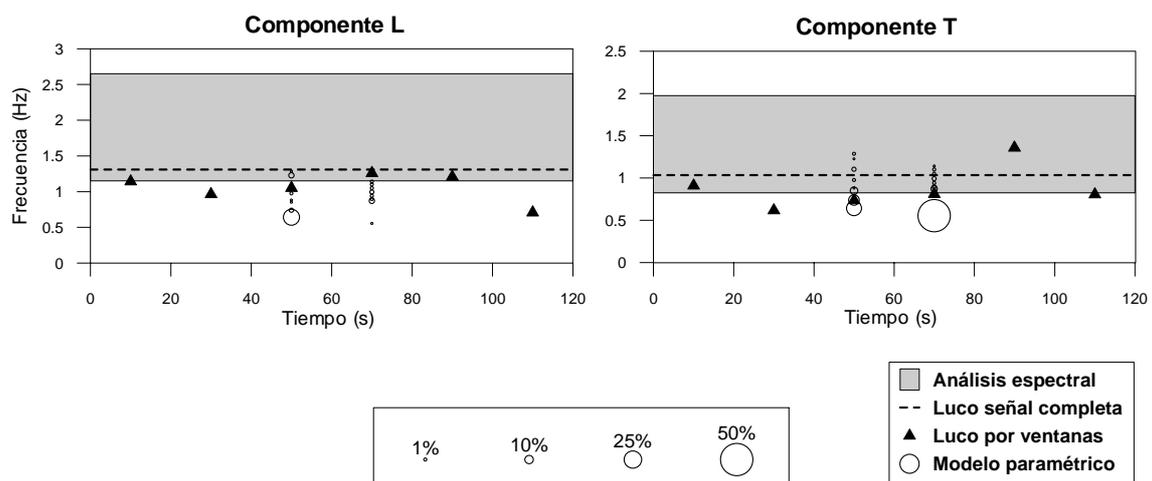


Figura 3.23 Frecuencias de traslación de la base

3.2.3.3 Modelo paramétrico de cabeceo

El modelo 3D-SIST-CAB se trabajó inicialmente de manera semejante al modelo de la estructura (ventanas de 10 s, identificando únicamente las frecuencias fundamentales) pero este procedimiento preliminar no mostró buenos resultados. Es por esto que a diferencia de los otros modelos paramétricos, el modelo 3D-ISE-CAB se procesó con ventanas de 20 s y se identificaron un mayor número de frecuencias.

La identificación se enfocó en el intervalo de 0.3 a 1.4 Hz establecido en el análisis espectral como posibles frecuencias de cabeceo, se identificaron cuatro frecuencias en las primeras dos ventanas y 12 en las restantes, los amortiguamientos se tuvieron que fijar en la mayoría de los casos. Se puede decir que la mitad de las frecuencias que se encontraron predominan en la dirección L y la otra mitad en la dirección T, aunque en algunas ventanas la dirección T tuvo mayor número de frecuencias predominantes.

Cabe aclarar que estos resultados se obtuvieron con las señales de cabeceo sin ningún tratamiento adicional. En trabajos anteriores (Taborda, 2005; Correa, 2007) se presentaron problemas con los modelos paramétricos de cabeceo y fue común que las frecuencias del sistema interfirieran en la identificación, en estos casos se filtraron las señales para eliminar las frecuencias que no corresponden al cabeceo. En el caso del edificio TC para el evento analizado no fue necesario el filtrado, ya que las frecuencias del sistema no interfirieron en la identificación y se llegaron a aproximaciones similares (en cuanto a errores y participaciones) que en modelos del mismo tipo para otros edificios.

Precisamente por el hecho de no ser de importancia la frecuencia del sistema en el movimiento de cabeceo, trabajar con señales sin filtrar dio buenos resultados. Si se hace un filtrado, como en otros edificios, se mejorarían los resultados pero no de manera significativa; no se identificarían nuevas frecuencias o intervalos de frecuencias, simplemente las ya identificadas tendrían un poco más de participación, aumentaría la contribución total y disminuiría el error.

Para una interpretación más clara de los resultados se muestra la identificación de las frecuencias en gráficas de burbujas, donde el tamaño de la burbuja representa el porcentaje de participación en la señal de respuesta y se pone como referencia, en línea continua, el valor que se identificó en el análisis con Luco para el mismo evento; estas gráficas corresponden a la figura 3.24. También se grafican por separado los modos predominantes en componente L y en el componente T con su respectiva participación en cada una de las señales de cabeceo.

En las gráficas de contribución de la figura 3.25 se presenta la suma de las participaciones de las doce frecuencias identificadas, comparadas con la suma de las participaciones sin la contribución de las frecuencias acopladas de cada componente. Igualmente, en la misma figura, se muestran las gráficas de errores con todas las frecuencias que se identificaron.

En el componente L existe una frecuencia predominante entre 0.85 y 0.95 Hz, la cual se designa como 1L. El movimiento asociado a esta frecuencia tiene la mayor participación en el componente L en todas las ventanas y solamente con esta se obtiene más del 50% de un total de 80% con todas las frecuencias, aproximadamente. Esta frecuencia es muy cercana a la frecuencia de cabeceo calculada con Luco (0.941 Hz) e incluso el comportamiento responde a la intensidad del movimiento en la ventana, disminuyendo en la fase intensa y recuperándose al término del evento. Se puede decir que casi en su totalidad el movimiento de cabeceo en dirección L, para este evento, se puede caracterizar por la frecuencia 1L.

Otra frecuencia con relativa buena participación en L, entre 5 y 20% dependiendo de la ventana, es el modo 2T, con frecuencias entre 0.5 y 0.55 Hz y buena participación en T (de ahí la etiqueta que se le dio). Esta frecuencia, junto con 1L, contribuyen casi con el cien por ciento de la participación en este componente. El resto de las frecuencias aportan menos de 1% cada una y máximo un 3% en total.

También se observa, para el componente L (con excepción de la ventana 3) que la diferencia entre usar solamente las frecuencias predominantes en el componente y todas las frecuencias no es tan grande. Indiscutiblemente al usar menos frecuencias sí disminuye la participación total, pero no tanto como en el componente T.

En cuanto al componente T la participación se concentra en tres frecuencias principalmente, 1L, 1T y 2T. La frecuencia 1L aparte de ser la frecuencia principal en el componente L, también está presente en la señal de cabeceo en dirección T, con participaciones del orden de 15 a 30% aproximadamente; igualmente es la frecuencia con mayor participación en T. La siguiente frecuencia que se identificó, 1T (1.3-1.45 Hz) tiene una participación considerable en T, poco menor al 10% y es la más cercana a la frecuencia de cabeceo calculada con Luco (1.228 Hz). La frecuencia 2T tiene participaciones similares a las de 1T en el componente T.

La contribución del resto de las frecuencias en dirección T es de 1 y 3%. Sin embargo, estas frecuencias restantes contribuyen en un porcentaje mayor al componente T de lo que lo hacen en el componente L, es por eso que en algunas ventanas más frecuencias predominan en el componente T. A diferencia de L, en T no sólo las primeras frecuencias tienen importancia, por lo cual no se puede hablar de una sola frecuencia de cabeceo en esta dirección.

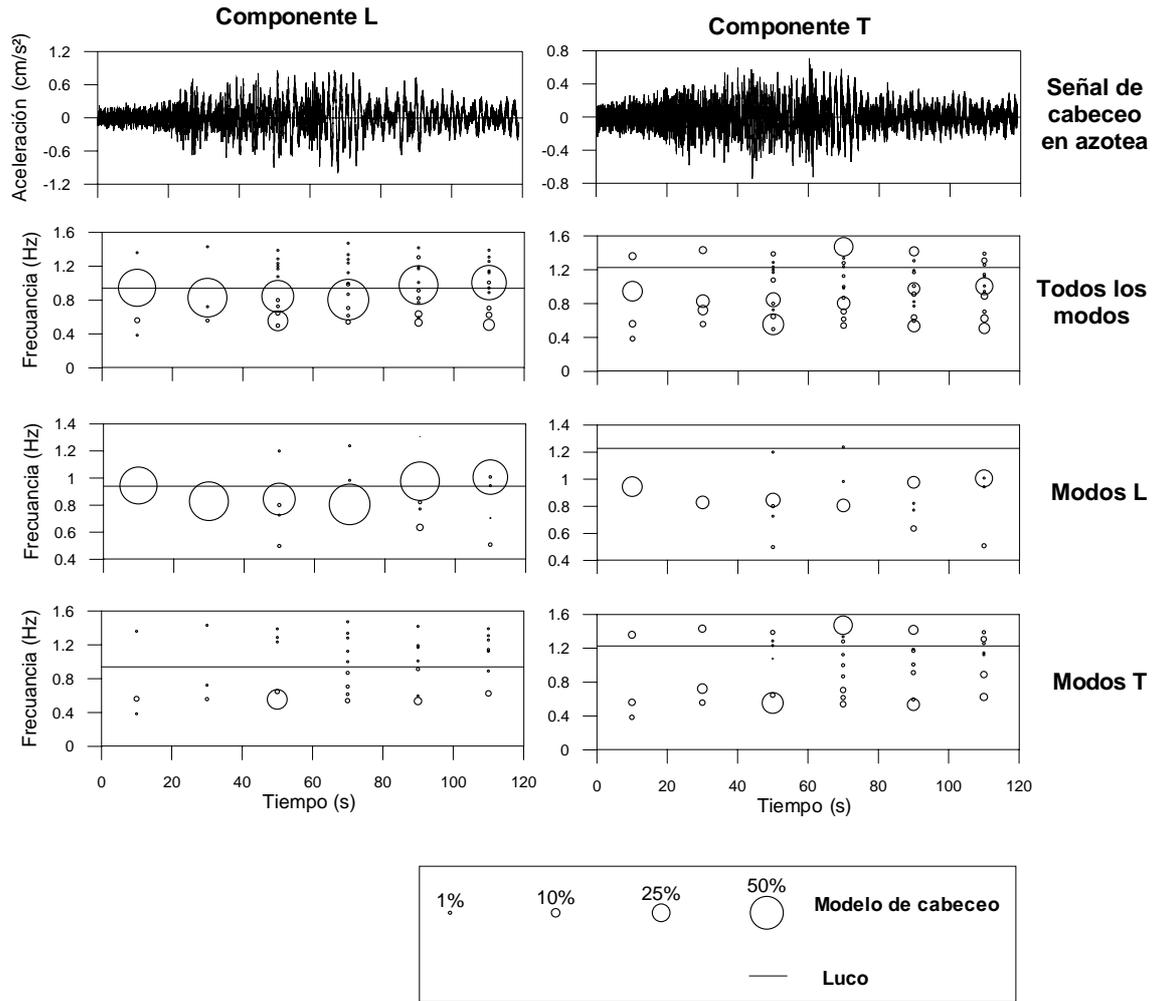


Figura 3.24 Frecuencias del modelo paramétrico de cabeceo

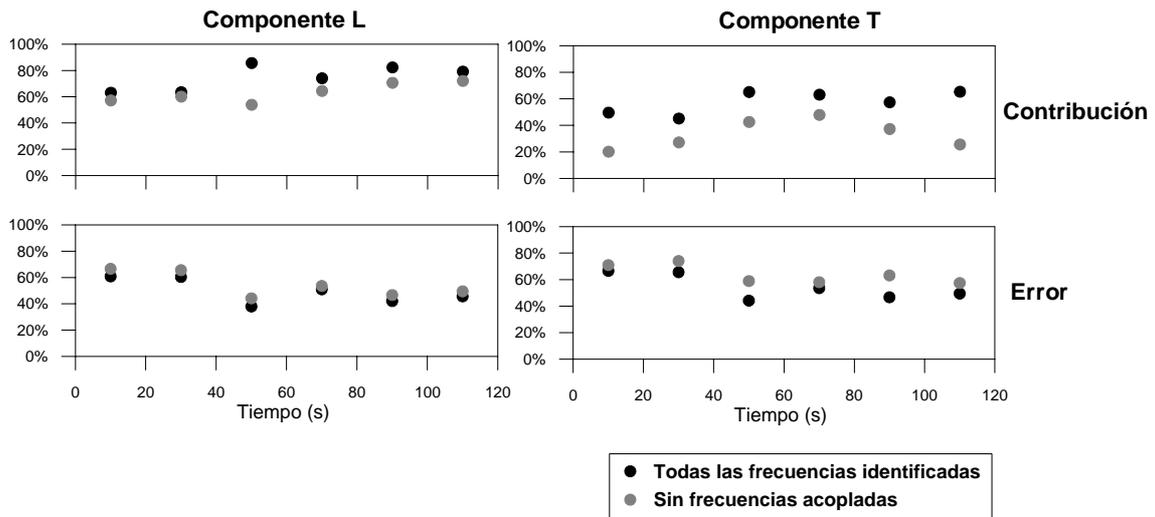


Figura 3.25 Contribuciones y errores del modelo paramétrico de cabeceo

Para ambas componentes los errores son menores en la fase intensa. La contribución total de todas las frecuencias identificadas tiene un comportamiento inverso, donde siempre es mayor en el componente L que en T.

Para determinar la relevancia, en el componente T, de identificar un mayor número de frecuencias se procesó una de las ventanas de fase intensa, haciendo la identificación en un intervalo más grande de frecuencias. De este procesamiento se encontraron 28 frecuencias en un intervalo de 0.3 a 6.0 Hz. Las 16 frecuencias adicionales (a las 12 encontradas en el procesamiento anterior de esta ventana) tienen participaciones muy bajas en ambos componentes y no mejoran los resultados. En la tabla 3.9 se hace una comparación entre los resultados de identificar 2, 12 o 28 frecuencias en este modelo.

Tabla 3.9 Comparación entre diferentes procesamientos del modelo 3D-ISE-CAB

| Parámetros | 2 modos | 12 modos | 28 modos |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|
| Ventanas procesadas | 8 | 6 | 1 |
| Intervalo de frecuencias identificado | 0.9-1.3 Hz | 0.5-1.4 Hz | 0.3-6.0 Hz |
| Frecuencias predominantes en L,T | 1,1 | 6,6 aprox | 9,19 |
| Error Total | 68% | 54% | 46% |
| Error en dirección L | 63% | 49% | 43% |
| Error en dirección T | 80% | 63% | 52% |
| Suma de participaciones en L | 59% | 74% | 81% |
| Suma de participaciones en T | 35% | 57% | 72% |

Cabe mencionar que los resultados para 2 y 12 frecuencias son el promedio de todas las ventanas, en comparación con los resultados de 28 frecuencias, los cuales son de una sola ventana (de fase intensa). Es decir que los altos errores y las bajas participaciones en las primeras y últimas ventanas se promediaron con los de la fase intensa. Si se compararan los resultados solamente de la fase intensa, las diferencias entre los procesos a 12 y 28 frecuencias serían menores. También se hicieron comparaciones entre las señales medidas y las calculadas con los tres diferentes procesos, las cuales se encuentran en el apéndice A.

Del análisis de los resultados del modelo 3D-ISE-CAB se puede interpretar que existe una frecuencia fundamental de cabeceo en el componente L. El movimiento de cabeceo en componente T es un poco más complejo, representado por un intervalo de frecuencias que se asocian al componente y frecuencias acopladas. Esta complejidad del cabeceo en T también puede explicar la menor estabilidad de los parámetros de Luco en este componente, en comparación con L.

3.2.4 Comparación entre metodologías

Para aclarar las incertidumbres y resaltar las ventajas y desventajas de las diferentes metodologías se presenta la comparación de los resultados, en cuanto a estimación de frecuencias, de las diferentes metodologías.

En cuanto a las frecuencias, se comparan los resultados, en el evento 04-2, derivados del análisis espectral usando la señal completa y por ventanas, el método de Luco con la señal completa y por ventanas, y el análisis paramétrico modal. La primera comparación es entre las frecuencias de sistema suelo-estructura y la estructura con base empotrada, identificadas con las diferentes metodologías. Otra comparación es entre los resultados de las diferentes metodologías para estimar la frecuencia de cabeceo.

También las rigideces del sistema suelo-cimentación obtenidas con el método de Luco en los eventos 04-2, 04-3 y VA3 se comparan con los resultados de las metodologías analíticas.

3.2.4.1 Comparación de frecuencias entre el sistema y la estructura

En las figuras 3.26 y 3.27 se presenta una comparación entre los resultados de la estimación de las frecuencias fundamentales del sistema suelo-estructura y la estructura con base empotrada con todas las metodologías.

De estas comparaciones se puede notar que en general los valores de frecuencia que se calculan por ventanas, ya sea del sistema o de la estructura, varían alrededor de la frecuencia calculada con la señal completa; siendo mayores que esta al principio y al final del registro y menores en la fase intensa. Las frecuencias que se calculan con el método de Luco, por ventanas o la señal completa, comúnmente son mayores que los que se identifican espectralmente o con el modelo paramétrico. Las frecuencias del sistema estimadas con el modelo paramétrico y las que se identifican en un análisis espectral por ventanas son muy semejantes.

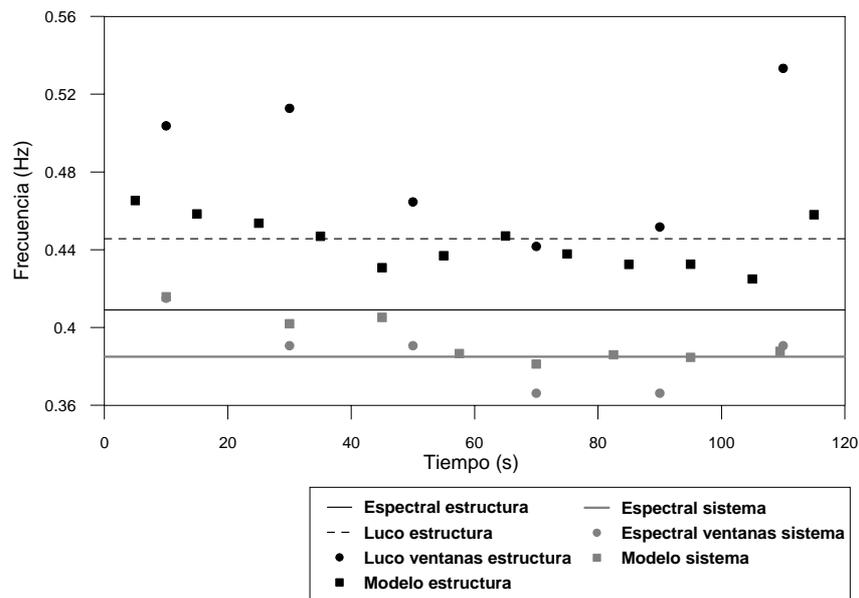


Figura 3.26 Frecuencias del sistema y de la estructura con diferentes métodos de estimación, componente L

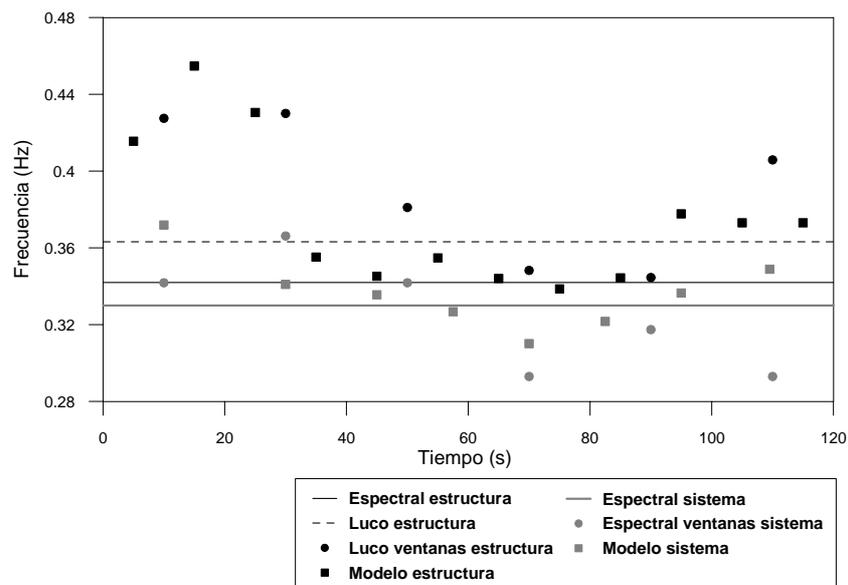


Figura 3.27 Frecuencias del sistema y de la estructura con diferentes métodos de estimación, componente T

Para el componente L (Figura 3.26), se detectan claramente dos intervalos de frecuencia que no se traslapan; un intervalo para el sistema y otro, de frecuencias mayores, para la estructura. Es claro que las frecuencias del sistema son menores que las frecuencias de la estructura calculadas con cualquiera de las metodologías.

A diferencia del componente L, en el componente T (Figura 3.27) el intervalo de frecuencias del sistema y la estructura se encuentra en una banda mucho más reducida.

3.2.4.2 Comparación de frecuencias de cabeceo

La comparación de frecuencias de cabeceo estimadas se hace entre el método de Luco, con la señal completa y por ventanas, el modelo paramétrico modal y el intervalo identificado en los cocientes espectrales FT_c . Esta comparación se presenta en la figura 3.28 para el componente L y en la figura 3.29 para el componente T.

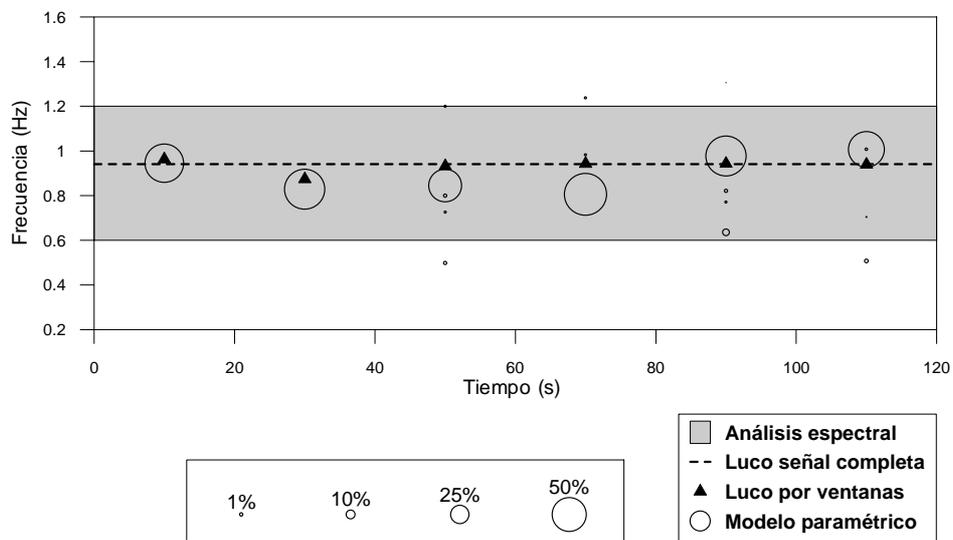


Figura 3.28 Comparación de frecuencias de cabeceo en el componente L

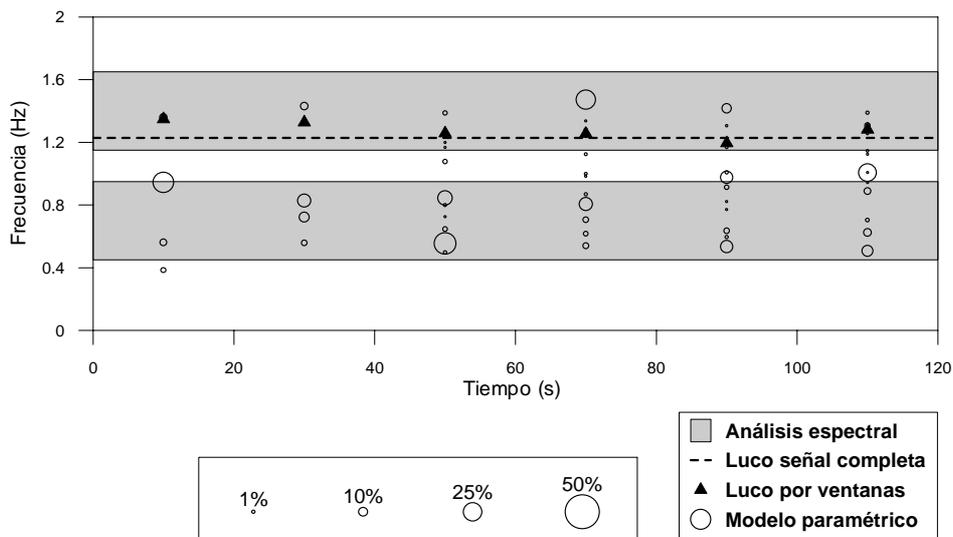


Figura 3.29 Comparación de frecuencias de cabeceo en el componente T

En el componente L (Figura 3.28), como se menciona anteriormente, la frecuencia con mayor participación identificada con el modelo paramétrico es semejante a los valores estimados con el método de Luco, por ventanas y con la señal completa. Para el componente T (Figura 3.29), se identificaron un mayor número de frecuencias con participaciones considerables en el modelo paramétrico, de las cuales algunas son cercanas a los valores de Luco. En ambos componentes las frecuencias se encuentran dentro del intervalo establecido en el análisis espectral.

Las diferencia entre los componentes L y T pueden asociarse a que en el componente L la estructura tiene una mayor rigidez por la presencia de los muros de concreto. Esta afirmación concuerda con los resultados de Luco, en donde los factores de participación del movimiento de cabeceo en la traslación total para el componente L son mayores.

3.2.4.3 Comparación con estudios analíticos

Los resultados de la estimación de efectos ISE correspondientes al cálculo de las rigideces dinámicas de la cimentación con el método de Luco en evento 04-3 se comparan con los estudios analíticos de la cimentación descritos en el capítulo anterior y con el procedimiento del apéndice A de las NTC-RDF para diseño por sismo. En el caso de torsión no existen expresiones para el cálculo de la rigidez en las NTC por lo que se uso el procedimiento de Gazetas (1991b).

El programa comercial Dyna5 para el análisis dinámico de cimentaciones, se utilizó para determinar las rigideces del suelo-cimentación en el edificio TC, en el caso estático y en el dinámico. Las características de los modelos que se utilizaron para representar el suelo-cimentación se definieron en el capítulo 3. Las rigideces del suelo-cimentación obtenidas con el programa Dyna5 se muestran en la tabla 3.10 para el caso estático y en la tabla 3.11 para el caso dinámico.

Tabla 3.10 Rigideces estimadas con Dyna5 caso estático

| Modelo | Componente L | | Componente T | | Componente R |
|--------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|
| | K_H (N/m) $\times 10^{12}$ | K_R (N-m/rad) $\times 10^{12}$ | K_H (N/m) $\times 10^{12}$ | K_R (N-m/rad) $\times 10^{12}$ | K_{RV} (N-m/rad) $\times 10^{12}$ |
| CH | 1.59 | 0.92 | 1.59 | 0.63 | 1.4 |
| CE | 2.08 | 1.12 | 2.08 | 0.76 | 1.59 |
| PH | 13.45 | 7.1 | 13.45 | 5.53 | 3.72 |
| PH.EG | 1.02 | 0.65 | 1.02 | 0.62 | 0.65 |
| PE | 13.77 | 6.89 | 13.77 | 5.36 | 3.8 |
| PE.EG | 1.18 | 0.97 | 1.18 | 0.75 | 0.72 |

Tabla 3.11 Rigideces estimadas con Dyna5 caso dinámico

| Modelo | Componente L | | Componente T | | Componente R |
|--------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|
| | K_H (N/m) $\times 10^{12}$ | K_R (N-m/rad) $\times 10^{12}$ | K_H (N/m) $\times 10^{12}$ | K_R (N-m/rad) $\times 10^{12}$ | K_{RV} (N-m/rad) $\times 10^{12}$ |
| CH | 1.58 | 0.77 | 1.58 | 0.54 | 1.26 |
| CE | 1.92 | 0.98 | 1.92 | 0.69 | 1.45 |
| PH | 13.45 | 7.1 | 13.45 | 5.53 | 3.72 |
| PH.EG | 1.04 | 0.59 | 1.04 | 0.52 | 0.59 |
| PE | 13.77 | 6.89 | 13.77 | 5.36 | 3.8 |
| PE.EG | 1.19 | 0.79 | 1.19 | 0.63 | 0.64 |

La rigidez total de la cimentación se obtiene combinando los efectos del cajón y los pilotes. En las tablas siguientes se muestran los resultados para suelo homogéneo y suelo estratificado, distinguiendo los casos estático y dinámico para cada modelo.

Tabla 3.12 Rigideces estáticas para las combinaciones propuestas

| Modelo | | Componente L | | Componente T | | Componente R |
|--------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|
| | | K_H (N/m)x10 ¹² | K_R (N·m/rad)x10 ¹² | K_H (N/m)x10 ¹² | K_R (N·m/rad)x10 ¹² | K_{RV} (N·m/rad)x10 ¹² |
| H | CH+PH | 15.04 | 8.02 | 15.04 | 6.16 | 5.12 |
| | Cajón | 10.57% | 12.96% | 11.82% | 11.39% | 37.63% |
| | Pilotes | 89.43% | 88.53% | 89.43% | 89.77% | 72.66% |
| H.EG | CH+PH.EG | 2.61 | 1.57 | 2.61 | 1.25 | 2.05 |
| | Cajón | 60.92% | 58.60% | 60.92% | 50.40% | 68.29% |
| | Pilotes | 39.08% | 41.40% | 39.08% | 49.60% | 31.71% |
| E | CE+PE | 15.85 | 8.01 | 15.85 | 6.12 | 5.39 |
| | Cajón | 13.12% | 13.98% | 13.12% | 12.42% | 29.50% |
| | Pilotes | 86.88% | 86.02% | 86.88% | 87.58% | 70.50% |
| E.EG | CE+PE.EG | 3.26 | 2.09 | 3.26 | 1.51 | 2.31 |
| | Cajón | 63.80% | 53.59% | 63.80% | 50.33% | 68.83% |
| | Pilotes | 36.20% | 46.41% | 36.20% | 49.67% | 31.17% |

Tabla 3.13 Rigideces dinámicas para las combinaciones propuestas

| Modelo | | Componente L | | Componente T | | Componente R |
|--------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|--|
| | | K_H (N/m)x10 ¹² | K_R (N·m/rad)x10 ¹² | K_H (N/m)x10 ¹² | K_R (N·m/rad)x10 ¹² | K_{RV} (N·m/rad)x10 ¹² |
| H | CH+PH | 15.03 | 7.87 | 15.03 | 6.07 | 4.98 |
| | Cajón | 10.51% | 10.85% | 11.75% | 9.76% | 33.87% |
| | Pilotes | 89.49% | 90.22% | 89.49% | 91.10% | 74.70% |
| H.EG | CH+PH.EG | 2.62 | 1.36 | 2.62 | 1.06 | 1.85 |
| | Cajón | 60.31% | 56.62% | 60.31% | 50.94% | 68.11% |
| | Pilotes | 39.69% | 43.38% | 39.69% | 49.06% | 31.89% |
| E | CE+PE | 15.69 | 7.87 | 15.69 | 6.05 | 5.25 |
| | Cajón | 12.24% | 12.45% | 12.24% | 11.40% | 27.62% |
| | Pilotes | 87.76% | 87.55% | 87.76% | 88.60% | 72.38% |
| E.EG | CE+PE.EG | 3.11 | 1.77 | 3.11 | 1.32 | 2.09 |
| | Cajón | 61.74% | 55.37% | 61.74% | 52.27% | 69.38% |
| | Pilotes | 38.26% | 44.63% | 38.26% | 47.73% | 30.62% |

El método simplificado se aplicó al edificio mediante el programa de cómputo descrito en el capítulo 3. Los datos que el programa requiere, la distribución geométrica de los pilotes y las características del suelo homogéneo (velocidad de onda de cortante, peso volumétrico, módulo de Poisson y coeficiente de amortiguamiento) se indican en el capítulo 1. Las rigideces de la cimentación calculadas con el método simplificado se resumen en la tabla 3.14.

Tabla 3.14 Rigideces del grupo de pilotes usando el método simplificado de Dobry-Gazetas

| Caso | Componente L | | Componente T | | Componente R |
|-----------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|---|
| | K_H (N/m) x10 ¹² | K_R (N·m/rad) x10 ¹² | K_H (N/m) x10 ¹² | K_R (N·m/rad) x10 ¹² | K_{RV} (N·m/rad) x10 ¹² |
| Estático | 0.49 | 1.03 | 0.49 | 0.81 | 0.50 |
| Dinámico | 0.46 | 0.66 | 0.46 | 0.54 | 0.31 |

La comparación de resultados del cálculo de las rigideces del suelo-cimentación con los diferentes métodos, mostrados en la figura 3.30, corresponden a los cinco grados de libertad que se consideran en la cimentación: traslación (K_H) y cabeceo (K_R) en las dos direcciones ortogonales (L y T), y torsión (K_{RV}). Los resultados se presentan en dos casos, el caso estático y el caso dinámico.

Con base en los datos mostrados en las tablas y la figura 3.30, pueden hacerse varias observaciones. El método simplificado y el modelo Dyna5 (EG) proporcionan resultados similares en el componente de cabeceo, mientras que en traslación y torsión presentan diferencias de hasta 30%. En la figura 3.30, se ha agregado la aportación del cajón calculada con Dyna5 a los valores del método simplificado, para dar una idea de la rigidez total de la cimentación. Al sumar la aportación del cajón, los valores totales de rigidez resultan aceptables para este caso, dado que el cajón tiene una mayor participación. Las rigideces experimentales

que se calcularon con el método de Luco, utilizadas como valores de referencia, se aproximan más al modelo Dyna5 (EG) y al método simplificado.

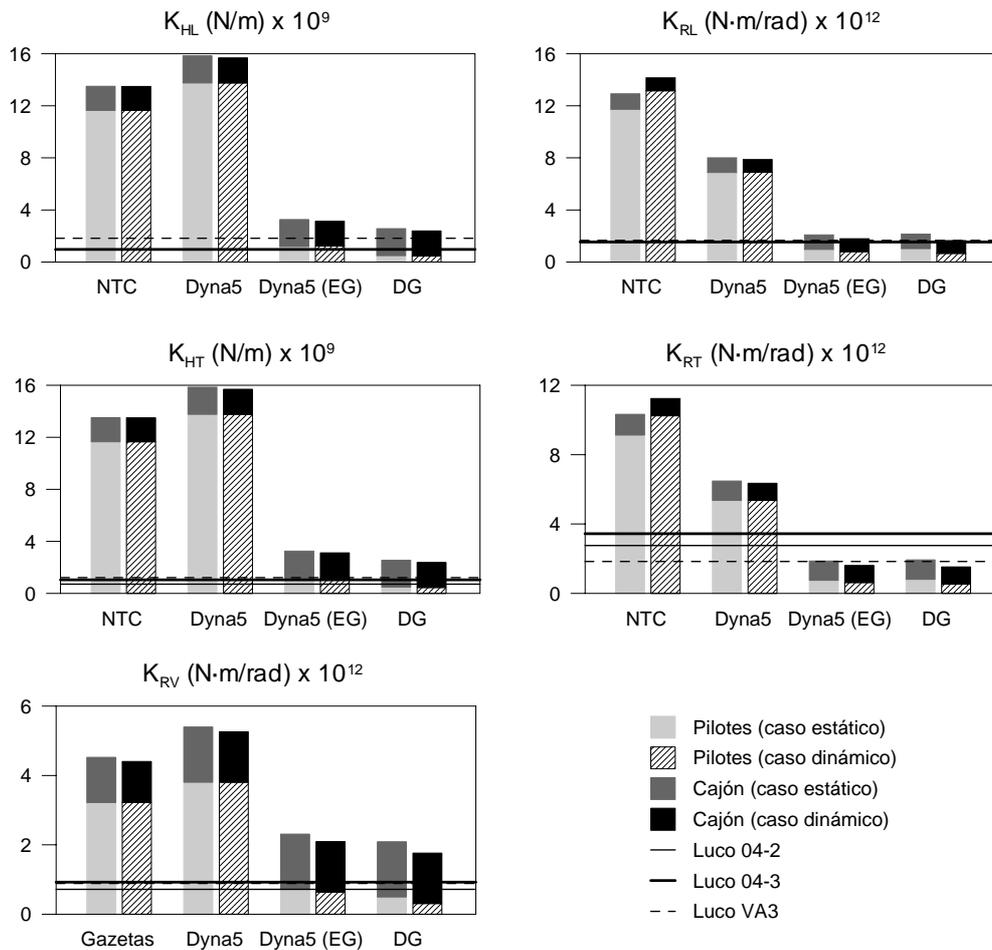


Figura 3.30 Gráficas de comparación entre los resultados de las rigideces de la cimentación

Cuando se tienen en cuenta los efectos de grupo en el sistema de pilotes, se obtienen significativas reducciones en las rigideces totales de la cimentación (80% en traslación, 77% en cabeceo y 60% en torsión), respecto a aquellas obtenidas sin considerarlos. Estos resultados resultan congruentes con ensayos experimentales realizados por Novak y El Sharnouby (1984) en los que para un sistema a escala reducida de 1/15 con 102 pilotes y una relación de espaciamiento $S/d = 3$, se encontró una reducción en la rigidez de traslación de 70%. En el edificio en estudio, se tiene una mayor cantidad de pilotes y la relación de espaciamiento es de cerca de 3.4. Aunque para pilotes más separados debe esperarse una reducción de los efectos de grupo, el mayor número de pilotes en la cimentación del edificio produce un incremento en dichos efectos, lo cual conduce a resultados congruentes a los encontrados por Novak y El Sharnouby. Resultados similares se obtuvieron del estudio de otro edificio alto de la ciudad de México (Correa y Muria Vila, 2005).

El hecho de considerar o no los efectos de grupo de pilotes, produce diferencias notables en la estimación de la rigidez de la cimentación, así como en la participación del cajón y los pilotes en la rigidez total. Cuando no se consideran los efectos de grupo, el aporte del cajón a la rigidez total es reducido (14% en traslación y cabeceo, y 29% en torsión), mientras que si en el análisis se toman en cuenta los efectos de grupo, la participación del cajón en la rigidez total es significativa (62% en traslación, 55% en cabeceo y 69% en torsión).

CONCLUSIONES

Se estudió la respuesta de dinámica y los efectos de interacción suelo-estructura (ISE) de un edificio instrumentado en la ciudad de México, para el cual se analizaron tres eventos sísmicos, todos ellos de baja intensidad, más los resultados obtenidos con dos registros de vibración ambiental.

Las metodologías aplicadas en este edificio han sido implementadas en estudios similares que resumen información de las propiedades dinámicas de otros edificios; SEC (Murià-Vila *et al*, 1992); JAL (Murià-Vila y Rodríguez, 2002); PC (Murià-Vila *et al*, 2000b); SIS (Taborda, 2003). De esta forma la información recopilada del edificio TC junto con la de estos otros edificios da un panorama general de las propiedades dinámicas de edificios instrumentados en México.

En general los resultados de la estimación de parámetros dinámicos concuerdan con lo esperado para una estructura regular, en el componente L (dirección más larga en la cual coinciden los muros) las frecuencias de sistema son mayores que en el componente T, las frecuencias de menor magnitud corresponden al sismo de mayor intensidad, el modo fundamental tiene la mayor participación, las formas modales son prácticamente constantes sin importar el evento.

A pesar de analizarse eventos de baja intensidad hubo variaciones en el valor de las frecuencias entre evento y evento, y a lo largo de los sismos estudiados, estas variaciones son asociadas a la intensidad del movimiento e indican la presencia de comportamientos no lineales, posiblemente atribuibles a la respuesta del sistema estructural a un determinado nivel de esfuerzos y a un reacomodo inicial del mismo o de sus componentes. Sin embargo, este comportamiento no lineal no indica daño permanente en los elementos estructurales o degradación de la rigidez, ya que en todos los casos estudiados el sistema regresa a su estado inicial después de la excitación fuerte.

En cuanto al amortiguamiento, se obtuvieron buenas aproximaciones para los modos fundamentales en los componentes traslacionales con el análisis espectral; y valores más confiables con los modelos paramétricos, en los casos donde no hubo problemas numéricos. Cabe mencionar que el amortiguamiento es un parámetro dinámico complicado en procedimientos de identificación de sistemas y de relativa poca influencia dada su poca importancia fuera del rango de máxima amplificación dinámica (resonancia) y el corto intervalo de valores que puede tomar para el tipo de sistema (edificios). Al igual que las frecuencias el porcentaje de amortiguamiento crítico calculado con los modelos paramétricos fue diferente en las diferentes etapas de los eventos sísmicos, aumentando en la fase intensa y regresando a su valor inicial al principio del evento.

Es importante mencionar que en modelos paramétricos con una sola respuesta de traslación fue posible identificar las propiedades dinámicas del movimiento de torsión. La estimación de parámetros de torsión en este tipo de modelos fue validada con otros que incluyen más de una señal de respuesta en traslación, cuyos resultados son similares. El modelo con una sola señal de traslación tiene la ventaja de poderse emplear cuando la instrumentación es limitada. Los buenos resultados dependen de la contribución de la torsión en el movimiento de traslación, la cual será mayor mientras más lejos se encuentre del centro de torsión.

Sobre el estudio de la cimentación-suelo uno de los primeros aspectos que resaltó fue el periodo dominante del suelo, el cual resultó menor que el establecido en el reglamento vigente. Este cambio es atribuible a la consolidación, aunque este fenómeno no se aborda en el trabajo, se advierte de su importancia.

Con respecto a los efectos ISE, fueron tratados desde dos puntos de vista: la identificación de las frecuencias de los componentes de movimiento del sistema (flexibilidad de la estructura con base empotrada, cabeceo y traslación de la base) y la estimación de las rigideces asociadas a cada uno de ellos. Para la identificación de frecuencias se empleó el análisis espectral, modelos paramétricos modales y el método de Luco, con este último también se calcularon

rigideces del sistema suelo-cimentación al igual que con el programa Dyna5 y el método simplificado de Dobry y Gazetas.

En cuanto a las propiedades dinámicas de la estructura con base empotrada, espectralmente se identificaron valores puntuales bien definidos, los valores son similares a los calculados con el método de Luco con la señal completa y por ventanas. Estos resultados también se confirman mediante el modelo paramétrico de la estructura. De hecho, se hizo una interesante comparación entre las frecuencias del sistema suelo-estructura y las frecuencias de la estructura con base empotrada, ambas estimadas con las diferentes metodologías (empleando la señal completa o por ventanas) donde, además de confirmarse que la estructura es más rígida que el sistema, se analizaron las diferencias existentes.

A diferencia de la estructura con base empotrada, el cabeceo es más difícil de caracterizar. Del análisis de cocientes espectrales solamente se pudieron identificar intervalos de frecuencia asociados a este movimiento. Con el método de Luco se llega a la obtención de frecuencias únicas de cabeceo, correspondientes con el análisis espectral. Sin embargo, fue evidente con los modelos paramétricos que las frecuencias calculadas con Luco no son completamente representativas de estos movimientos.

También, con el método de Luco se encontró que, de la contribución de los movimientos de la cimentación, el cabeceo es el que tiene una mayor participación en la respuesta total, comparado con la torsión y traslación de la base; siendo más marcada esta diferencia en el componente L. Otro aspecto que conviene mencionar sobre estos resultados, es el relativo al cálculo de los giros en el dominio del tiempo y la frecuencia, de los cuales los primeros muestran una mayor estabilidad.

Los resultados del modelo paramétrico de cabeceo demuestran que este movimiento se caracteriza por múltiples frecuencias, en el caso del componente L existe una frecuencia cuya participación es considerablemente mayor que las otras, en el componente T no existe una frecuencia predominante, pero sí un intervalo específico.

Sobre la traslación de la base; con el método de Luco se obtuvieron frecuencias que entran dentro del intervalo identificado en los cocientes espectrales para este movimiento. Pese a esto, de acuerdo al modelo paramétrico de traslación, las frecuencias que coinciden con el análisis espectral y de Luco no reproducen el movimiento. Este aspecto puede atribuirse a la complejidad del movimiento y a la pobreza de amplitudes.

Respecto al las rigideces del sistema suelo-cimentación se puede concluir que los efectos de grupo son de gran importancia ya que implican en reducciones significativas de la rigidez del grupo de pilotes, resaltando en el caso del edificio TC, ya que cuenta con una mayor número de pilotes que otros edificios estudiados. Un aspecto que hay que enfatizar es que en la reglamentación actual en México no existe una metodología para tomar en cuenta los efectos de grupo, en este trabajo se usó un método simplificado, el cual proporciona resultados que se corresponden bien con el modelo que considera efectos de grupo, realizado con el programa Dyna5, y con los valores obtenidos con el método de Luco.

Apéndice A. GRAFICAS COMPLEMENTARIAS

A.1 Espectros para la identificación del el periodo natural del suelo

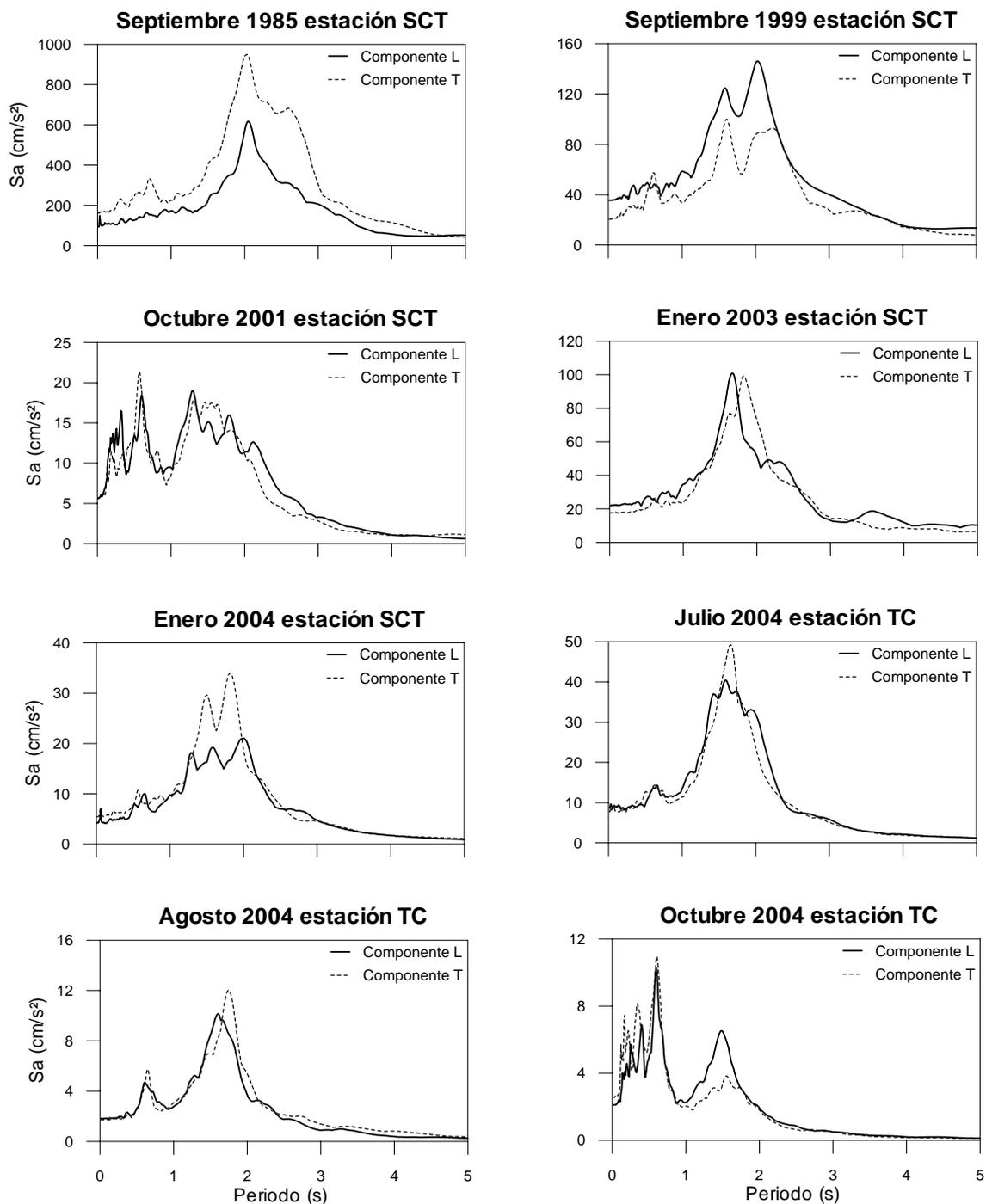


Figura A.1 Espectros de respuesta

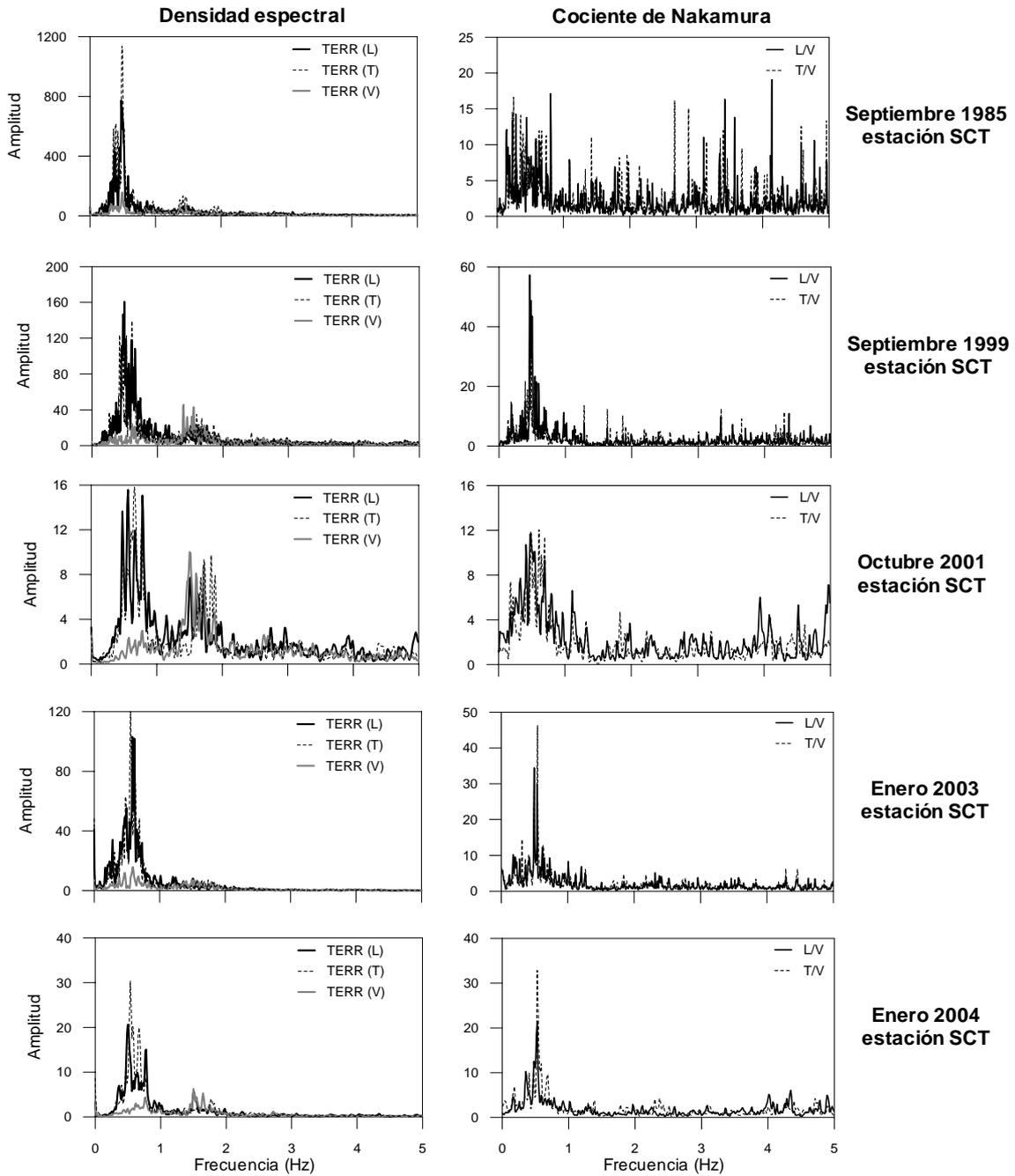


Figura A.2 Cocientes de Nakamura estación SCT

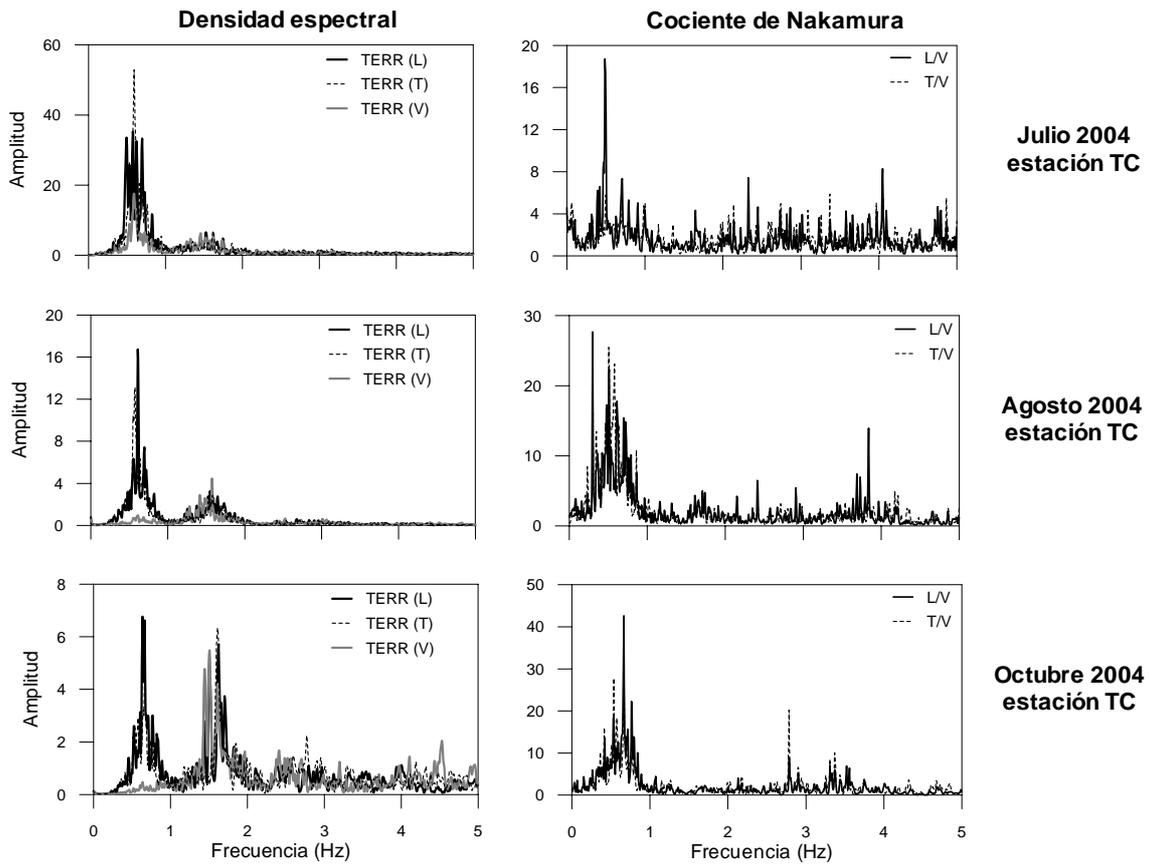


Figura A.3 Cocientes de Nakamura estación de campo edificio TC

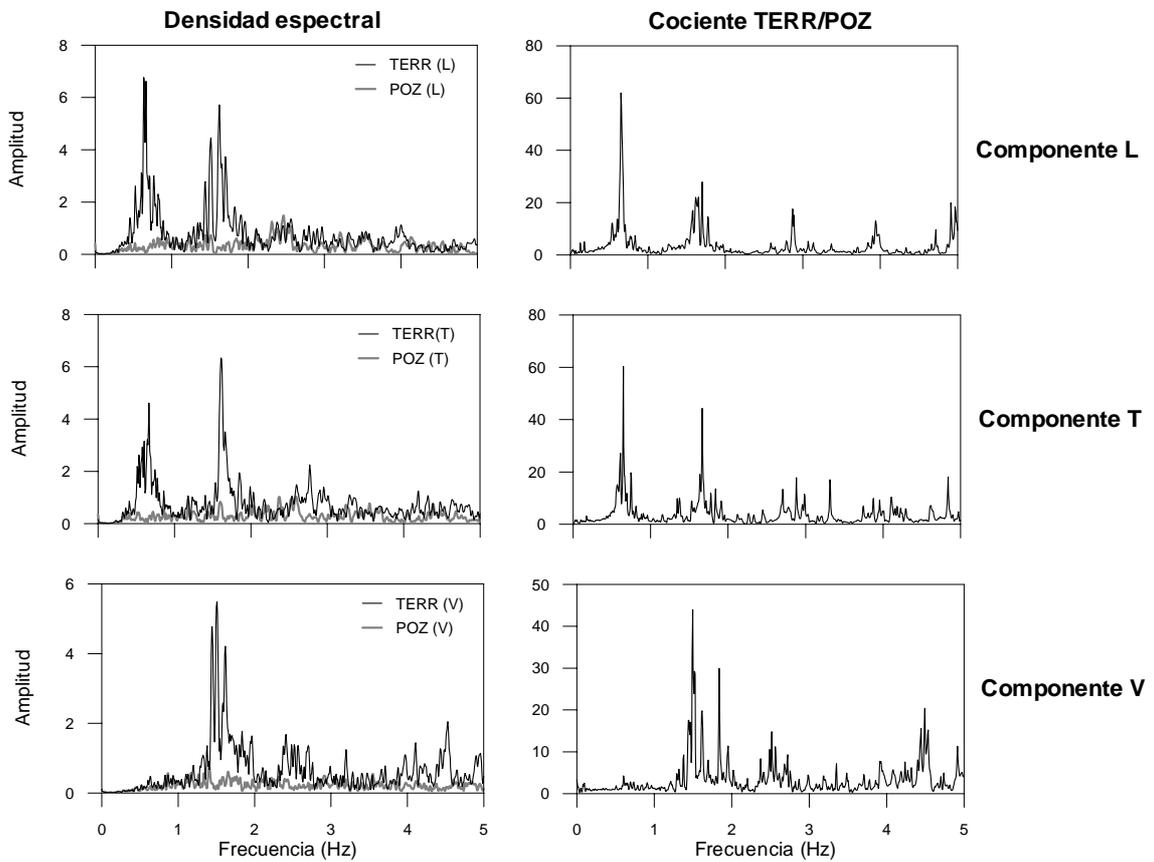


Figura A.4 Cocientes con registros de pozo

A.2 Espectros de niveles intermedios

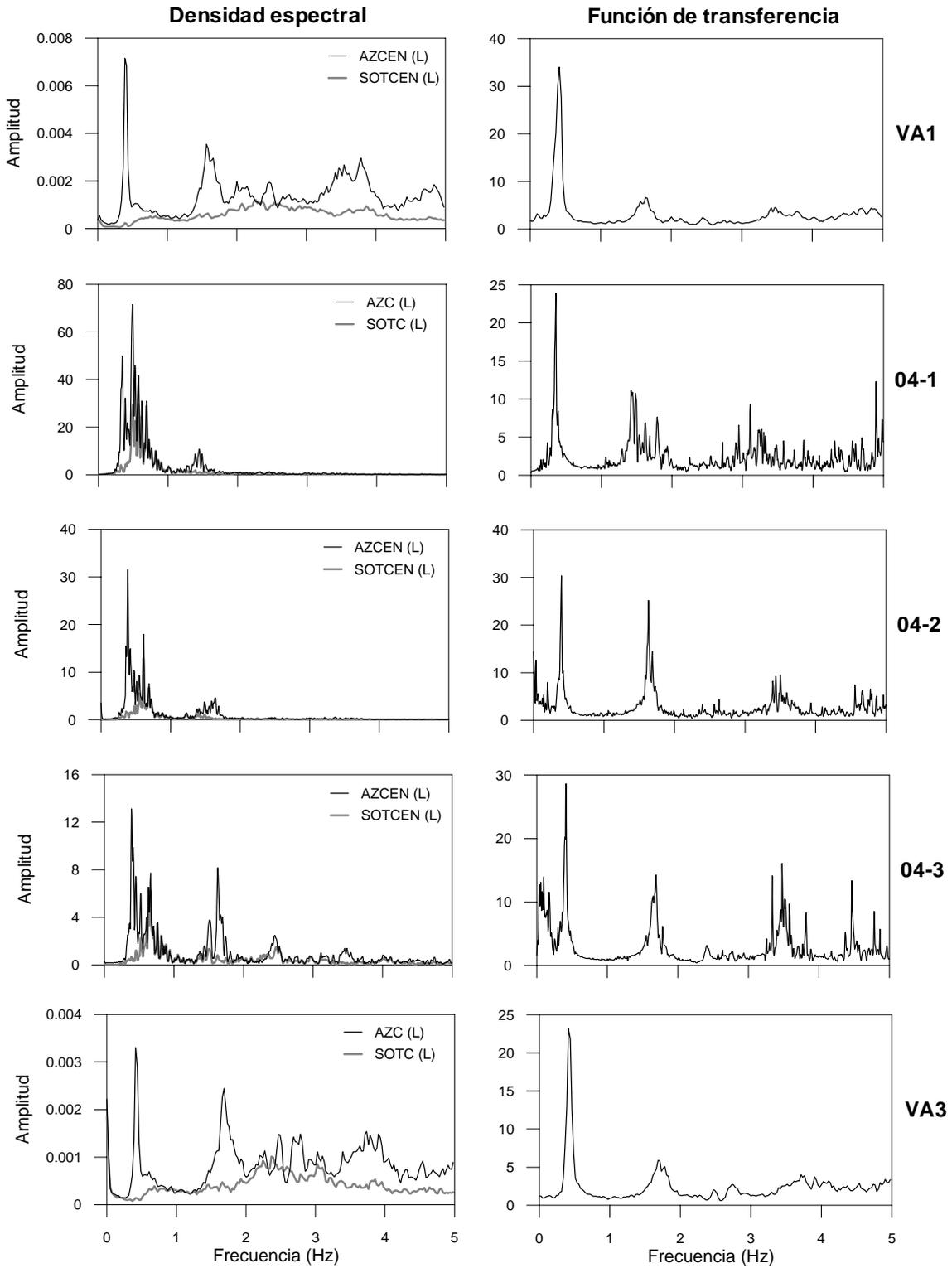


Figura A.5 Espectros y función de transferencia de las señales azotea centro y sótano centro en dirección L

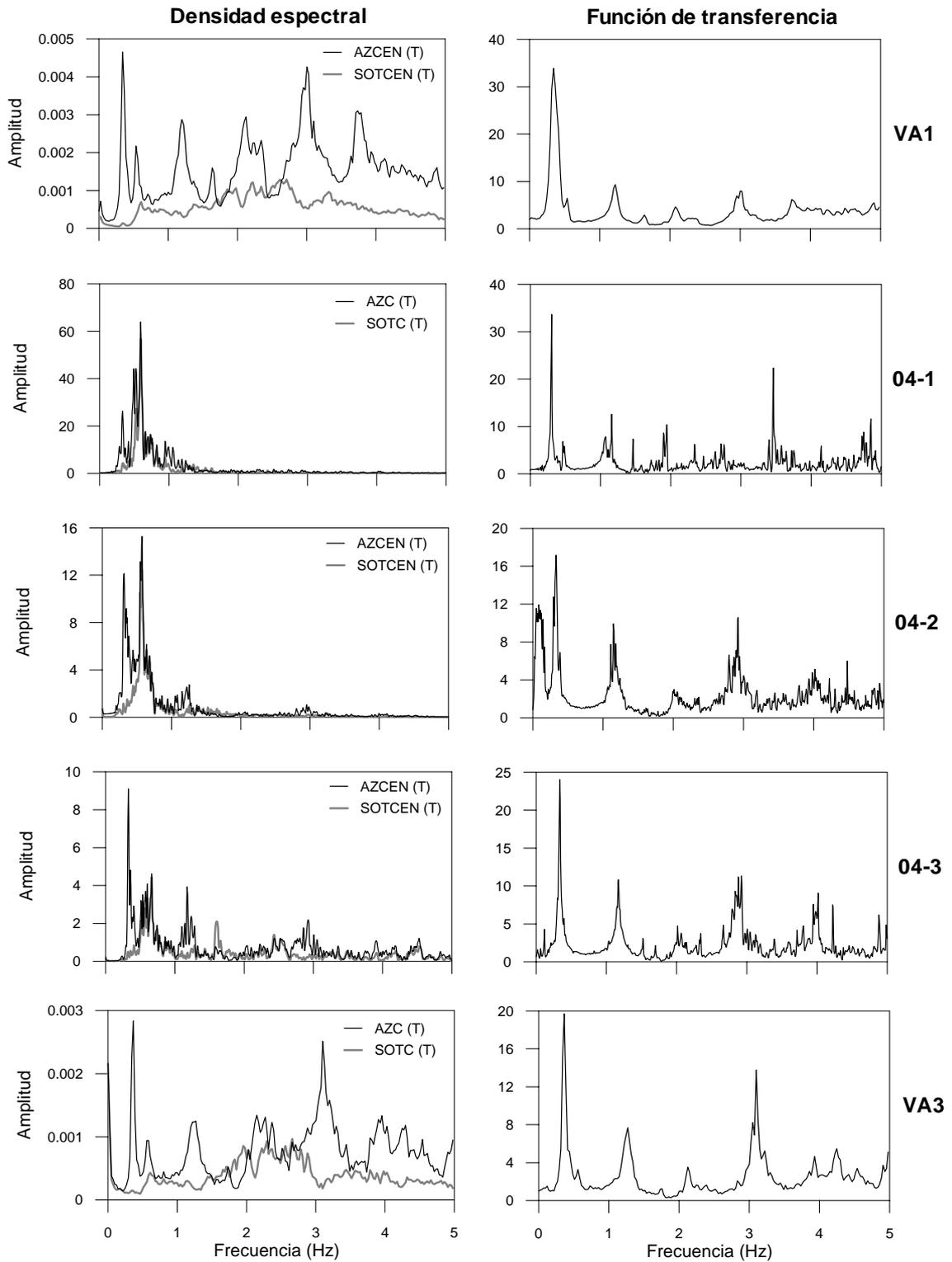


Figura A.6 Espectros y función de transferencia de las señales azotea centro y sótano centro en dirección T

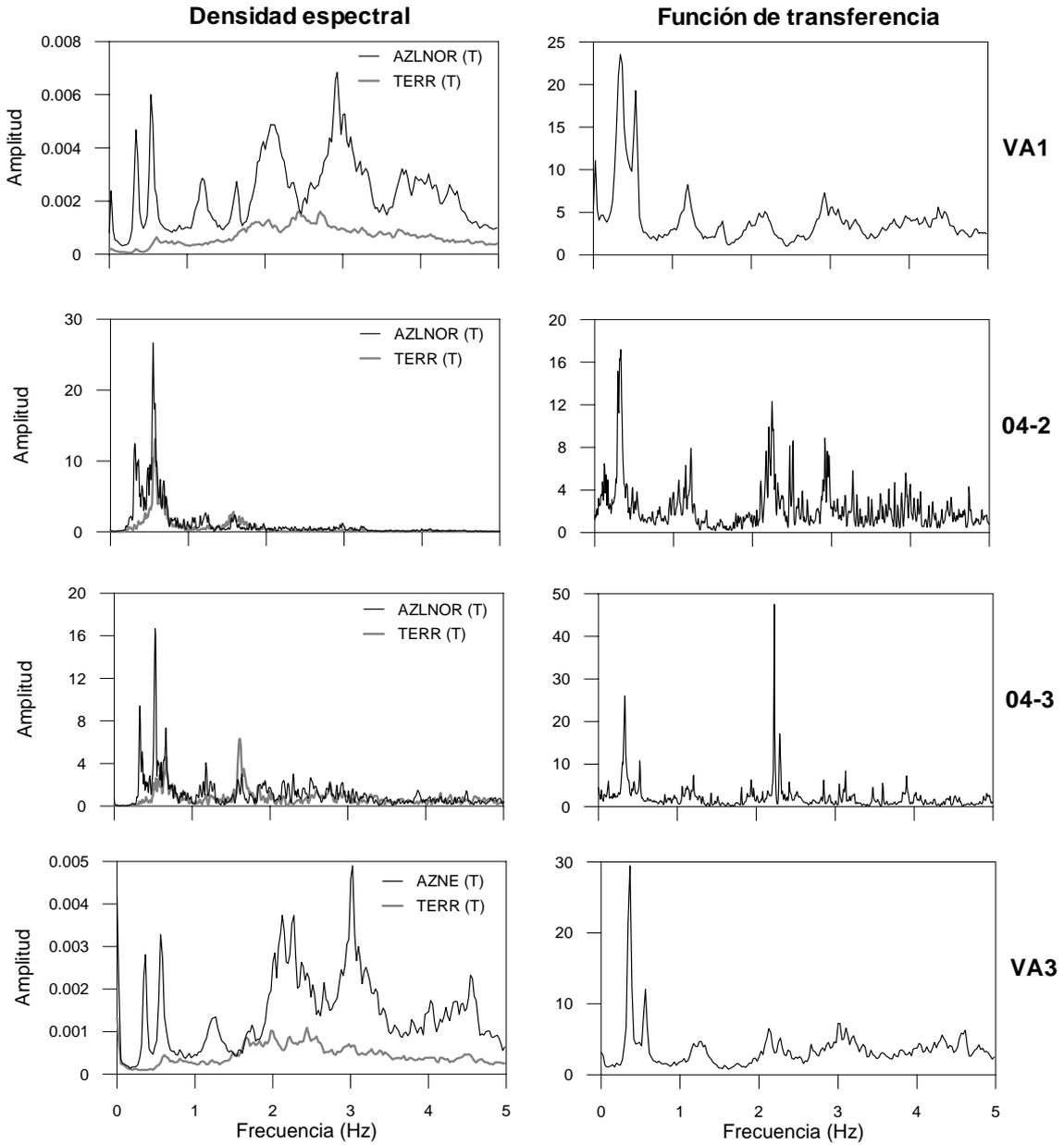


Figura A.7 Espectros y función de transferencia de las señales azotea norte y terreno en dirección T

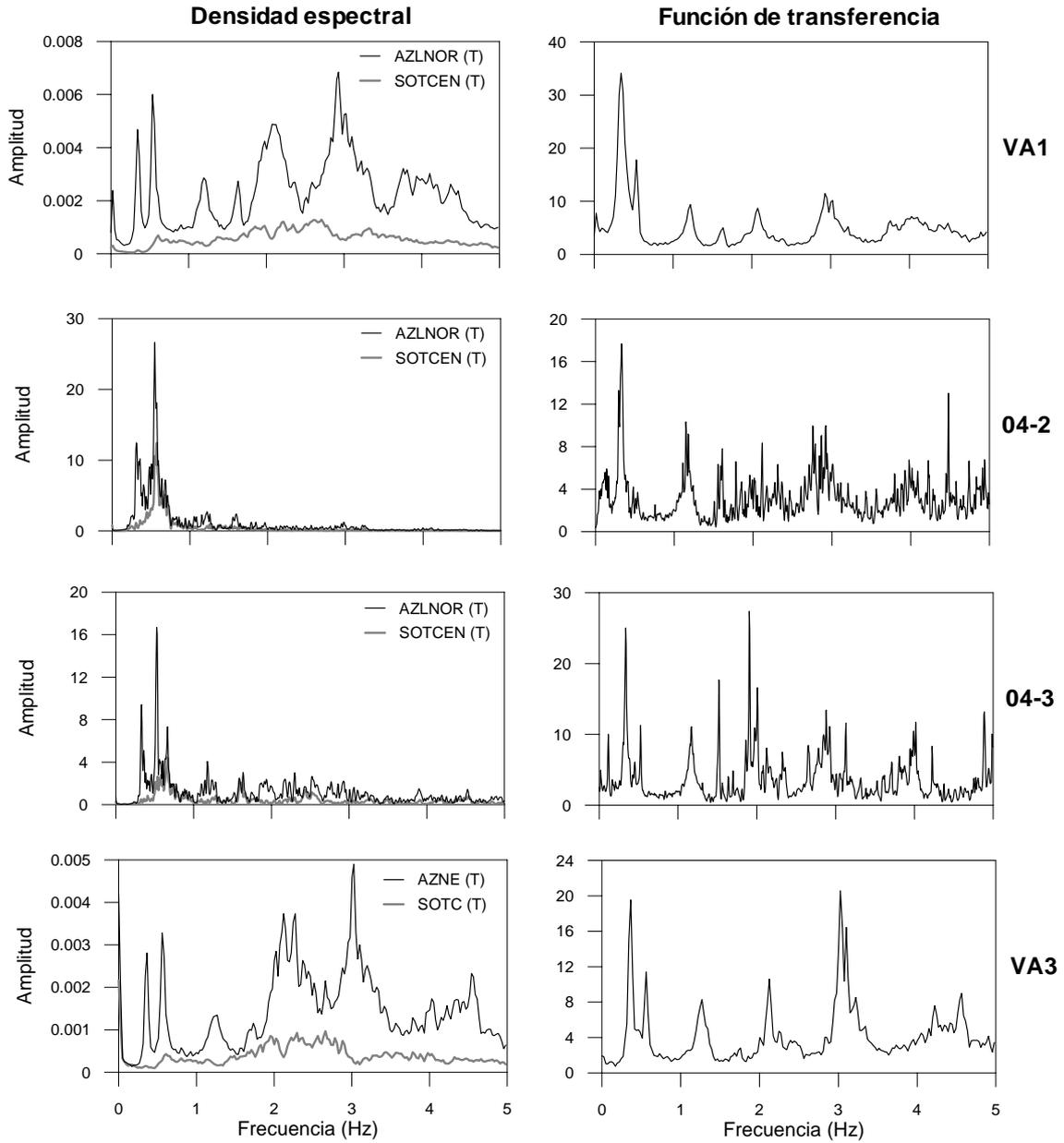


Figura A.8 Espectros y función de transferencia de las señales azotea norte y sótano centro en dirección T

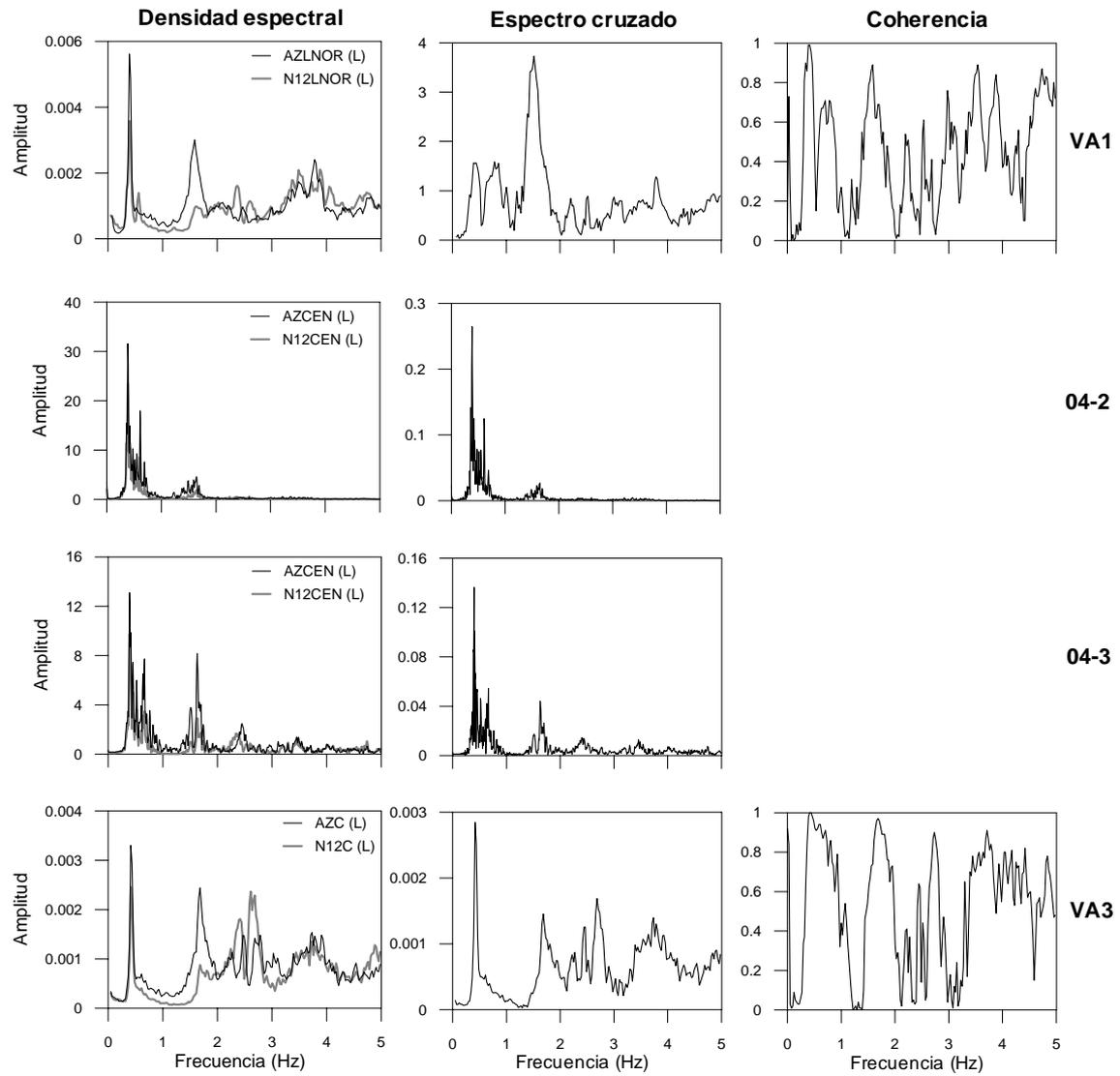


Figura A.9 Espectros y funciones espectrales de las señales azotea y nivel 12 en dirección L

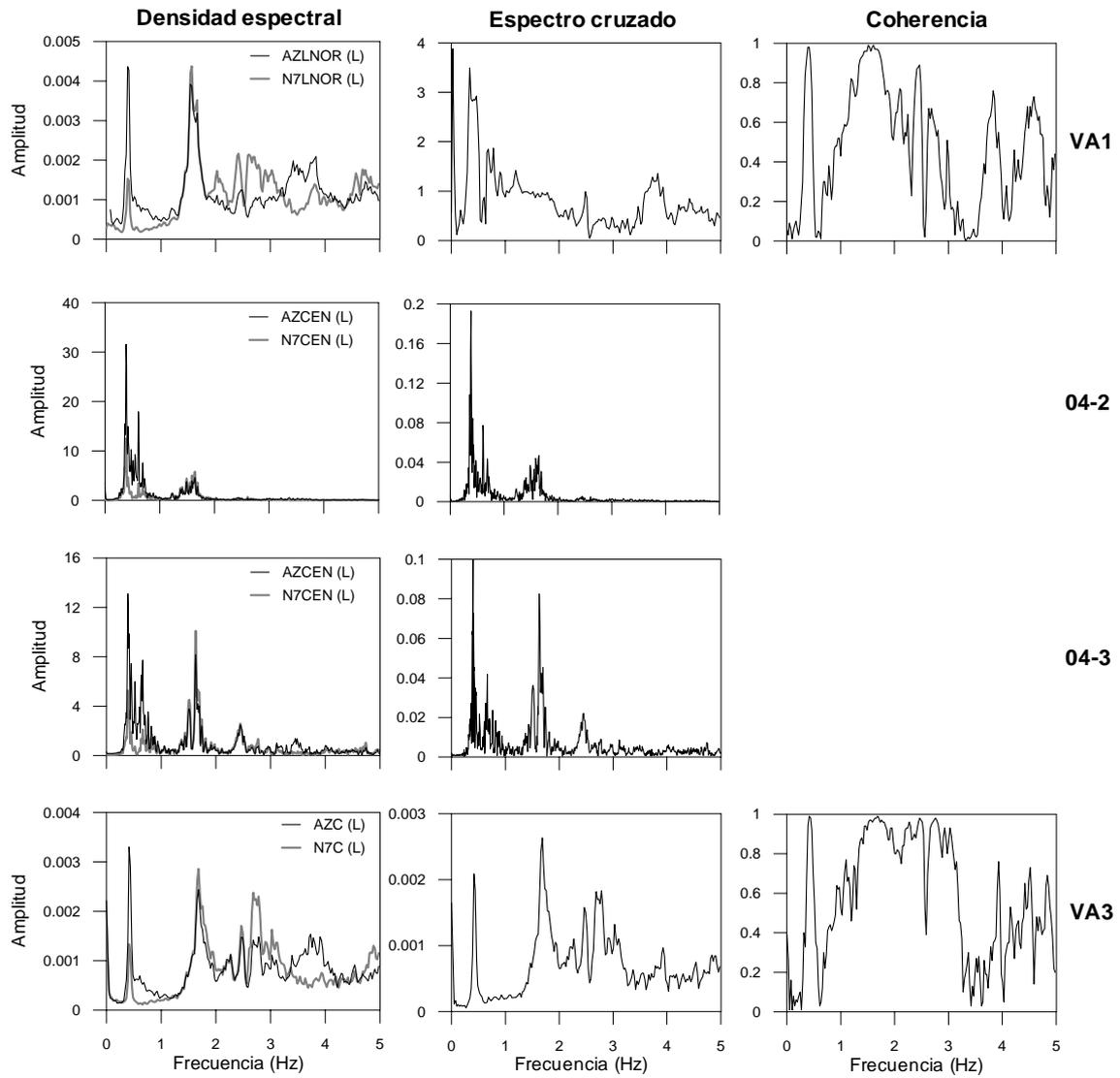


Figura A.10 Espectros y funciones espectrales de las señales azteca y nivel 7 en dirección L

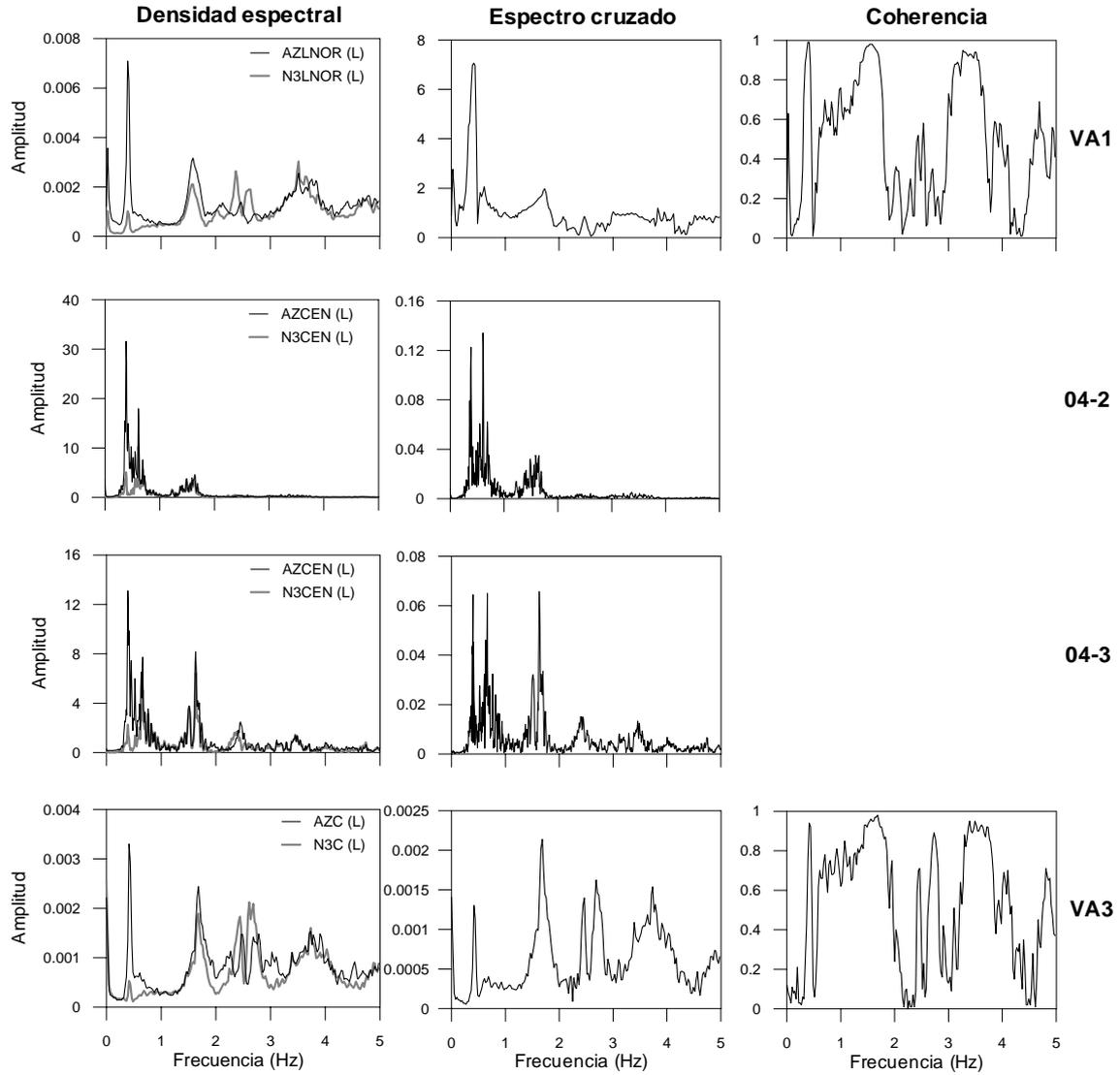


Figura A.11 Espectros y funciones espectrales de las señales azteca y nivel 3 en dirección L

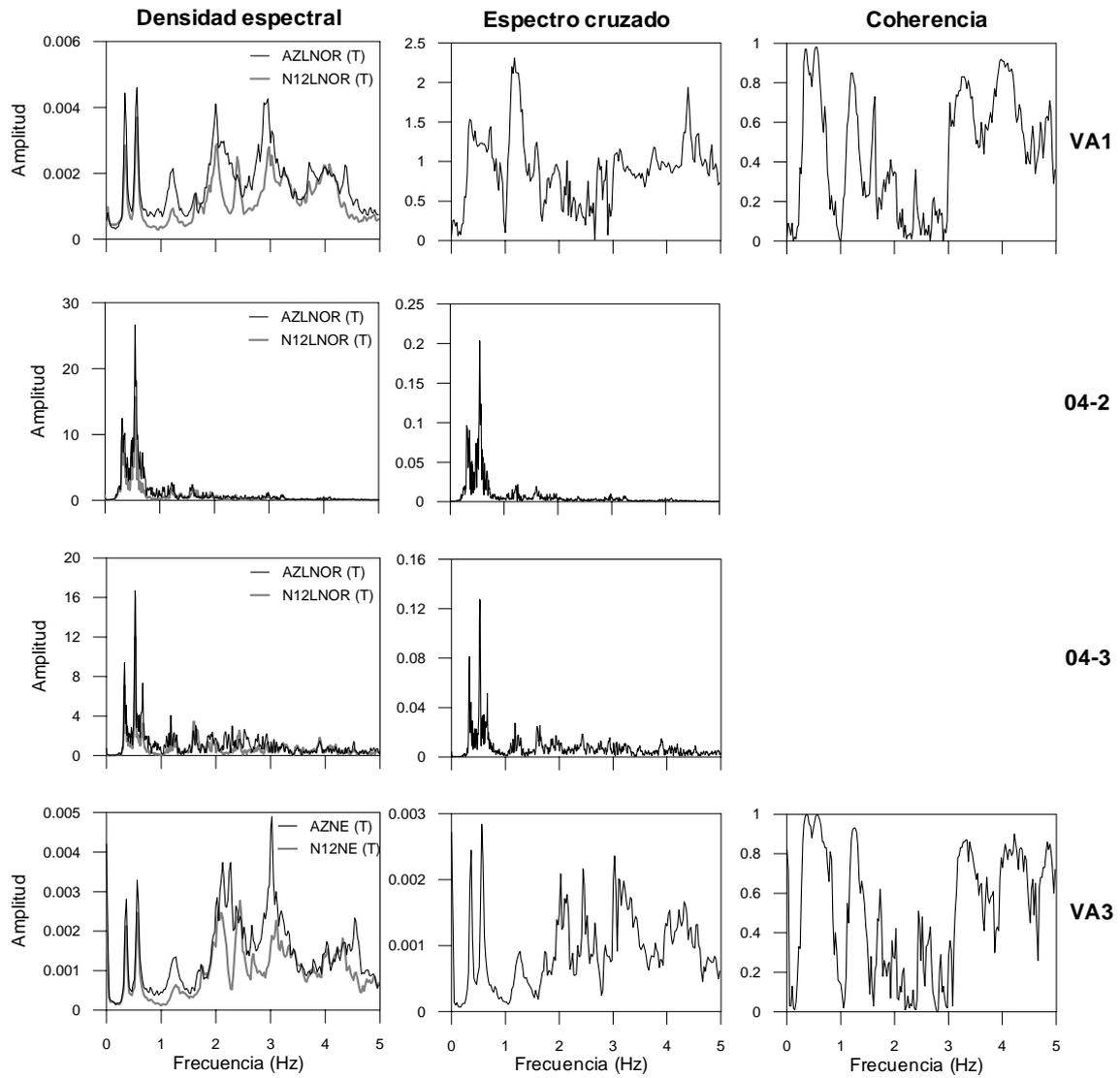


Figura A.12 Espectros y funciones espectrales de las señales azotea norte y nivel 12 norte en dirección T

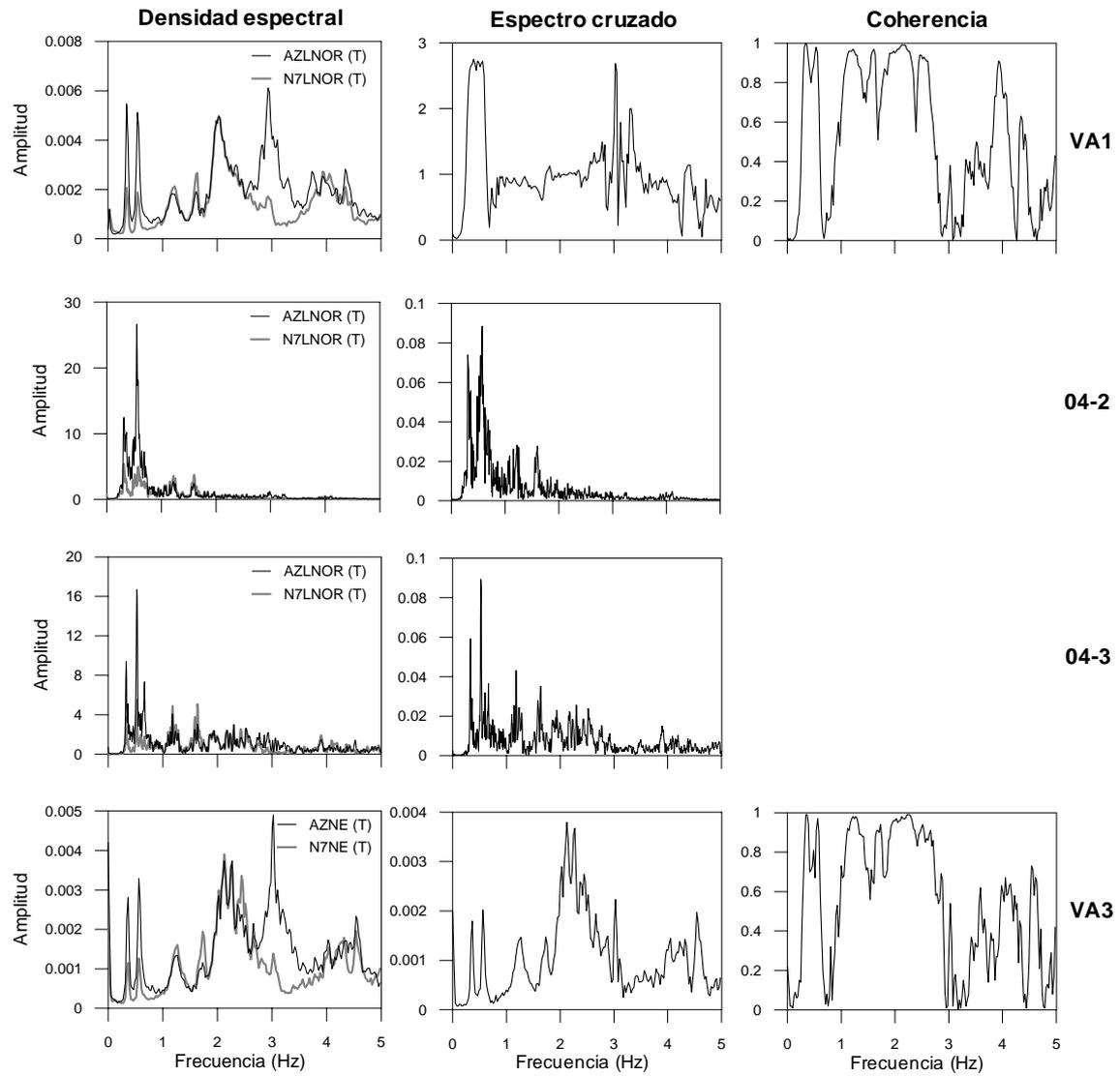


Figura A.13 Espectros y funciones espectrales de las señales azotea norte y nivel 7 norte en dirección T

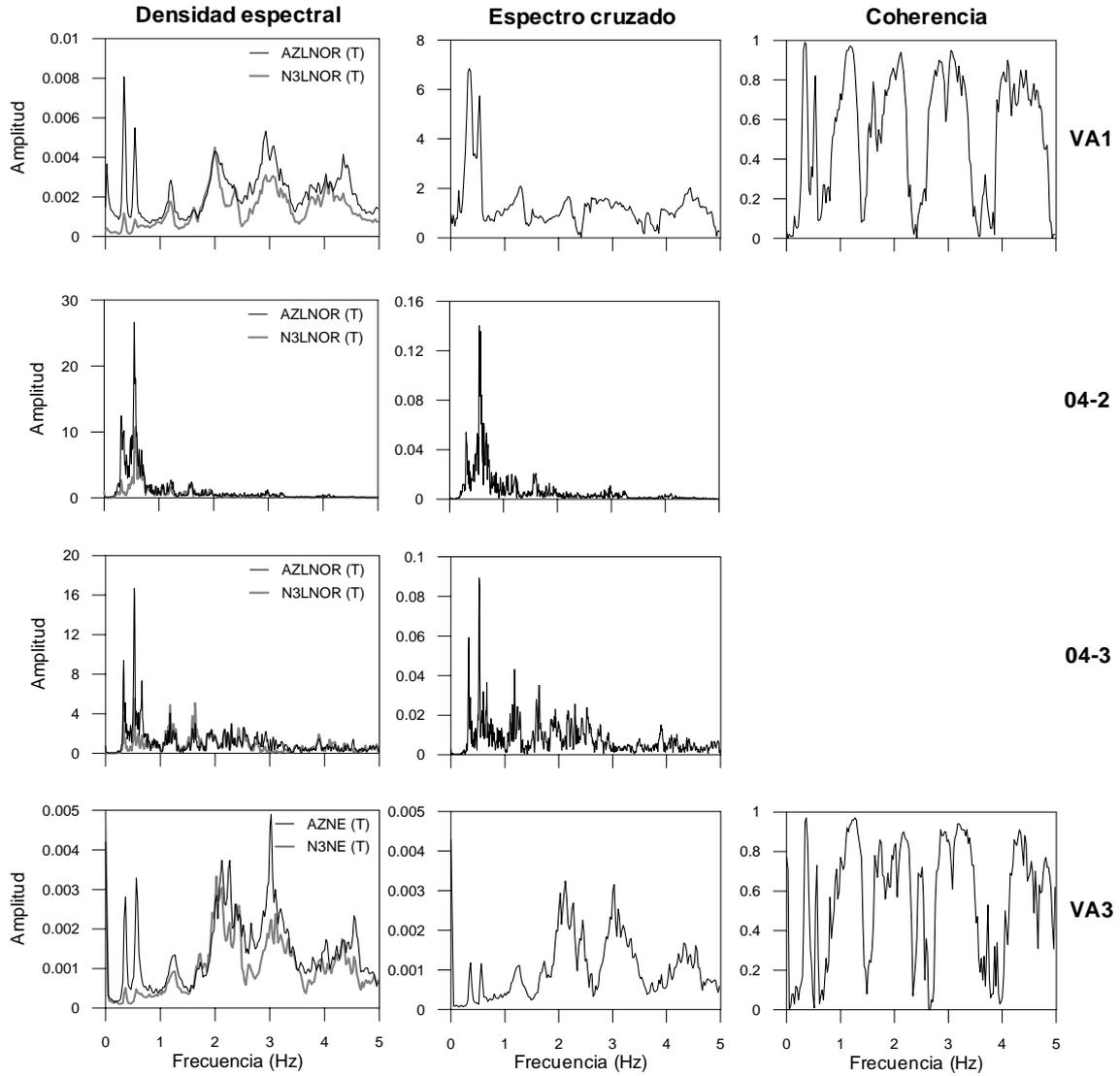


Figura A.14 Espectros y cocientes de las señales azotea norte y nivel 3 norte en dirección T

A.3 Modelos paramétricos identificación con modos superiores

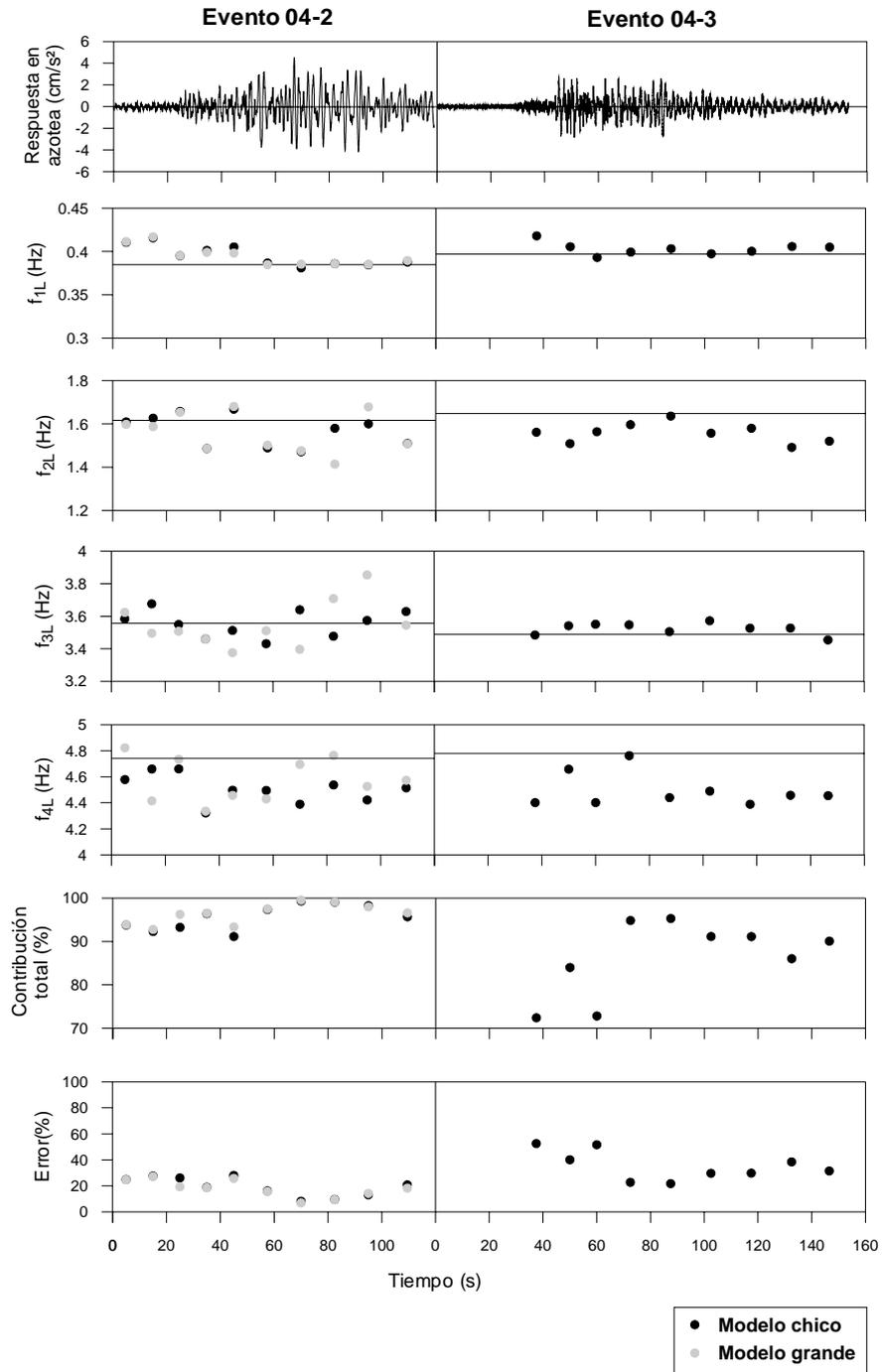


Figura A.15 Frecuencias identificadas con los modelos paramétricos componente L

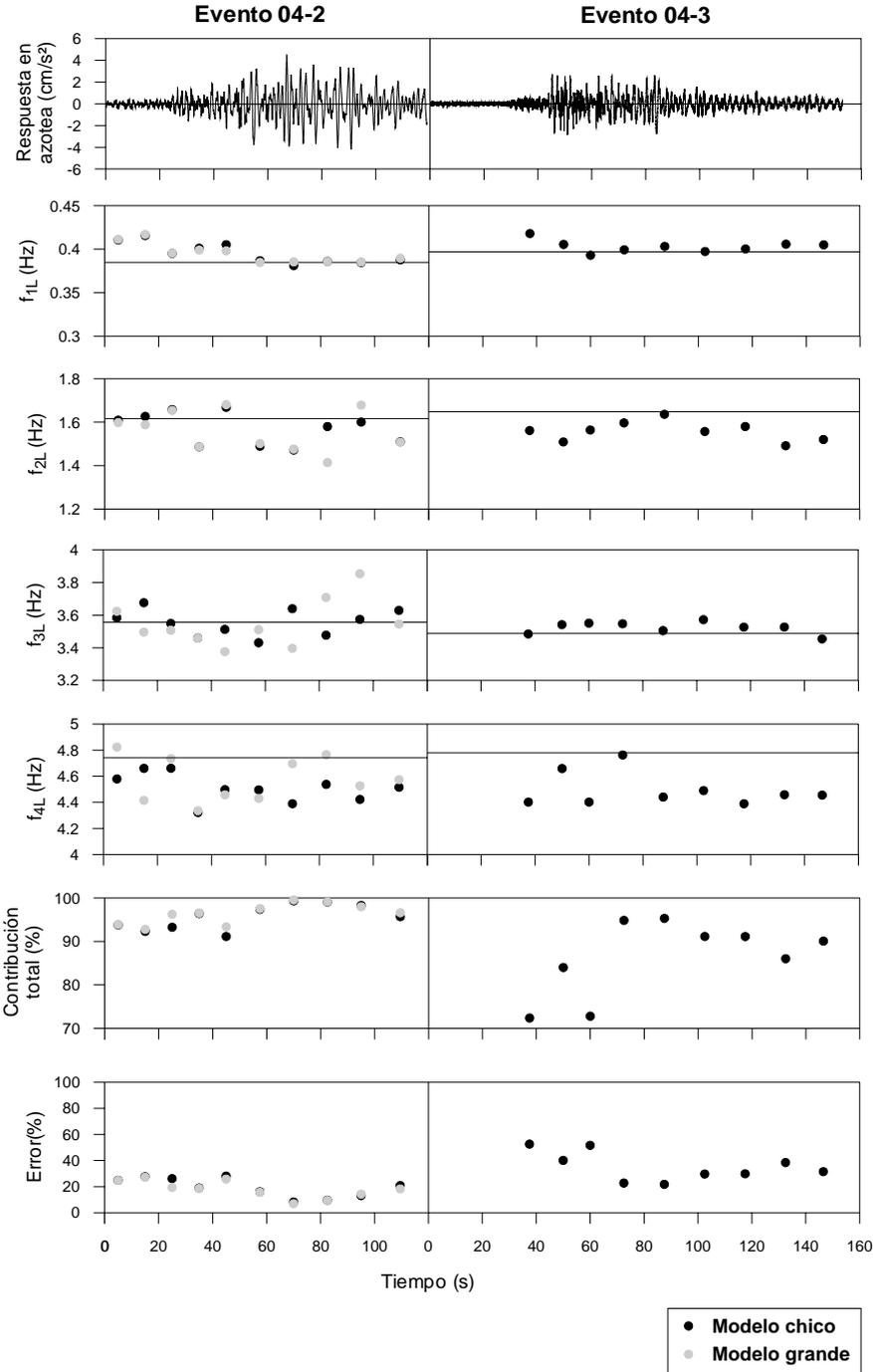


Figura A.16 Frecuencias identificadas con los modelos paramétricos componente T

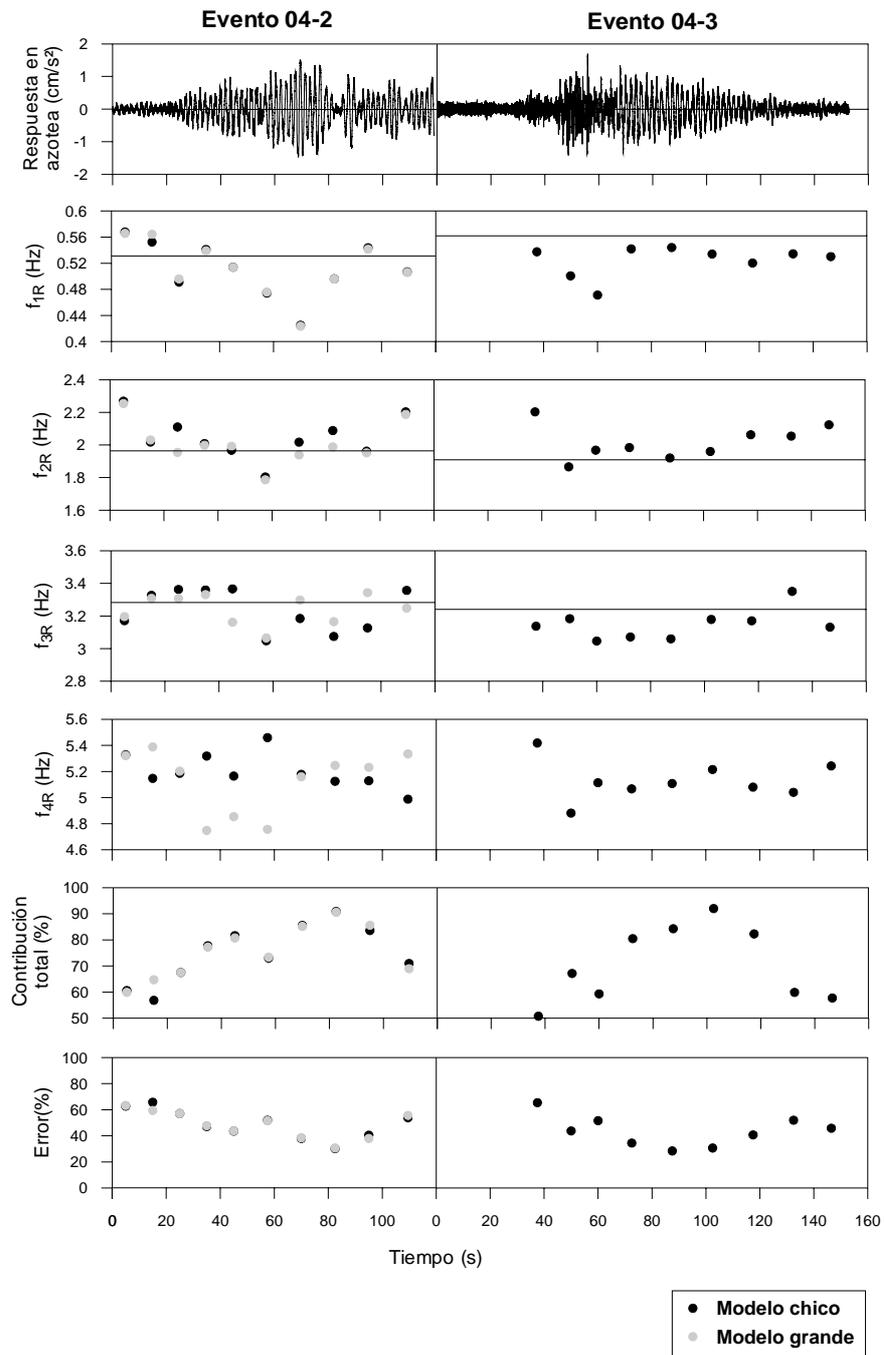


Figura A.17 Frecuencias identificadas con los modelos paramétricos componente R

A.4 Comparación entre las señales medidas y calculadas

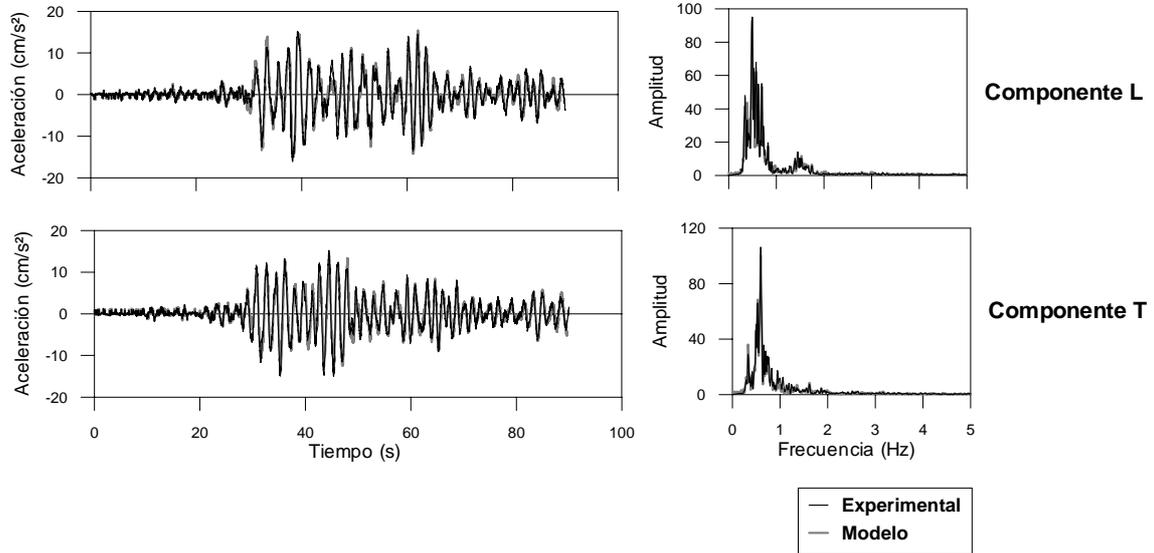


Figura A.18 Señales de azotea modelo 3D-SIST-Ch evento 04-1

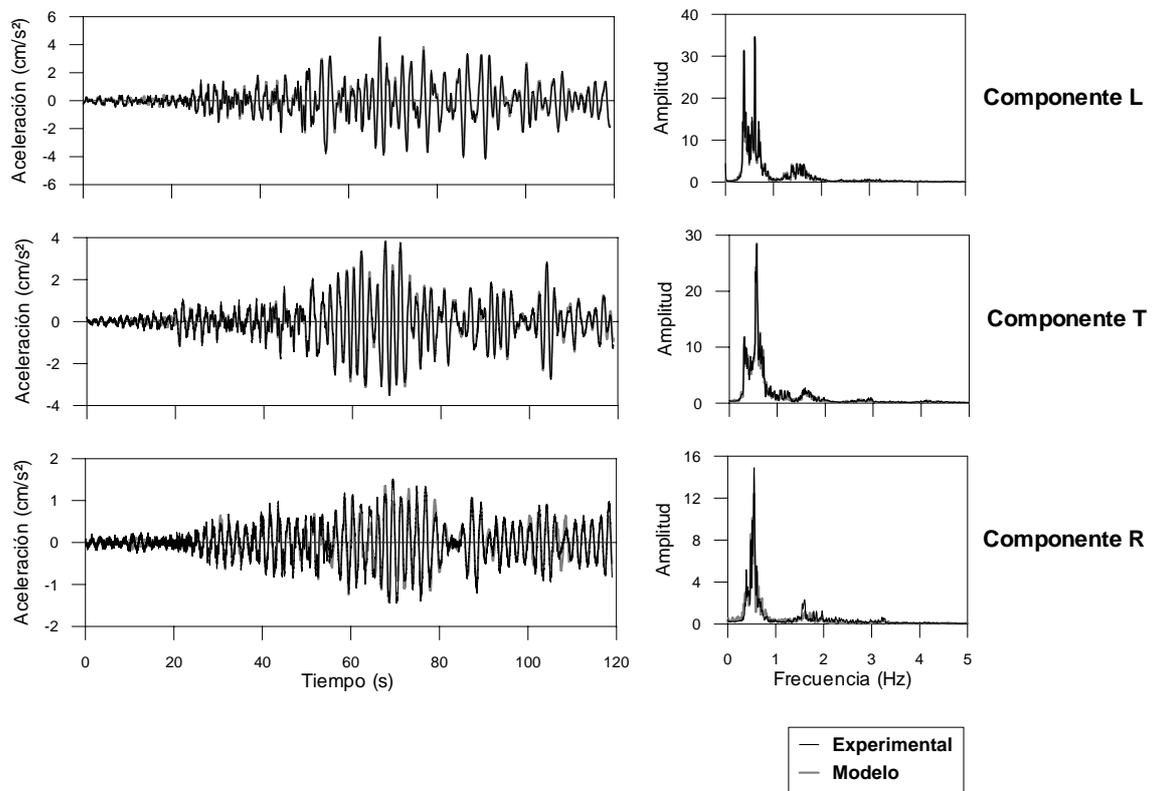


Figura A.19 Señales de respuesta en azotea modelo 3D-SIST-Ch evento 04-2

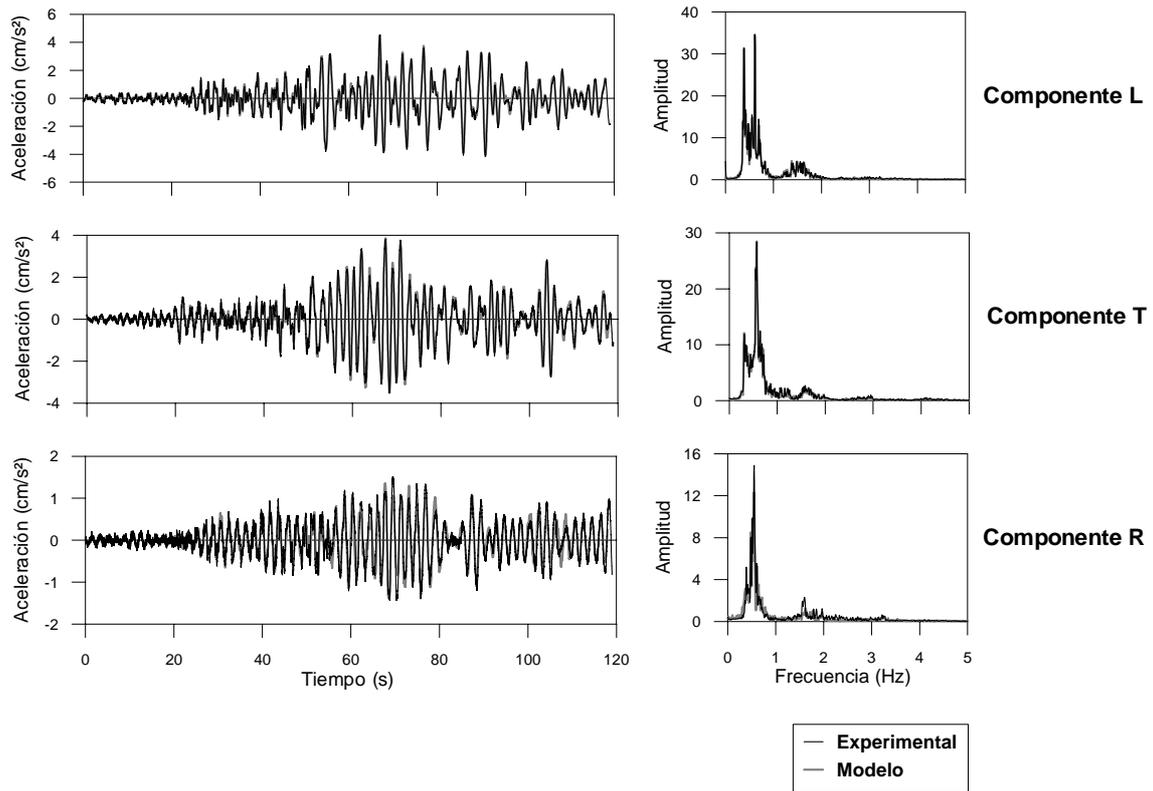


Figura A.20 Señales de respuesta en azotea modelo 3D-SIST-GLR evento 04-2

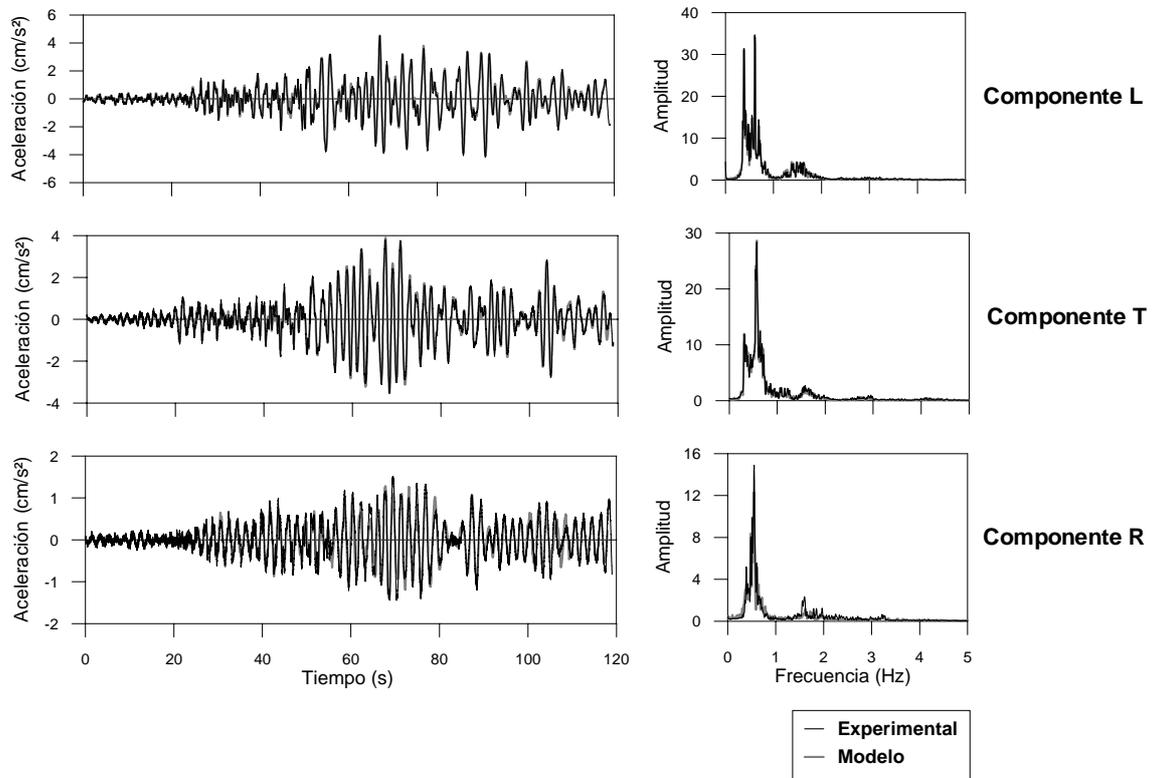


Figura A.21 Señales de respuesta en azotea modelo 3D-SIST-GT evento 04-2

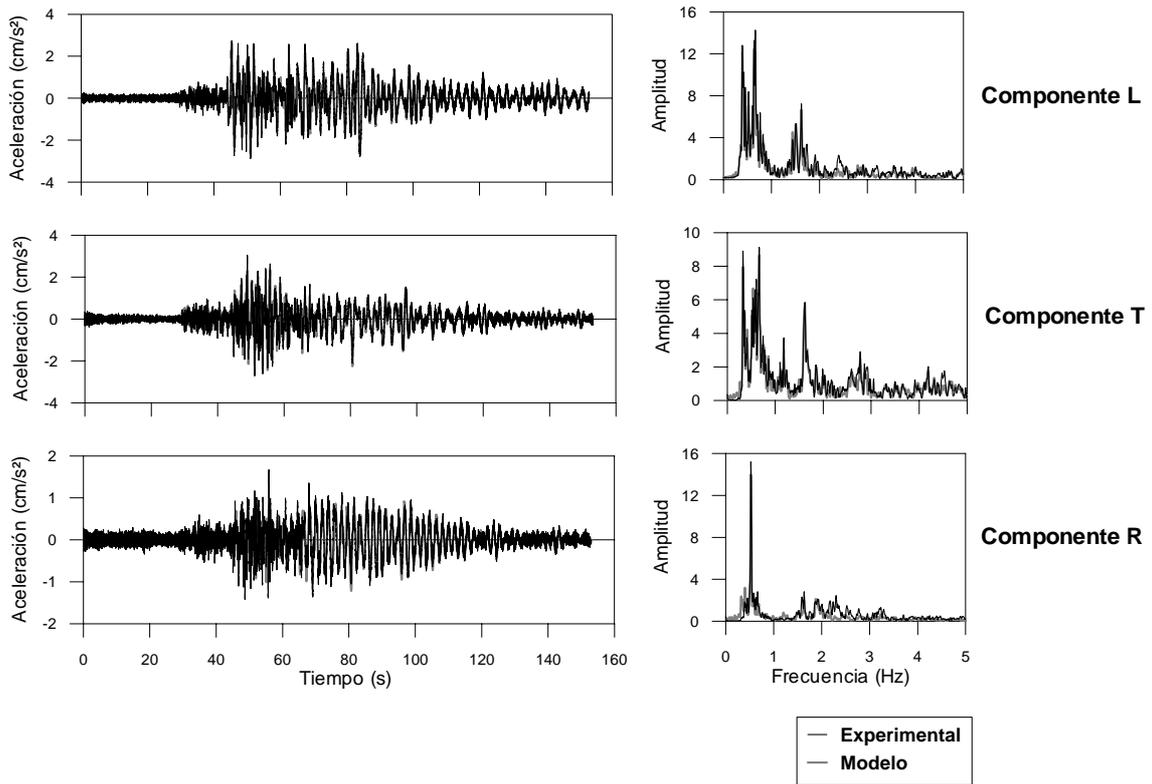


Figura A.22 Señales de respuesta en azotea modelo 3D-SIST-Ch evento 04-3

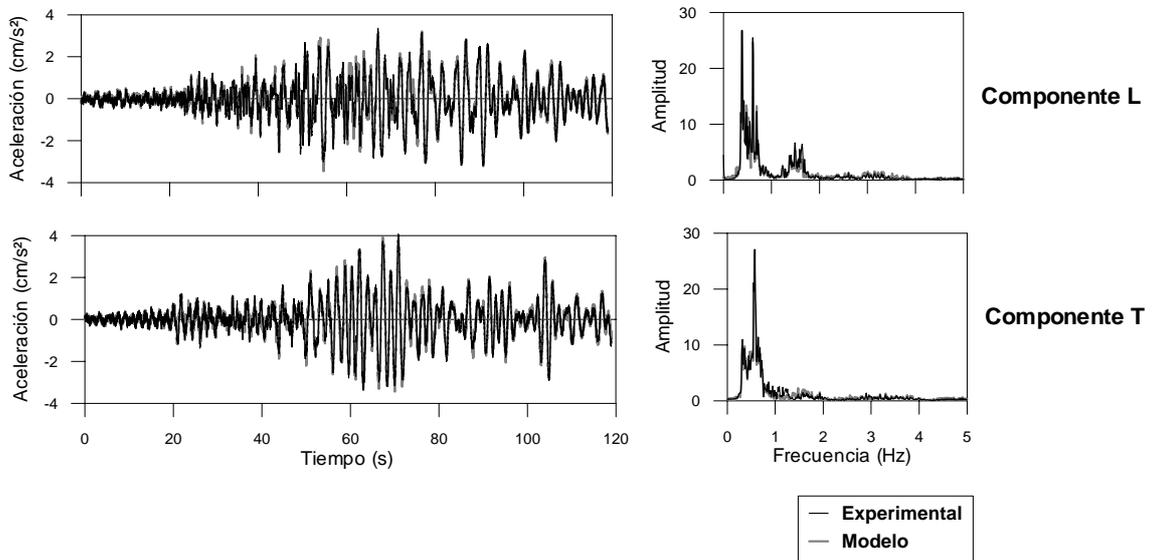


Figura A.23 Señales de respuesta en azotea modelo 3D-ISE-EST

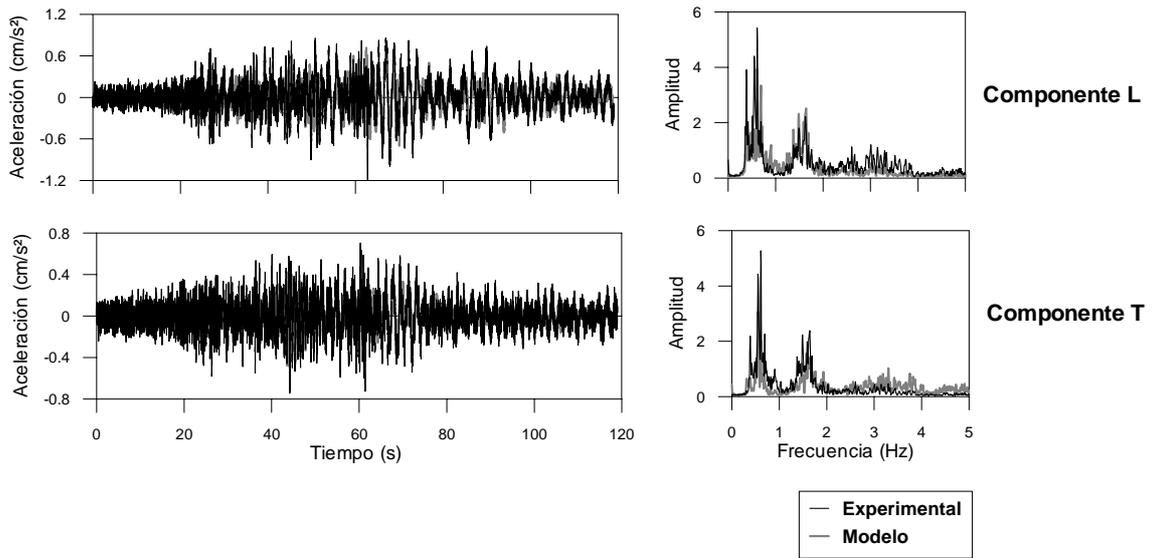


Figura A.24 Señales de respuesta en azotea modelo 3D-ISE-CAB identificación de 2 frecuencias

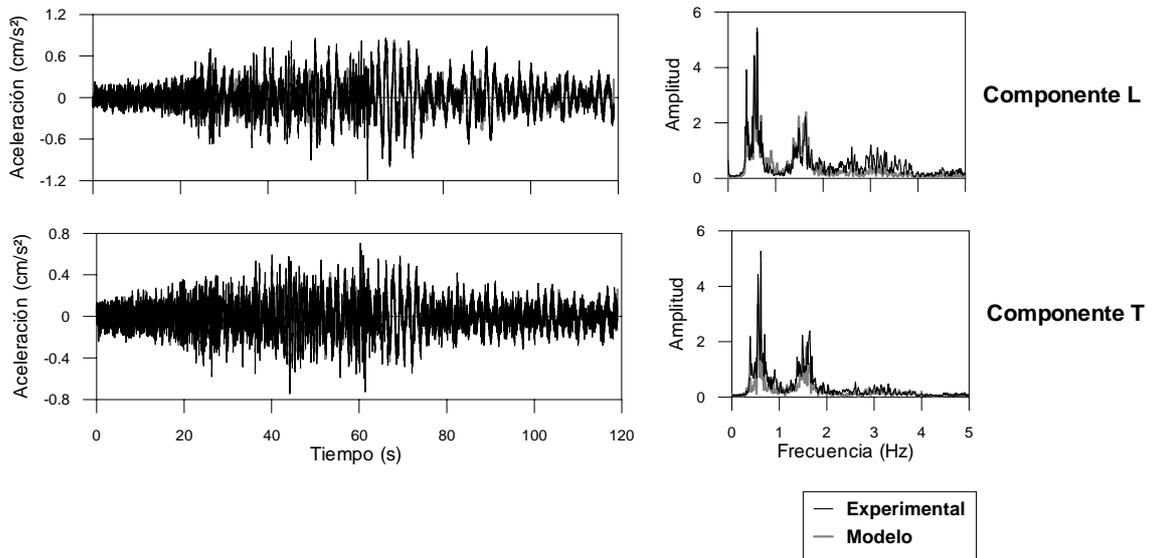


Figura A.25 Señales de respuesta en azotea modelo 3D-ISE-CAB identificación de 12 frecuencias

Apéndice B. MEJORAS EN EL PLANTEAMIENTO Y EL PROGRAMA PARA EXTRAPOLACIÓN DE SEÑALES

En este apéndice se expondrán las mejoras realizadas en el planteamiento de la extrapolación de señales y la contribuciones en el programa Extrapola (Taborda y Murià-Vila, 2002). Este programa se desarrollo para el estudio del edificio SIS para extrapolar señales verticales y señales horizontales, en función de su instrumentación.

Para este trabajo se generaliza el planteamiento de la extrapolación de señales horizontales (Cruz *et al*, 2006b), las diferencias consisten en que con este nuevo planteamiento se pueden extrapolar señales con cualquier distribución de sensores en la instrumentación si se tienen tres señales de traslación y una es ortogonal a las otras dos. Para el desarrollo de las expresiones se parte de las mismas hipótesis básicas y se procede de manera semejante (Taborda y Murià-Vila, 2002a), primero calculando los desplazamientos y rotación del plano, para posteriormente calcular el movimiento de un punto en particular.

La extrapolación de señales se basa en la hipótesis de movimiento de cuerpo rígido en el sistema de piso y se necesitan como datos tres señales de traslación en un nivel. Las señales, dos en T y una en L o dos en L y una en T, corresponden a tres puntos y se conocen las coordenadas de los puntos. El objetivo es conocer las señales en las direcciones ortogonales de un cuarto punto.

El estado inicial se define para los cuatro puntos (A, B, C y D) el cual corresponde a las coordenadas de estos puntos:

$$A(x_a, y_a)$$

$$B(x_b, y_b)$$

$$C(x_c, y_c)$$

$$D(x_d, y_d)$$

Para un instante de tiempo cualquiera "t" se conoce el movimiento relativo al estado inicial del punto A y B en dirección "y", y el movimiento relativo al estado inicial en dirección "x" del punto C. Por lo tanto las historias de movimientos conocidas son

$$y_{at}, y_{bt}, x_{ct}$$

Se desea conocer el movimiento relativo al estado inicial del punto D en el mismo instante "t", la historia de movimientos relativos de este punto son la señales extrapoladas que se quiere calcular

$$x_{dt}, y_{dt}$$

Determinar las historias de movimiento en el punto D, requiere primero definir completamente el movimiento del plano, del estado inicial (A, B, C, D) al estado final (A', B', C', D'). Para este cálculo el movimiento se descompondrá en tres pasos, traslación en "y", giro y traslación en "x".

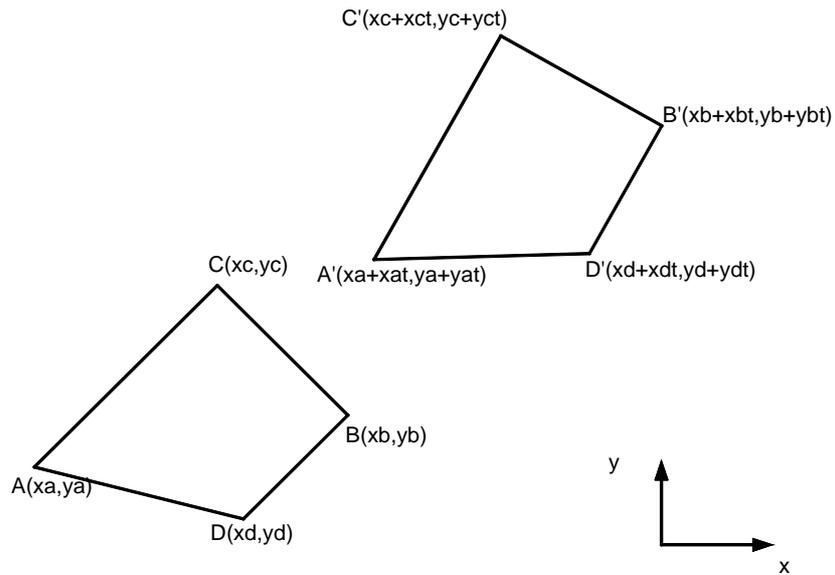


Figura B.1 Estado inicial y estado final extrapolación horizontal

Paso 1. Si se define el centro de giro del plano en el punto A, el movimiento del plano en dirección "y" será el movimiento relativo de A en esta dirección (y_{at}). De esta forma se establece un estado intermedio (A'' , B'' , C'' , D'') en el cual no hay movimiento en "x" y el movimiento en "y" es el del punto A. (Figura B.2).

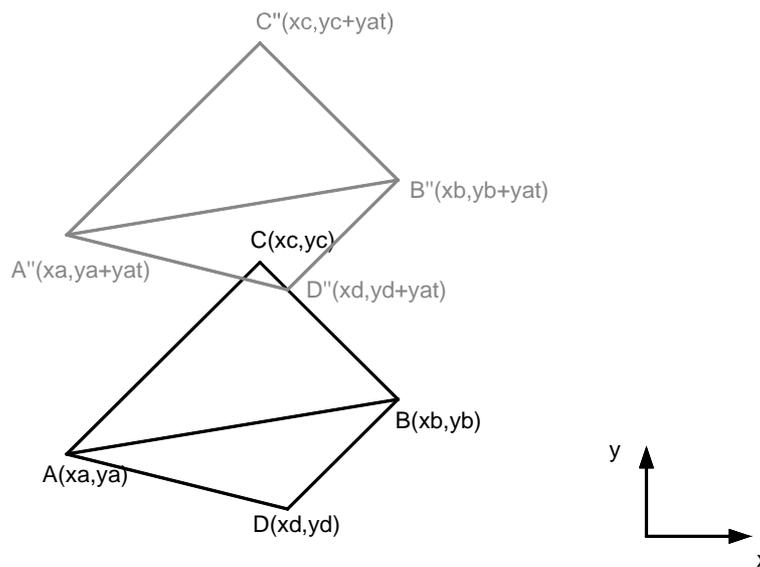
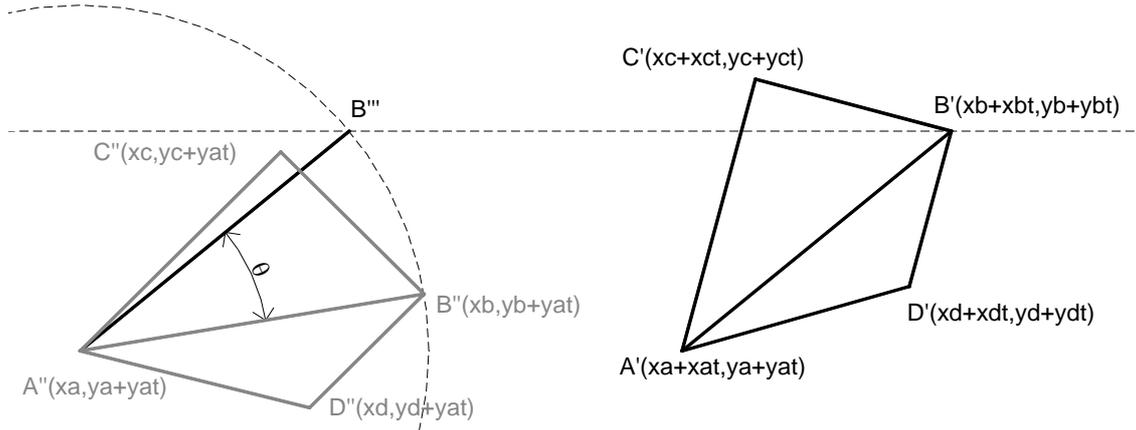


Figura B.2 Paso 1, traslación en "y"

Paso 2. La diferencia entre el movimiento del punto B (" y_{bt} ") y del punto A (" y_{at} ") en dirección "y" es debida al giro, si no hubiera giro los movimientos serían los mismos. Se puede cuantificar el giro conocida la magnitud del segmento \overline{AB} y la coordenada en "y" final del punto B'.

Se establece un segundo estado intermedio (A''' , B''' , C''' , D''') donde se gira el plano θ grados alrededor del punto A (Figura B.3). Para determinar este giro primero hay que establecer las ecuaciones de círculo con centro en A" y de radio $|\overline{AB}|$.


 Figura B.3 Paso 2, giro θ alrededor de A

El radio se calcula como

$$\overline{AB} = \sqrt{(y_b - y_a)^2 - (x_b - x_a)^2} \quad (\text{B.1})$$

y el centro se encuentra en la coordenada

$$(x_a, y_a + y_{at})$$

de esta forma la ecuación del círculo

$$(y - y_0)^2 + (x - x_0)^2 = r^2 \quad (\text{B.2})$$

se establece como

$$(x - x_a)^2 + (y - y_a - y_{at})^2 = y_b^2 - 2y_b y_a + y_a^2 + x_b^2 - 2x_b x_a + x_a^2 \quad (\text{B.3})$$

Si se sustituye el valor de la coordenada en "y" del punto B'(x_b+x_{bt}, y_b+y_{bt}) en la ecuación (B.3) se puede calcular el valor de la coordenada "x" del punto B''(x_{b3}, y_b+y_{bt}). Este valor tiene dos soluciones, la solución deseada es aquella que esté asociada a un menor ángulo de giro.

$$(x_{b3} - x_a)^2 + (y_b + y_{bt} - y_a - y_{at})^2 = y_b^2 - 2y_b y_a + y_a^2 + x_b^2 - 2x_b x_a + x_a^2 \quad (\text{B.4})$$

$$x_{b3} = x_a + \sqrt{x_a^2 + x_b^2 - 2x_a x_b - y_{bt}^2 + 2y_a y_{bt} - 2y_b y_{bt} + 2y_b y_{at} - y_{at}^2 + 2y_{at} y_{bt} - 2y_a y_{at}} \quad (\text{B.5})$$

Una vez conocida la coordenada "x_{b3}" se puede calcular el ángulo θ correspondiente al giro del plano. La magnitud de del giro es calculada como el ángulo entre los vectores $\overline{A''B''}$ y $\overline{A''B''}$, el sentido del giro depende de la dirección del producto cruz entre estos vectores.

$$\cos \theta = \frac{\overline{A''B''} \bullet \overline{A''B''}}{|\overline{A''B''}| |\overline{A''B''}|} \quad (\text{B.6})$$

$$\text{signo}(\theta) = \frac{\overline{A''B''} \times \overline{A''B''}}{|\overline{A''B''} \times \overline{A''B''}|} \quad (\text{B.7})$$

Estas ecuaciones se pueden expresar en términos de las coordenadas y las historias de movimientos como se indica en las siguientes expresiones

$$\cos \theta = \frac{(x_b - x_a)(x_{b3} - x_a) + (y_b - y_a)(y_b + y_{bt} - y_a - y_{at})}{y_b^2 - 2y_a y_b + y_a^2 + x_b^2 - 2x_b x_a + x_a^2} \quad (\text{B.8})$$

$$\text{signo}(\theta) = \text{signo}((x_b - x_a)(y_b + y_{bt} - y_a - y_{at}) - (y_b - y_a)(x_{b3} - x_a)) \quad (\text{B.9})$$

A continuación se pretende obtener las coordenadas del punto $D'''(x_{d3}, y_{d3})$, para lo cual se debe calcular el giro β entre el eje "x" y el segmento de recta $\overline{A''D''}$. Como no se conoce la coordenada en "x" del punto D''' el giro β se calcula como la diferencia entre θ y α . Donde α es el ángulo entre el segmento $\overline{A''D''}$ y el eje "x" (Figura B.4).

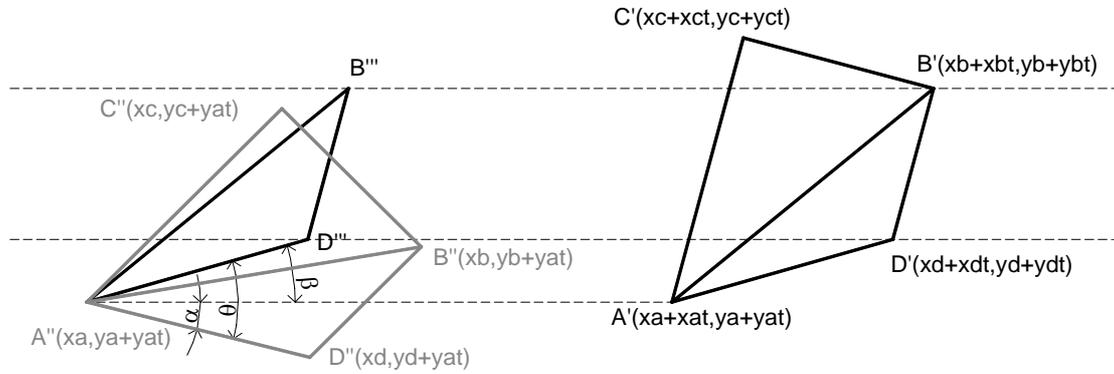


Figura B.4 Determinación de los ángulos α y β

$$\cos \alpha = \frac{\overline{A''D''} \cdot \hat{i}}{|\overline{A''D''}|} \quad (B.10)$$

$$\text{signo}(\alpha) = \frac{\overline{A''D''} \times \hat{i}}{|\overline{A''D''}|} \quad (B.11)$$

De igual forma que θ , α se puede expresar como

$$\cos \alpha = \frac{x_d - x_a}{\sqrt{x_d^2 - 2x_a x_d + x_a^2 + y_d^2 - 2y_a y_d + y_a^2}} \quad (B.12)$$

$$\text{signo}(\alpha) = \text{signo}(y_a - y_d) \quad (B.13)$$

La coordenada en "y" del punto D''' se puede calcular como proyección $\overline{A''D''}$ sobre el eje "y" más la coordenada en esta dirección del punto A'' .

$$y_{d3} = \text{Proy}_{\hat{j}}^{\overline{A''D''}} + y_a + y_{at} \quad (B.14)$$

La cual se puede calcular en función del giro β

$$y_{d3} = \left(\sqrt{x_d^2 - 2x_d x_a + x_a^2 + y_d^2 - 2y_d y_a + y_a^2} \right) \sin \beta + y_a + y_{at} \quad (B.15)$$

donde

$$\theta = \alpha + \beta \quad (B.16)$$

La coordenada en "x" del punto D''' se puede calcular como proyección $\overline{A''D''}$ sobre el eje "x" más la coordenada en esta dirección del punto A'' .

$$x_{d3} = \text{Proy}_{\hat{i}}^{\overline{A''D''}} + x_a \quad (B.17)$$

La cual también se puede calcular en función del giro β

$$x_{d3} = \left(\sqrt{x_d^2 - 2x_d x_a + x_a^2 + y_d^2 - 2y_d y_a + y_a^2} \right) \cos \beta + x_a \quad (\text{B.18})$$

Como la coordenada en "y" del punto D''' es igual a la del punto D'(x_d+x_{dt}, y_d+y_{dt}) se puede igualar las coordenadas de ambos puntos en esta dirección

$$y_d + y_{dt} = y_{d3} \quad (\text{B.19})$$

De esta forma la historia de movimientos del punto D en dirección "y" se calcula como

$$y_{dt} = \left(\sqrt{x_d^2 - 2x_d x_a + x_a^2 + y_d^2 - 2y_d y_a + y_a^2} \right) \sin \beta + y_a + y_{at} - y_d \quad (\text{B.20})$$

Paso 3. Hasta ahora solo se conocen los movimientos de traslación en "y" y giro del plano, y se conoce el valor de "x_{ct}" el cual esta compuesto por la traslación en "x" y la contribución del giro en esta dirección.

Para continuar con los cálculos se necesita conocer la coordenada en "x" del punto C'''. De manera similar al paso anterior, se calcula el giro δ entre el eje "x" y el vector $\overline{A''C''}$, el cual se define como la diferencia entre θ y el ángulo (γ) entre el eje "x" y el vector $\overline{A''C''}$ (Figura B.5).

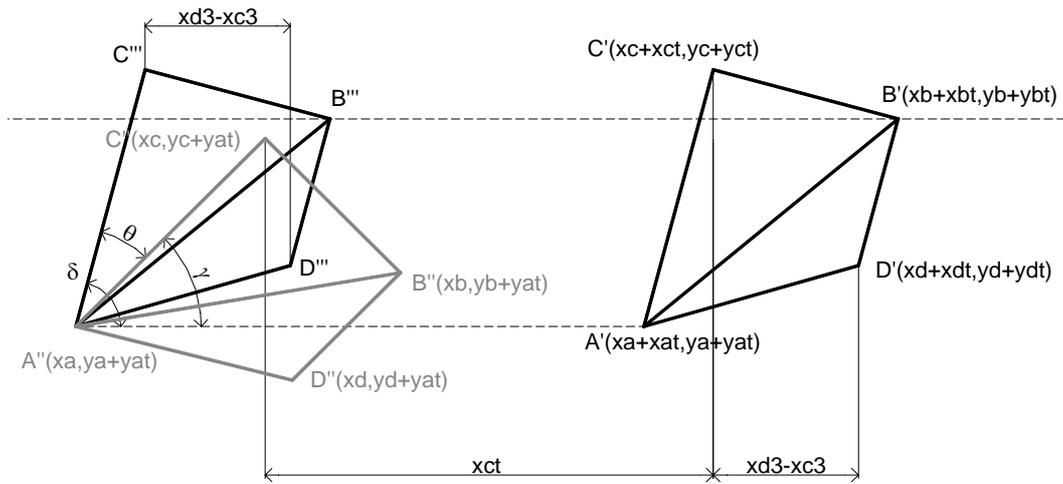


Figura B.5 Paso 3, traslación en "x"

$$\cos \gamma = \frac{\overline{A''C''} \cdot \hat{i}}{|\overline{A''C''}|} \quad (\text{B.21})$$

$$\text{signo}(\gamma) = \frac{\overline{A''C''} \times \hat{i}}{|\overline{A''C''}|} \quad (\text{B.22})$$

o bien

$$\cos \gamma = \frac{x_c - x_a}{\sqrt{x_c^2 - 2x_a x_c + x_a^2 + y_c^2 - 2y_a y_c + y_a^2}} \quad (\text{B.23})$$

$$\text{signo}(\gamma) = \text{signo}(y_a - y_c) \quad (\text{B.24})$$

La coordenada en “x” del punto C” se puede calcular como proyección $\overline{A''C''}$ sobre el eje “x” más la coordenada en esta dirección del punto A”.

$$x_{c3} = \text{Proy}_{\hat{i}}^{\overline{A''C''}} + x_a \quad (\text{B.25})$$

La cual se puede calcular en función del ángulo δ

$$x_{c3} = \left(\sqrt{x_c^2 - 2x_c x_a + x_a^2 + y_c^2 - 2y_c y_a + y_a^2} \right) \cos \delta + x_a \quad (\text{B.26})$$

donde

$$\theta = \delta + \gamma \quad (\text{B.27})$$

Finalmente conocida la coordenada “ x_{c3} ” se puede calcular la coordenada en “x” del punto D’(x_d+x_{dt} , y_d+y_{dt}) como la coordenada en “x” del punto C, más la historia de traslaciones “ x_{ct} ”, más la diferencia de coordenadas en “x” entre D” y C” ($x_{d3}-x_{c3}$).

$$x_d + x_{dt} = x_c + x_{ct} + (x_{d3} - x_{c3}) \quad (\text{B.28})$$

Sustituyendo las ecuaciones (B.18) y (B.26) en la ecuación anterior la historia de movimientos del punto D en dirección “x” se calcula como

$$\begin{aligned} x_{dt} = & x_c + x_{ct} + \left(\sqrt{x_d^2 - 2x_d x_a + x_a^2 + y_d^2 - 2y_d y_a + y_a^2} \right) \cos \beta \\ & - \left(\sqrt{x_c^2 - 2x_c x_a + x_a^2 + y_c^2 - 2y_c y_a + y_a^2} \right) \cos \delta - x_d \end{aligned} \quad (\text{B.29})$$

Apéndice C. MEJORAS EN EL PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE ESPECTROS Y FUNCIONES DE CORRELACIÓN

El aporte de este trabajo corresponde a mejoras en las subrutinas de cálculo de ángulos de fase, coherencias y espectro cruzado, estos cambios se adaptaron al programa de Murià-Vila *et al*, 1999. También se adaptaron las rutinas de transformada rápida de Fourier, función de transferencia, ángulos de fase y coherencias para usarse en pruebas de vibración ambiental (VA). Estas modificaciones (Murià-Vila *et al*, 2006) se implementaron en dos programas de cómputo, AE para el procesamiento de señales completas y AEpro para señales por ventanas promediadas.

Las mejoras generales en las subrutinas se refieren a una actualización de la versión del compilador usado. Además se amplió la capacidad para procesar señales de mayor duración. En particular se corrigieron errores en las subrutinas de espectro cruzado y la subrutina de ángulo de fase para el procesamiento de registros de VA.

Los resultados de los programas se compararon con otros IFCIIC (Mendoza y Murià-Vila, 2006), CoherenARR (Zapata y Murià-Vila, 2003), JFFT, JIFCII (Murià-Vila *et al*, 1999) y con el complemento de análisis de Fourier de Excel.

C.1 Descripción del los programas

Las subrutinas usadas están basadas en las ecuaciones (3.1) a (3.15) del capítulo de metodología y en la transformada rápida de Fourier. En el caso de análisis por ventanas se calcula el valor esperado (E) de la función espectral de manera que las expresiones del capítulo 3 cambian a

$$\hat{S}_{XX}(f) = E[X_i^*(f) \cdot X_i(f)] \quad (C.1)$$

$$\hat{S}_{XY} = E[X_i^*(f) \cdot Y_i(f)] \quad (C.2)$$

$$\hat{G}_{XX}(f) = \begin{cases} 2\hat{S}_{XX}(f) & \text{si } f > 0 \\ \hat{S}_{XX}(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad (C.3)$$

$$\hat{G}_{XY}(f) = \begin{cases} 2\hat{S}_{XY}(f) & \text{si } f > 0 \\ \hat{S}_{XY}(f) & \text{si } f = 0 \\ 0 & \text{si } f < 0 \end{cases} \quad (C.4)$$

La coherencia se define como

$$\gamma_{XY}^2 = \frac{E[|G_{XY}(f)|]^2}{\hat{G}_{XX}(f)\hat{G}_{YY}(f)} \quad (C.5)$$

El espectro cruzado de potencia expresado como la suma de su parte real y su parte imaginaria es igual a

$$\hat{G}_{XY}(f) = E[C_{XY} + iQ_{XY}] \quad (C.6)$$

De esta forma el ángulo de fase se calcula como

$$\hat{\theta}(f) = E \left[\tan^{-1} \frac{Q_{XY}(f)}{C_{XY}(f)} \right] \quad (C.7)$$

Ambos programas trabajan con pares de señales (señal A y señal B), con las cuales se calcula el espectro de potencia de la señal A (G_{AA}), el espectro de potencia de la señal B (G_{BB}), el módulo del espectro cruzado de potencia (G_{AB}), función de transferencia entre G_{AA} y G_{BB} (FT), la función de transferencia cruzada entre G_{AB} y G_{AA} , el ángulo de fase y la coherencia.

El programa AE da como resultado las funciones espectrales suavizadas y se le puede agregar a la señal un *tapper* cosenoidal de 0 a 50%. El suavizado fue otro de los cambios que se incluyeron. Anteriormente se usaba el suavizado de promedios cuadráticos móviles, el cual, a frecuencias altas, afecta de manera importante las amplitudes. El suavizado que se usa es el de Trifunac (Trifunac, 1972) el cual no depende de la frecuencia, donde la amplitud suavizada se calcula como

$$A_s = \frac{A_{n-1}}{4} + \frac{A_n}{2} + \frac{A_{n+1}}{4} \quad (C.8)$$

El programa AEpro calcula las funciones espectrales en ventanas, con o sin traslapes, y da como resultado el promedio de estas. Al tratarse de promedios no se necesita suavizar las amplitudes. Para disminuir los errores numéricos (efecto de Gibbs) al dividir la señal en ventanas, con el programa se puede aplicar una ventana de ponderación tipo Hanning.

La introducción de datos a los programas se hace por medio de archivos de datos en texto simple los cuales contiene los parámetros mostrados en la tabla C.1

Tabla C.1 Formato de los archivos de datos

| Archivo de datos AE | Archivo de datos AEpro |
|---------------------|------------------------|
| <i>Nombre_A</i> | <i>Nombre_A</i> |
| <i>Nombre_B</i> | <i>Nombre_B</i> |
| <i>LS dt</i> | <i>LS dt</i> |
| <i>NP</i> | <i>NPV</i> |
| <i>Tap PT</i> | <i>NPT</i> |
| <i>Nombre_S</i> | <i>Hann</i> |
| | <i>Nombre_S</i> |

donde

| | |
|-----------------|---|
| <i>Nombre_A</i> | nombre del archivo con la señal A |
| <i>Nombre_B</i> | nombre del archivo con la señal B |
| <i>Nombre_S</i> | nombre del archivo de resultados |
| <i>LS</i> | líneas a saltar (de encabezado) en los archivos con las señales |
| <i>dt</i> | intervalo de tiempo en las señales |
| <i>NP</i> | número de puntos |
| <i>NPV</i> | número de puntos por ventana (potencia de 2) |
| <i>NPT</i> | número de puntos de traslape |
| <i>Tap</i> | indicador de tapper (0=sin tapper, 1=con tapper) |
| <i>PT</i> | porcentaje de tapper (0-50%) |
| <i>Hann</i> | indicador de Hanning (0=sin Hanning, 1=con Hanning) |

De esta forma se procesan los registros en pares de señales, escogiendo cocientes de acuerdo a la metodología planteada en el capítulo 3. Los programas están diseñados para trabajar por lotes, es decir que se puede crear un archivo de ejecución que contenga un listado de todos los

archivos de datos que se quieran procesar y con este calcular todos los cocientes sin tener que ejecutar el programa con cada archivo de datos.

Para optimizar el procesamiento de los cocientes se crearon macros en Excel las cuales generan los archivos de datos y el archivo por lotes para cada uno de los programas. Para el uso de estas macros se deben identificar cada una de las señales con una clave alfanumérica de dos dígitos y hacer un listado de los cocientes. El uso de claves para las señales está ligado con la forma de nombrar los archivos de resultados para su análisis y graficación con las macros del apéndice D.

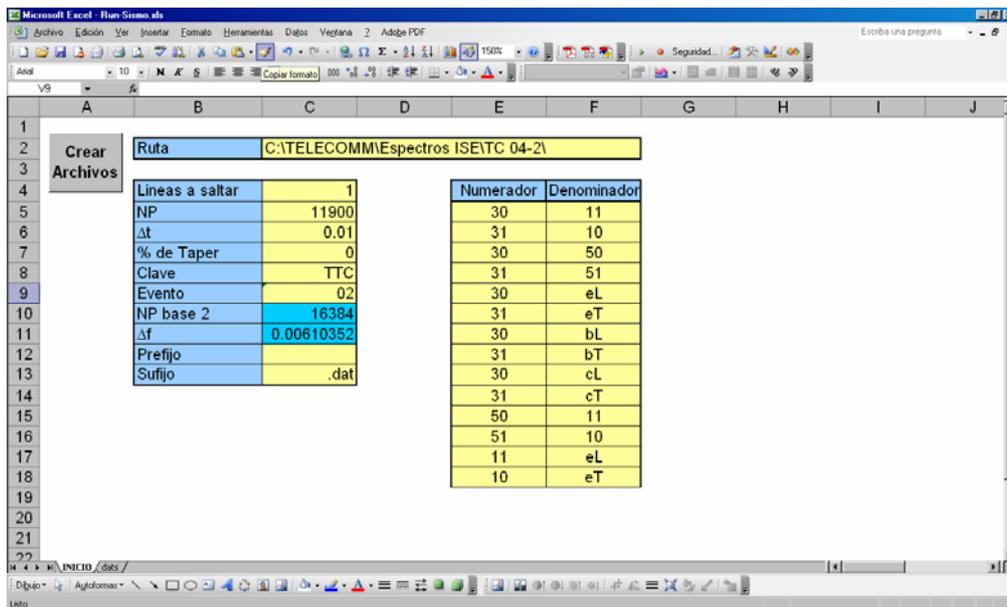


Figura C.1 Macro para la generación de archivos

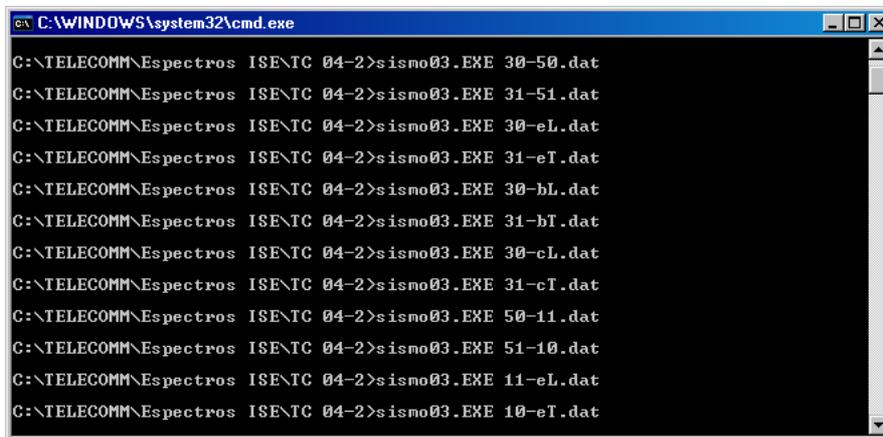


Figura C.2 Programa sismo03 en ejecución

Apéndice D. MEJORAS EN LA HOJA DE CÁLCULO PARA LA VISUALIZACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Para el análisis de la información de espectros y funciones espectrales se han desarrollado herramientas que permiten la graficación y análisis de los resultados (Taborda y Murià-Vila, 2002b). En este trabajo se adaptaron estas macros para su uso con los programas mencionados en el apéndice C. Además se hicieron mejoras correspondientes al trazo de la forma modal.

D.1 Descripción de la hoja de cálculo

Se desarrollaron cuatro versiones de la hoja de cálculo, una para análisis de registros sísmicos que abre archivos de salida del programa AE y otra para análisis de pruebas de VA compatible con los archivos del programa AEpro. Ambas versiones a su vez tienen variantes en cuanto al número de formas modales simultáneas que se grafican. En un caso, generalmente cuando se trata de identificación de frecuencias traslacionales, se grafica la forma modal empleando solamente los sensores en el centro o en uno de los lados de la estructura. La otra opción es graficar las formas modales con la información de los sensores en extremos opuestos, usada para identificar las frecuencias naturales de traslación en uno de los componentes y las frecuencias de torsión.

Para el uso en conjunto de los programas AE y AEpro con las macros de graficación y análisis es conveniente establecer un código para nombrar los archivos de salida en relación con el par de señales analizadas en cada archivo. El nombre del archivo está compuesto por la clave del edificio (tres dígitos) más la clave del evento (dos dígitos); después, separado por la letra “F” la clave de la señal que será numerador en los cocientes. La extensión del archivo es la clave de la señal denominador más la letra “A”. Se puede cambiar la nomenclatura siempre y cuando se conserve la identificación de señales por medio de claves y se ajusten las fórmulas en la hoja “Inicio”.

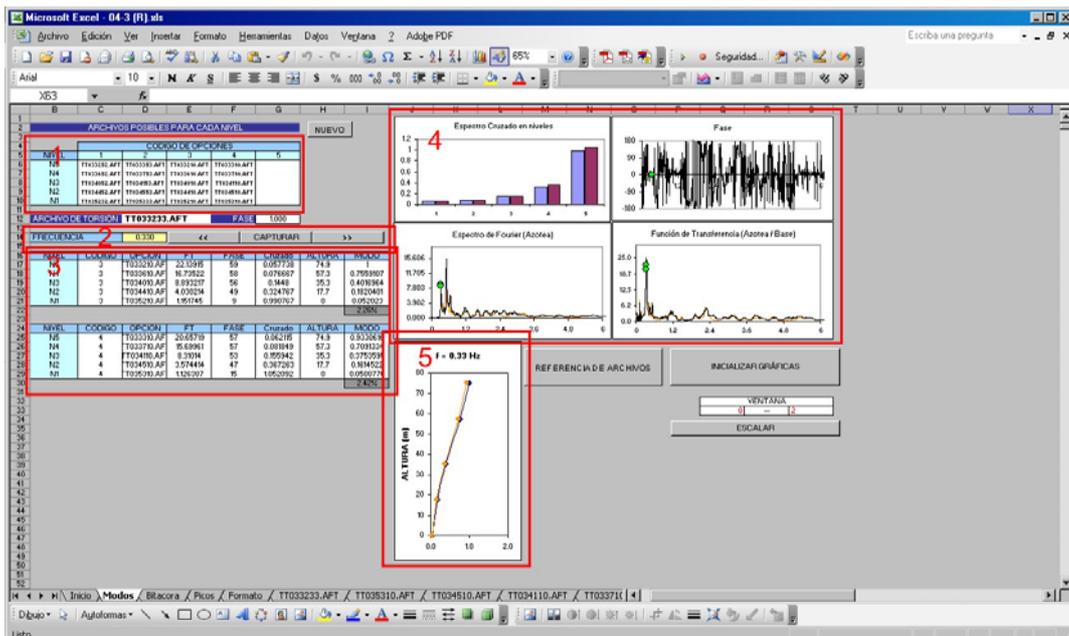


Figura D.1 Hoja de cálculo para analizar los cocientes espectrales

La forma de abrir y graficar los archivos es a base de un plantilla con un formato preestablecido en la hoja “Formato”, los títulos en las gráficas y las leyendas se copian de la hoja “Bitácora”

utilizando las claves de las señales. La principal modificación se hizo en la hoja de "Modos" donde se puede hacer un barrido de frecuencias para visualizar los espectros y funciones espectrales así como y la forma modal correspondiente a la frecuencia en cuestión. En la figura D.1 se muestra una pantalla de esta hoja, donde marcan las diferentes secciones.

En la sección 1 se tabulan las diferentes opciones de archivos, en la sección 2 se escribe la frecuencia que se quiere capturar o bien se usan los controles para capturar la frecuencia anterior o siguiente. Los valores de la función de transferencia, ángulo de fase y espectro cruzado de los cocientes capturados se muestran en las tablas de la sección 3.

En el caso de análisis de registros sísmicos los valores del espectro cruzado en los diferentes cocientes se muestran en la primera gráfica de la sección 4; cuando se trata de análisis de pruebas de VA la gráfica que se presenta corresponde a los valores de coherencia. Otra gráfica que se presenta es el ángulo de fase entre las señales del archivo de torsión.

Como referencia se grafican los espectros de fourier o espectros de potencia de las señales en azotea, dependiendo del tipo de análisis que se trate (sísmico o de VA), también se presenta la función de transferencia entre azotea y terreno. En estas graficas se coloca un indicador que muestra en que parte del los espectros y función de transferencia se encuentra la frecuencia capturada.

D.2 Mejoras en el trazo de la forma modal

Al igual que la identificación de frecuencias, el trazo de la forma modal se automatizó en las hojas de cálculo. A diferencia de la identificación de frecuencias, en el caso de la forma modal se hicieron mejoras en la metodología.

La forma modal se calcula con las amplitudes espectrales de los niveles instrumentados normalizadas con respecto a la azotea, la fase entre el nivel en cuestión y una referencia (puede ser el sótano o el terreno) se usa para determinar la polaridad.

Por lo tanto para el trazo de formas modales se requieren cocientes cuyo denominador es la amplitud espectral de azotea y para la identificación de frecuencias se requieren cocientes donde el denominador es la amplitud del espectro de sótano, o bien de terreno, dependiendo de que registro se tome como excitación de referencia. Para evitar el cálculo de cocientes adicionales se usarán los mismos cocientes de la identificación espectral mediante el siguiente procedimiento:

- Se divide los cocientes [NIVEL/TERR] entre el cociente [AZ/TERR] valuados en la frecuencia para la cual se quiere obtener la forma modal. En el caso que la referencia sea el sótano la división de los cocientes para identificación se hará con respecto a [AZ/SOT].
- De esta forma se tienen ahora cocientes [NIV/AZ], y todas las amplitudes espectrales en los niveles están normalizadas con respecto a la amplitud de la azotea. Con excepción del cociente [TERR/AZ] el cual se obtiene directamente con el inverso del cociente [AZ/TERR]
- La polaridad de las amplitudes normalizadas se obtiene mediante la fase entre las señales en los niveles y la señal de referencia (sótano o terreno). Ángulos de fase cercanos a 0° indican señales en fase y ángulos de fase cercanos a 180° indican señales en fase opuesta.

En el caso de cocientes cuya referencia sea la señal de terreno:

| | | | | | | |
|--|---|---------------|----------------------|---|---|---|
| Cocientes para identificación | } | Dividir entre | $\frac{AZCEN}{TERR}$ | } | Cocientes para el trazo de forma modal | |
| $\frac{AZCEN}{TERR}$ $\frac{N12CEN}{TERR}$ $\frac{N7CEN}{TERR}$ $\frac{N3CEN}{TERR}$ $\frac{SOTCEN}{TERR}$ | | | | | $\frac{AZCEN \cdot TERR}{TERR \cdot AZCEN}$ $\frac{N12CEN \cdot TERR}{TERR \cdot AZCEN}$ $\frac{N7CEN \cdot TERR}{TERR \cdot AZCEN}$ $\frac{N3CEN \cdot TERR}{TERR \cdot AZCEN}$ $\frac{SOTCEN \cdot TERR}{TERR \cdot AZCEN}$ | $\frac{AZCEN}{AZCEN}$ $\frac{N12CEN}{N12CEN}$ $\frac{AZCEN}{N7CEN}$ $\frac{AZCEN}{N3CEN}$ $\frac{AZCEN}{SOTCEN}$ $\frac{AZCEN}{AZCEN}$ |

De esta forma solo se necesita un cociente más, [TERR/AZCEN], para poder trazar la forma modal normalizada con respecto a azotea. En el caso que la referencia sea el sótano la división de los cocientes para identificación se hará con respecto a [AZCEN/SOTCEN].

La forma modal que se obtiene con la metodología anterior corresponde al sistema suelo-estructura. También es posible obtener la forma modal excluyendo alguno de los componentes del movimiento, ya sea traslación, cabeceo o ambos.

La forma usual de obtener formas modales sin alguna componente del movimiento sería restándole, a la amplitud espectral en cada nivel, la amplitud espectral de dichos movimientos; después normalizar con respecto a la azotea menos los mismos movimientos. Para evitar cálculos adicionales se pueden usar los mismos cocientes ya calculados y obtener formas modales sin traslación y/o sin cabeceo de la siguiente forma.

La manera de excluir la traslación, ya sea del terreno [TERR], del sótano [SOTCEN] o la traslación relativa del sótano [SOTCEN-TERR] es la misma, por lo que en el procedimiento se nombrará [TRAS] a la traslación que se desee prescindir en la forma modal.

Cocientes para el trazo de la forma modal sin traslación

$$\frac{AZCEN - TRAS}{AZCEN - TRAS} \quad \frac{(AZCEN - TRAS) / AZCEN}{(AZCEN - TRAS) / AZCEN}$$

$$\frac{N12CEN - TRAS}{AZCEN - TRAS} \quad \frac{(N12CEN - TRAS) / AZCEN}{(AZCEN - TRAS) / AZCEN}$$

$$\frac{N7CEN - TRAS}{AZCEN - TRAS} \quad \frac{(N7CEN - TRAS) / AZCEN}{(AZCEN - TRAS) / AZCEN}$$

$$\frac{N3CEN - TRAS}{AZCEN - TRAS} \quad \frac{(N3CEN - TRAS) / AZCEN}{(AZCEN - TRAS) / AZCEN}$$

$$\frac{SOTCEN - TRAS}{AZCEN - TRAS} \quad \frac{(SOTCEN - TRAS) / AZCEN}{(AZCEN - TRAS) / AZCEN}$$

Cocientes para el trazo de la forma modal sin traslación en términos de los cocientes iniciales

$$\frac{AZCEN}{AZCEN} \frac{TRAS}{AZCEN}$$

$$\frac{N12CEN}{N12CEN} \frac{TRAS}{AZCEN}$$

$$\frac{N7CEN}{AZCEN} \frac{TRAS}{AZCEN}$$

$$\frac{N3CEN}{AZCEN} \frac{TRAS}{AZCEN}$$

$$\frac{SOTCEN}{AZCEN} \frac{TRAS}{AZCEN}$$

Si lo que se busca es prescindir de la contribución del cabeceo de igual forma se puede obtener una forma modal sin este movimiento con los cocientes originales, y la amplitud espectral del giro en la dirección de análisis [θ].

Cocientes para el trazo de la forma modal cabeceo

$$\frac{AZCEN - \theta H_{AZ}}{AZCEN - \theta H_{AZ}}$$

$$\frac{(AZCEN - \theta H_{AZ}) / AZCEN}{(AZCEN - \theta H_{AZ}) / AZCEN}$$

$$\frac{N12CEN - \theta H_{N12}}{AZCEN - \theta H_{AZ}}$$

$$\frac{(N12CEN - \theta H_{N12}) / AZCEN}{(AZCEN - \theta H_{AZ}) / AZCEN}$$

$$\frac{N7CEN - \theta H_{N7}}{AZCEN - \theta H_{AZ}}$$

$$\frac{(N7CEN - \theta H_{N7}) / AZCEN}{(AZCEN - \theta H_{AZ}) / AZCEN}$$

$$\frac{N3CEN - \theta H_{N3}}{AZCEN - \theta H_{AZ}}$$

$$\frac{(N3CEN - \theta H_{N3}) / AZCEN}{(AZCEN - \theta H_{AZ}) / AZCEN}$$

$$\frac{SOTCEN - \theta H_{SOT}}{AZCEN - \theta H_{AZ}}$$

$$\frac{(SOTCEN - \theta H_{SOT}) / AZCEN}{(AZCEN - \theta H_{AZ}) / AZCEN}$$

Cocientes para el trazo de la forma modal sin traslación en términos de los cocientes iniciales

$$\frac{AZCEN}{AZCEN} - \frac{\theta H_{AZ}}{AZCEN}$$

$$\frac{AZCEN}{AZCEN} - \frac{\theta H_{AZ}}{AZCEN}$$

$$\frac{N12CEN}{AZCEN} - \frac{\theta H_{N12}}{AZCEN}$$

$$\frac{AZCEN}{AZCEN} - \frac{\theta H_{AZ}}{AZCEN}$$

$$\frac{N7CEN}{AZCEN} - \frac{\theta H_{N7}}{AZCEN}$$

$$\frac{AZCEN}{AZCEN} - \frac{\theta H_{AZ}}{AZCEN}$$

$$\frac{N3CEN}{AZCEN} - \frac{\theta H_{N3}}{AZCEN}$$

$$\frac{AZCEN}{AZCEN} - \frac{\theta H_{AZ}}{AZCEN}$$

$$\frac{SOTCEN}{AZCEN} - \frac{\theta H_{SOT}}{AZCEN}$$

$$\frac{AZCEN}{AZCEN} - \frac{\theta H_{AZ}}{AZCEN}$$

Existen diferentes formas modales que se pueden construir a partir de los cocientes iniciales. Principalmente en este trabajo se ocupa la forma modal completa con todos los movimientos y la forma modal con base empotrada.

REFERENCIAS

- Alcántara L., Murià-Vila D., Vázquez R., Macías M. A., Almora D., Torres M., Velasco J. M., Castro G., Ayala M., Sandoval H. y Vázquez E. (2004), "Instrumentación Sísmica del edificio TC", Memorias del XIV Congreso de Ingeniería Estructural, Acapulco, Gro., México.
- Arias, A. (1970), "A measure of earthquake intensity in Seismic design for nuclear power plants", R.J. Hansen (ed.), MIT Press, Cambridge, pp. 438-483.
- Avilés J. (2004), "Curso de Interacción suelo-estructura", Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C., México D.F., marzo.
- 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., 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, No. 4, pp. 477-497.
- Correa V.M. (2005), "Respuesta dinámica y efectos de interacción suelo-estructura en tres edificios instrumentados en México", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Correa V.M. y Murià-Vila D. (2005), "Efectos de interacción suelo-estructura de un edificio instrumentado con modos de vibración acoplados", Memorias del XV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Acapulco Gro., México.
- Cruz C. A. (2007), "Procedimiento simplificado para calcular rigideces y amortiguamientos en edificios cimentados con pilotes de fricción", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Cruz C. A., Camargo J., Murià-Vila D., Aldama B.D. (2006a), "Método para calcular las rigideces y amortiguamientos asociados a los efectos de interacción suelo-estructura en construcciones cimentadas con pilotes de fricción", Memorias del XV Congreso de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta Jal., México.
- Cruz C. A., Camargo J., Taborda R. y Murià-Vila D. (2006b), "Extrapola v3.0. Programa para la generación de señales en edificios instrumentados suponiendo un diafragma infinitamente rígido", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Cruz C. A., Camargo J., Taborda R. y Murià-Vila D. (2006c), "Macros para la captura y procesamiento de resultados de señales procesadas espectralmente", Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Dobry, R. y Gazetas, G. (1988). "Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups", *Geotechnique*, vol. 38 no. 4, pp. 557-574.
- Ferretiz J. J. (2007), "Modelos analíticos representativos de un edificio instrumentado cercano a la estación SCT", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Gazetas G. (1991a), "Foundation vibrations" *Foundation Engineering Handbook*, segunda edición, Van Nostrand Reinhold, pp. 553-593.

Gazetas G. (1991b), "Formulas and charts for impedances of surface and embedded foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 117, no. 9, septiembre, pp. 1363-1381.

Gómez A. (2000), "Presentación de un modelo matemático para el cálculo del periodo fundamental de vibración en suelos estratificados con capacidad de predecir efectos de amplificación o atenuación dinámica", XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, noviembre.

Guzmán S., Guzmán I., Murià Vila D., Fernández F (1992). "Diseño e Implementación de Captura y Procesamiento de Señales", Instituto de Ingeniería, UNAM, Proyecto 0707, octubre.

Huerta C. H. (2007), "Método de estimación de parámetros modales de una estructura", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Kausel E. y Ushijima, R. (1979), "Vertical and torsional stiffness of cylindrical footing", Civil Eng. Dept. Report R79-6, MIT, Cambridge, Massachusetts.

Kaynia A.M., Kausel E. (1982), "Dynamic behavior of pile groups", *Memorias de la 2nd International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling*, Austin, Texas, pp. 509-532.

Kobori T., Nakazawa M., Hijikata, K., Kobayashi Y., Miura K., Miyamoto Y., Moroi T. (1991), "Study on dynamics characteristics of a pile group foundation", *Proc. 2nd Intl. Conf. on Recent Advances in Geotechnical, Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis, Missouri, Vol. 1, pp. 853-860.

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.

Luco J. E. (1980), "Soil-structure interaction and identification of structural models", *Proceedings 2nd 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.

Mendoza M. A. y Murià-Vila D. (2006) "Programa de captura y análisis espectral para pruebas dinámicas". Instituto de Ingeniería, UNAM.

Moreno G., Haaz H., Deméneghi A., Sanginés H., Legorreta H. A, López G., Umaña J. L., Sánchez A. A., Aguilar O., Torres B., Elizalde E., López F. (1998), "Dictamen de seguridad estructural conforme al RCDF-93 y sus NTC. Edificio TC. Estudio de mecánica de suelos", Facultad de Ingeniería, UNAM.

Murià Vila D., Alcántara L., Durán R., Macías M.A., Maldonado S.L., Pérez L.E., Tena, A. y Vázquez R. (1997), "Edificios instrumentados", *Macrosismos de Manzanillo*, Editor Arturo Tena

-
- Colunga, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C., Universidad de Colima y Gobierno del Estado de Colima, Colima, Col., México, septiembre, pp. 197-232.
- Murià-Vila D., Alcántara L., Macías M. A., Rodríguez G., Almora D. (2004a), "Estudio de la respuesta dinámica del edificio TC". Primer informe de avance, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Murià-Vila D., Fuentes L., González R. (2000a), "Incertidumbres en la estimación de las frecuencias naturales de vibración de edificios", *Información Tecnológica*, vol. 11, no. 3, Chile, diciembre, pp.177-184.
- Murià-Vila D., González R., Espinosa J. M., León A. (1992), "Análisis de la respuesta en un edificio instrumentado", *Series del Instituto de Ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM, N° 628*
- Murià-Vila D., Macías M. A., Rodríguez G., Soto U. (2000b), "Análisis de los registros sísmicos obtenidos en el edificio PC de 1990 a 1999" *Proy. 0520 Instituto de Ingeniería, UNAM, octubre 2000.*
- Murià-Vila D., Pérez J. H. y Zapata A. (1999), "Programa para calcular la corrección de línea base, transformada rápida de Fourier, función de transferencia, ángulos de fase y coherencias entre dos señales, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Murià-Vila D., Pérez J. H., Zapata A, Cruz C. A. y Camargo J. (2006), "Programa para calcular la corrección de línea base, transformada rápida de Fourier, función de transferencia, ángulos de fase y coherencias entre dos señales, Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Murià-Vila D. y Rodríguez G. (2002), "Análisis de los registros sísmicos obtenidos de 1993 a 1998 en el edificio JAL", *Series del Instituto de Ingeniería, Instituto de Ingeniería, UNAM, N° 541.*
- Murià-Vila D., Rodríguez G., Zapata A. y Toro A.M. (2001), "Seismic response of a twice-retrofitted building", *ISET Journal of Earthquake Technology, India, Vol. 38, N° 2-4, pp. 67-92.*
- Murià-Vila D., Taborda R., Zapata A. (2004b), "Soil-structure interaction effects in two instrumented tall buildings" *Memorias de la 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canadá, agosto 1-6, 2004.*
- Nakamura, Y. (1989), "A Method For Dynamic Characteristics Estimation of Surface Using Microtremor On The Ground Surface", *Quarterly Report of Railway Tech Res. Inst. 30, 25-33.*
- Novak, M. y Aboul-Ella, F. (1978), "Impedance functions of piles in layered media," *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 104, No EM6, Proc. Paper 13847, junio, pp. 643-661.*
- Novak M., Beredugo Y. O. (1972), "Vertical vibration of embedded footings", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division , ASCE , No. SM12, diciembre, pp. 1291-1310.*
- Novak M., Howell J.F. (1978), "Dynamic response of pile foundations in torsion", *Journal of the Geotechnical and Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. GT5, pp. 271-285.*
- Novak M., Sheta M., El-Hifnawi L., El-Marsafawi H., El-Naggar H., Ramadan O., El-Sawy K. (1995), *Dyna5 para Windows 95, Geotechnical Research Centre, University of Western Ontario.*
- Novak, M., y El Sharnouby B. (1984), "Evaluation of dynamics experiments on pile groups", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 110, N° 6, junio.*
- NTCDS-RCDF (2004), *Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, México D.F.*
- Ovando E. (1986), "Trabajos de exploración geotécnica en el edificio TC". Instituto de Ingeniería, UNAM.

Ovando E. (2000), "Trabajos de exploración geotécnica en las instalaciones SCT". TGC Geotécnica.

Ovando E., Romo M. P., Contreras y Giralt A. (2003), "Effects on soil properties of future settlements in downtown Mexico City due to water extraction", *Geofísica Internacional*, Vol. 42, No. 2, pp. 185-204.

Ovando E. (2004), "Trabajos de exploración geotécnica en el edificio TC". Proy. 67L. Instituto de Ingeniería, UNAM, septiembre 2004.

Palacios C. (2003), "Estimación de los parámetros dinámicos del edificio PC", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.

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.

Poulos H. y Davies E.H. (1980), "Pile foundations analysis and design", John Wiley and Sons, 397 pp.

Roësset, J. M. (2003), "Interacción suelo estructura un estado del arte", SMIS, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León Guanajuato.

Taborda R. (2003), "Respuesta dinámica y efectos de interacción suelo-estructura de un edificio instrumentado en Acapulco", Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Taborda R. y Murià-Vila D. (2002a), "Extrapola. Programa para la generación de señales en edificios instrumentados suponiendo un diafragma infinitamente rígido", Instituto de Ingeniería, UNAM.

Taborda R. y Murià-Vila D. (2002b), "Macros para la captura y procesamiento de resultados de señales procesadas espectralmente", Instituto de Ingeniería, UNAM.

Thomson W. T. (1998), "Theory of vibration with applications", Prentice Hall, New Jersey.

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.

Trifunac M. D. (1972), "Comparisons between ambient and forced vibration experiments", *Earthquake and Structural Dynamics*, Vol. 1, pp. 133-150.

Trigos J. L. (1998), "Dictamen de seguridad estructural conforme al RCDF-93 y sus NTC. Edificio TC.", Facultad de Ingeniería, UNAM.

Wolf, J.P. y von Arx, G.A. (1982), "Impedance functions of a group of vertical piles", *Proceedings ASCE Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Pasadena, California, vol. 2, pp. 1024-1041.

Zapata A. (2001), "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", *Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Morelia, México.

Zapata A. y Murià-Vila D. (2003), "Subrutina para el cálculo de la coherencia", Instituto de Ingeniería, UNAM.