

Capítulo 6

Integración y Análisis de Resultados

Laboratorio de Ingeniería Sísmica, INII-UCR

6.1 INTRODUCCION

El objetivo principal de este capítulo es el de resumir e integrar toda la información presentada en los capítulos anteriores, tratando de identificar zonas de comportamiento geomecánico similar, de acuerdo con las características de los suelos presentes en el área de estudio (espesor de los estratos, caracterización de los parámetros dinámicos de acuerdo con resultados de las pruebas geofísicas, clasificación según el tipo de geología existente, etc.). Además, se presentan espectros de respuesta característicos considerando las condiciones propias de la zona en estudio.

Lo anterior será especialmente útil para establecer recomendaciones específicas en el diseño y construcción de edificaciones, ya que el comportamiento dinámico de éstas depende en gran medida de la respuesta del suelo ante excitaciones debidas a sismos.

Primeramente, se presenta un resumen de todos los resultados y luego se retoman los mapas de espesor de suelo y de isoperiodos para su comparación y discusión. Con base en lo anterior, se presenta un mapa con una zonificación basada en la consideración de dos aspectos: tipo de geología superficial existente y espesores de los estratos. Considerando el hecho de que los suelos menos consolidados y de mayor espesor son los que modifican en mayor medida las ondas sísmicas (filtrado de frecuencias altas y mayor amplificación), se identifica la zona de mayor amenaza al fenómeno de amplificación dinámica y se hacen comentarios acerca de la vulnerabilidad de la región, considerando los tipos de estructuras que predominan y las tendencias de crecimiento de población que se han dado en la zona desde 1976 hasta 1999. Finalmente, se presentan espectros normalizados de respuesta y se comparan con las normativas de diseño vigentes para Costa Rica.

6.2 COMPARACION DE RESULTADOS

En la Tabla VI-1 se muestra la comparación de todos los resultados de los análisis de efectos de sitio evaluados a partir de las diferentes técnicas: razones espectrales empíricas (Capítulo 4) y razones espectrales modeladas (Capítulo 5).

Puede observarse en la mayoría de los casos una concordancia entre los resultados, aún en sitios singulares como Sabana. Es importante destacar que el rango de valores de periodo que se pudieron medir y modelar en la zona de estudio, hace pensar que el tipo de suelo es más bien firme, en comparación con otras regiones del mundo donde se han realizado estudios semejantes, como es el caso de la Ciudad de México donde el periodo es de hasta 4.0 segundos.

Tabla VI-1. Comparación de los periodos fundamentales usando las técnicas: razones espectrales modeladas y razones espectrales empíricas.

Estación	Razones espectrales modeladas				Razones espectrales empíricas			
	PGA < 0,15 g		PGA > 0,15 g		Resultados con instrumentos			Mapa de isoperíodos
	SASW	R. Sísmica	SASW	R. Sísmica	Ruido	S/Rock	H/V	
ROH	0,37 – 0,45	0,28 – 0,32	0,45 – 0,70	0,33 – 0,55	0,25	0,33	0,83	0,18 a 0,28
FIR	0,37 – 0,47	-----	0,45 – 0,80	-----	0,25	0,33	0,25, 0,8	0,28 a 0,38
HAT	0,30 – 0,35	0,42 – 0,55	0,35 – 0,51	0,55 – 0,83	0,35 a 0,4	0,30	0,55	0,28 a 0,38
LPF	-----	-----	-----	-----	0,30	0,30	0,33	0,28 a 0,38
DES	0,25 – 0,28	-----	0,28 – 0,45	-----	0,30	1,0, 0,3	0,25	0,18 a 0,28
CAR/Nap, Q	0,38 – 0,45	-----	0,44 – 0,67	-----	0,3 a 0,5	0,3	0,60	0,28 a 0,38
Ribera	-----	0,33 – 0,50	-----	0,47 – 0,77	-----	-----	-----	0,28 a 0,38
Hospital	0,27 – 0,30	-----	0,30 – 0,46	-----	-----	-----	-----	0,18 a 0,28
P, Nacional	0,27 – 0,30	-----	0,30 – 0,45	-----	-----	-----	-----	0,28 a 0,38
UCR/Deport	-----	0,26 – 0,30	-----	0,31 – 0,51	-----	-----	-----	0,28 a 0,38
Gravilias	-----	0,42 – 0,55	-----	0,52 – 0,82	-----	-----	-----	0,28 a 0,38
Curridabat	-----	0,62 – 1,20	-----	1,10 – 1,80	-----	-----	-----	0,28 a 0,38
Sabana	-----	0,67 – 1,20	-----	1,20 – 2,00	-----	-----	-----	0,44 o mayor

Notas:

Periodos predominantes en segundos

Número subrayado: promedio leído de las funciones de transferencia mostradas en las Figs V-6, V-7, V-8 y V-9.

El Área Metropolitana de San José y alrededores presenta un rango de periodos entre 0,2 y 0,6 s. La tendencia es que los periodos sean mayores en la zona central y noreste, y menores hacia el oeste y sur. Se observa un punto singular en la zona de la Sabana (hacia el centro del área de estudio, específicamente en el Parque Metropolitano de la Sabana), donde se midieron velocidades de onda cortante menores que 100 m/s en espesores de más de 10 metros. El origen de esta singularidad parece ser la existencia de un lago en el pasado, cuyos depósitos lacustres son los que forman el suelo actual en el Parque Metropolitano.

6.3 MAPA DE ESPESORES DE SUELOS E ISOPERIODOS

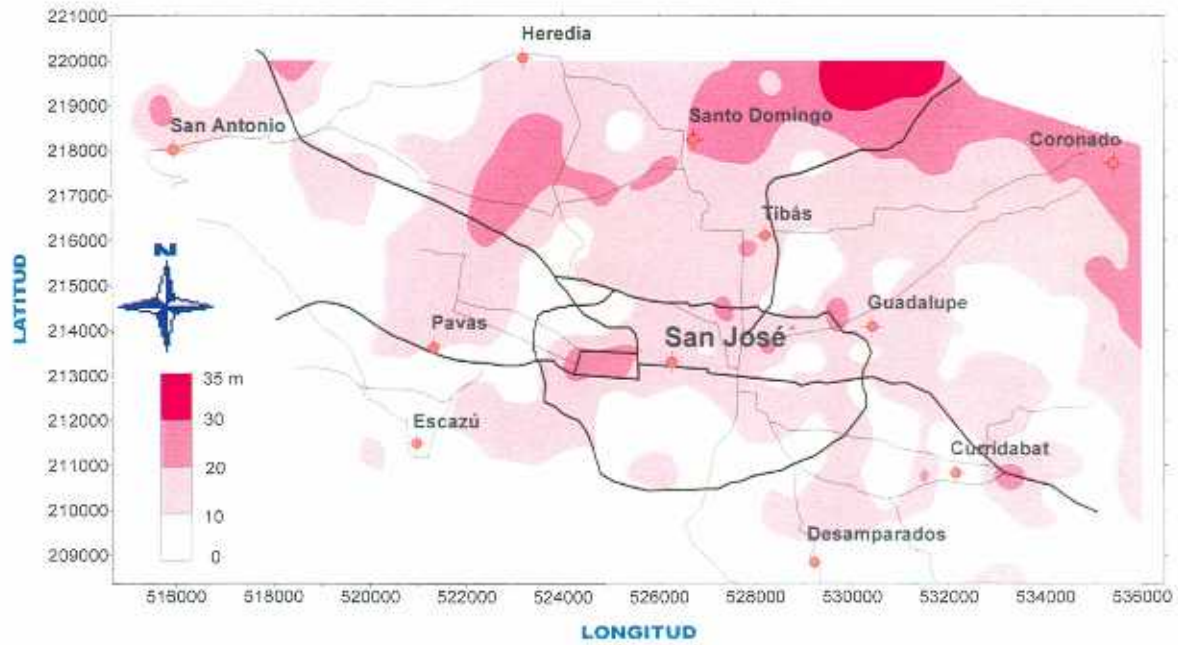
La Figura VI-1 muestra el mapa de espesores de suelo y el de isoperiodos obtenido con mediciones de ruido según el procedimiento descrito en el Capítulo 4. De acuerdo con estos mapas se puede observar una gran concordancia en el hecho de que las zonas con mayor periodo fundamental, ubicadas al noreste de la zona en estudio (Fig. VI-1b) coinciden con las zonas de mayores espesores de sedimentos (Fig. VI-1a), lo que parece validar los resultados presentados en el mapa de isoperiodos. De igual forma, existe la tendencia a que los periodos predominantes disminuyan hacia el sur, oeste y suroeste, lo que coincide bastante bien con el hecho de que los espesores de suelo disminuyen en esas direcciones, además de que hacia el suroeste afloran suelos más rígidos debido a la presencia de los cerros de Escazú.

Es importante destacar además que en los sitios de La Sabana (coordenadas Lambert 525000, 213000) y Curridabat (533000, 213000), se observan tanto periodos largos (relativamente) como espesores importantes de suelo (entre 20 y 30 m) (Climent y Bolaños, 1999) por lo que ambos mapas presentan consistencias tanto en las tendencias como en la evidencia de sitios con características particulares respecto al resto de la región en estudio, como lo son La Sabana y Curridabat. Debe recalarse que el rango de periodos obtenido mediante la aplicación de las distintas técnicas no es muy amplio (0,1 a 0,6s aproximadamente) con excepción de sitios específicos como los mencionados anteriormente.

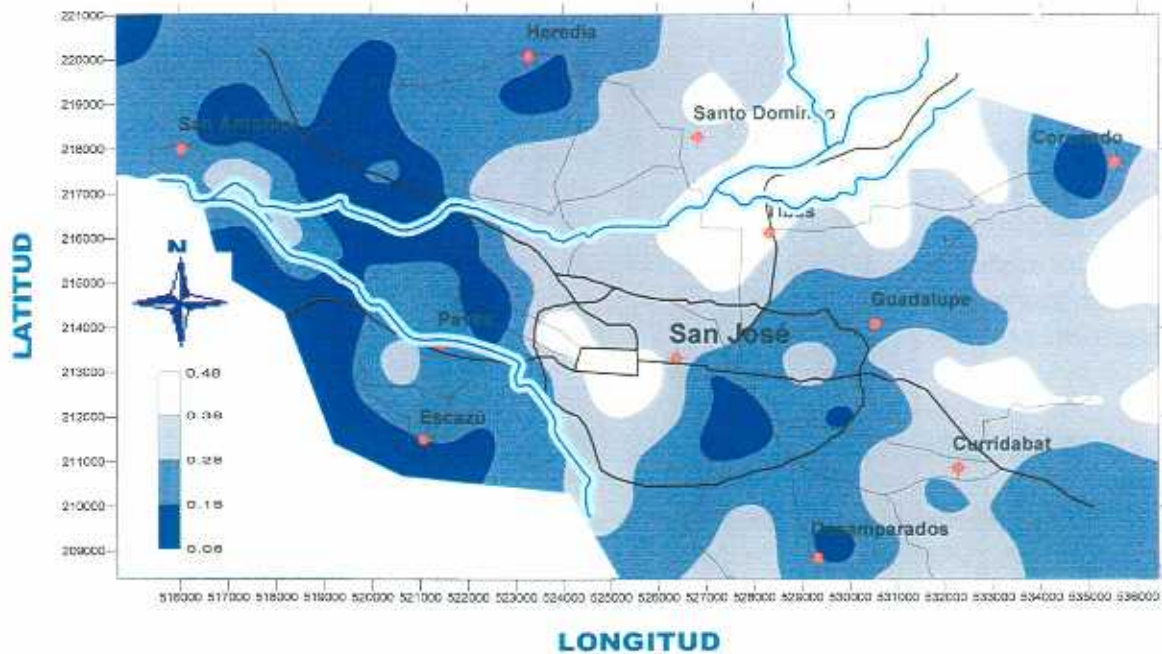
6.4 ZONIFICACION DINAMICA DEL AREA METROPOLITANA

De acuerdo con las características dinámicas de los suelos, determinadas con base en las investigaciones descritas en los capítulos anteriores (Tabla VI-1 y Fig. VI-1), se propone que el área de estudio sea zonificada de acuerdo con la Figura VI-2. En ésta se agrupan áreas con suelos de comportamiento dinámico similar. Para llegar a este resultado se consideró la información contenida en el mapa geológico (Fig. III-1), el de espesores de materiales no consolidados (Fig. III-3) y el mapa de isoperiodos predominantes de suelos (Fig. IV-12).

Microzonificación Sísmica del Área Metropolitana de San José



(a) Mapa de espesores de suelo en el Área Metropolitana de San José



(b) Mapa de isoperíodos del suelo en el Área Metropolitana de San José, obtenido a partir de mediciones de vibraciones ambientales.

Fig. VI-1 Comparación entre el mapa de espesores de suelo y el de isoperíodos.

La Figura VI-2 muestra un mapa de zonificación de los suelos según sus características geológicas y su comportamiento dinámico. Se definen tres zonas considerando que las tobas soldadas o ignimbritas del Cuaternario, así como las lavas con tobas asociadas son las que dan origen a los suelos más firmes, mientras que los lahares y cenizas son las que forman los suelos menos firmes de la zona.

Adicionalmente, cuando se observó que los espesores de suelo menos firmes eran menores a 10 metros, el suelo fue considerado también como firme. Con base en lo anterior se distinguen las siguientes zonas: a) Zona 1, que pertenece al tipo de suelo poco firme y en la cual se encontraron los valores de periodo más altos (Fig. VI-1b), entre 0,35 y 0,48 s. Aún cuando el tipo de geología corresponde a tobas soldadas, éste se relaciona con el tipo de formaciones debidas a depósitos de avalancha ardiente y ocasiona que al menos en esa zona los suelos estén poco consolidados y den como resultado periodos naturales más altos que en el resto de la zona analizada. b) Zona 2, en la cual los valores del periodo predominante están entre 0,25 y 0,40 s, zona con un comportamiento más firme que la anterior. c) Zona 3, que es la zona de espesores y periodos menores variando entre los 0,08 y los 0,25 s con un comportamiento que se puede considerar como de suelo firme, con poco efecto de amplificación.

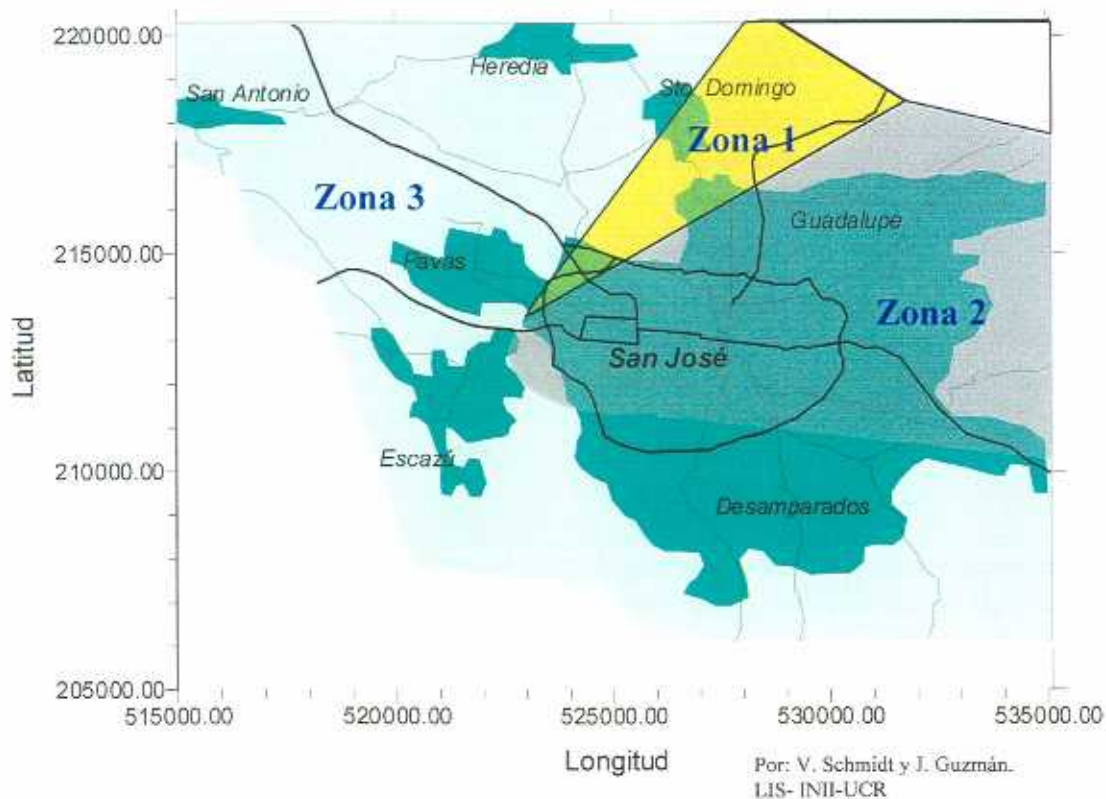


Fig. VI-2 Mapa de zonificación según suelos con comportamiento dinámico similar. Las zonas sombreadas corresponden a los suelos menos consolidados con periodos de vibración altos, mientras que la zona no sombreada corresponde a los suelos firmes con periodos de vibración bajos.

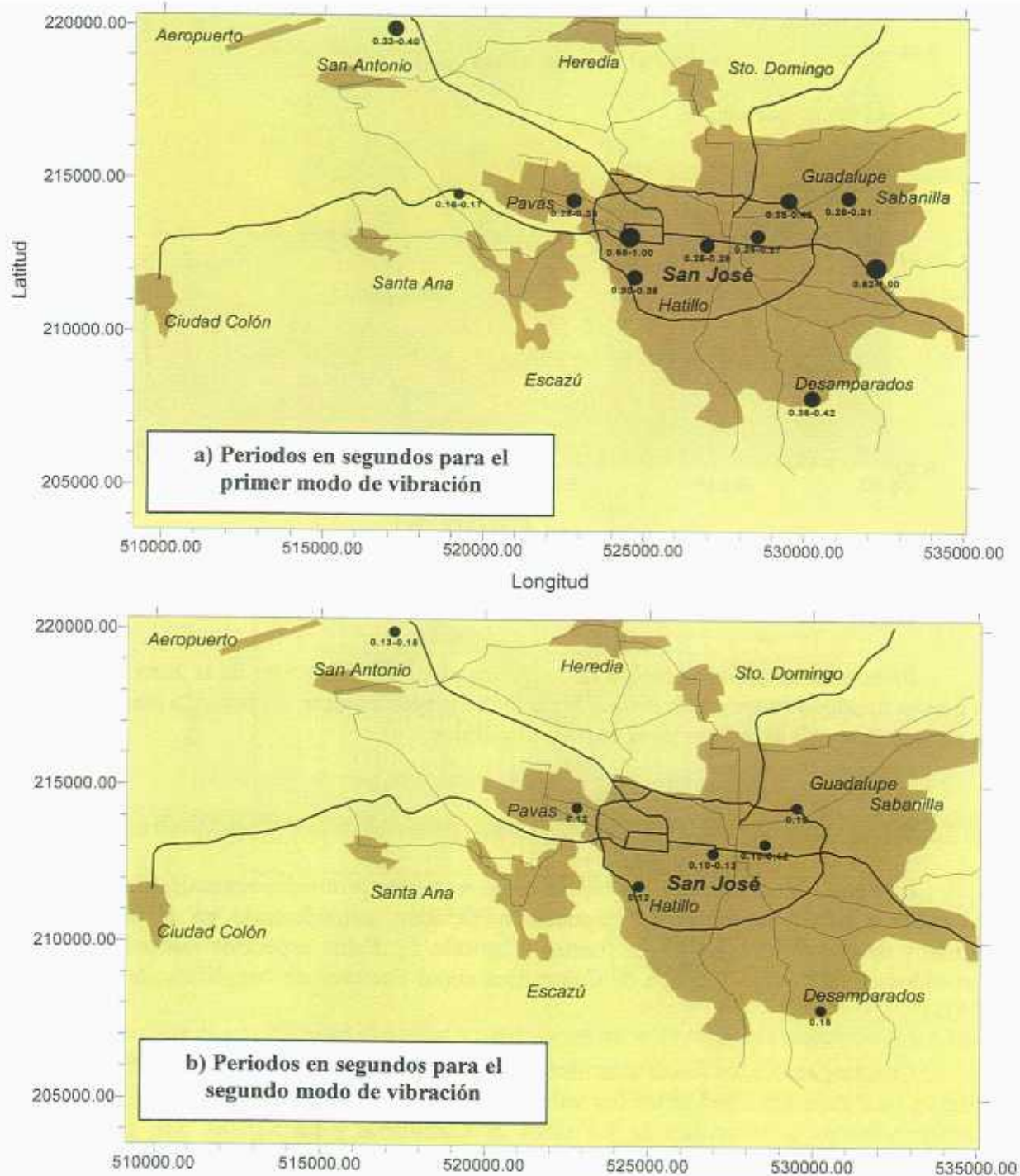
Se observa entonces que la zona central, norte y noreste de San José se ubica sobre los suelos menos consolidados del área en estudio, donde los periodos predominantes del suelo son los mayores, entre 0,25 y 1,0 s. Además, en esta zona también se observan periodos correspondientes a un segundo modo con un valor cercano a 0,1 s (Figs. V-6 y V-7) y que presentan amplificaciones importantes, por lo que deben ser tomados en cuenta al diseñar estructuras.

Lo anterior puede ser visto claramente en las Figuras. VI-3a y VI-3b, donde se presentan mapas con los rangos de periodos correspondientes al primer y segundo modos de vibración, respectivamente. En el área donde los suelos son más firmes, el periodo fundamental se da entre 0,1 y 0,2 segundos, que es común en suelos firmes (Nadim, 1999). Nótese que los valores de periodo fundamental en las zonas de suelos más consolidados coinciden bastante bien con los periodos correspondientes a los segundos modos de vibración de las zonas de suelos menos consolidados.

La Figura VI-4 muestra un mapa de tendencias de crecimiento poblacional, o sea, zonas hacia donde se ha dado el crecimiento urbano en épocas recientes (Porras, 1998). Se observa un claro crecimiento hacia el este y oeste de la ciudad, en algunos casos en concordancia con las zonas de suelos menos consolidados, como es el caso del este de la ciudad.

Sin embargo, el tipo de estructuras que se construyen en esa región son de uno y dos pisos, más bien rígidas. La tendencia de crecimiento este-oeste, coincide con el eje más largo del Valle Central y donde aún quedan grandes espacios libres, ya que hacia el norte y sur se tiene la barrera natural de los montes de la Cordillera Volcánica Central y de Talamanca, respectivamente.

En el Area Metropolitana de San José predominan estructuras más bien rígidas de uno a tres pisos, construidas de mampostería y concreto reforzado (viviendas y edificios comerciales, así como bodegas), cuyos periodos fundamentales se estiman entre 0,1 y 0,3 segundos, que son similares a los encontrados en este estudio. Los edificios altos existentes (entre 10 y 15 pisos) cuyo periodo fundamental es de 1s o superior, verán poco amplificada su respuesta ya que los periodos predominantes del suelo son bastante inferiores a estos valores. Sin embargo, varios tipos estructurales (de 1 a 10 niveles, aproximadamente) ubicados en las cercanías del Parque Metropolitano de La Sabana y del Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos en Curridabat, tienen periodos de vibración similares a los suelos de esos sitios.



Por: R. Salas, Rev. V. Schmidt.
LIS- INII-UCR

Fig.VI-3. Rangos de periodos correspondientes al primer (a) y segundo (b) modos de vibración, obtenidos a partir de modelos para el Área Metropolitana de San José.

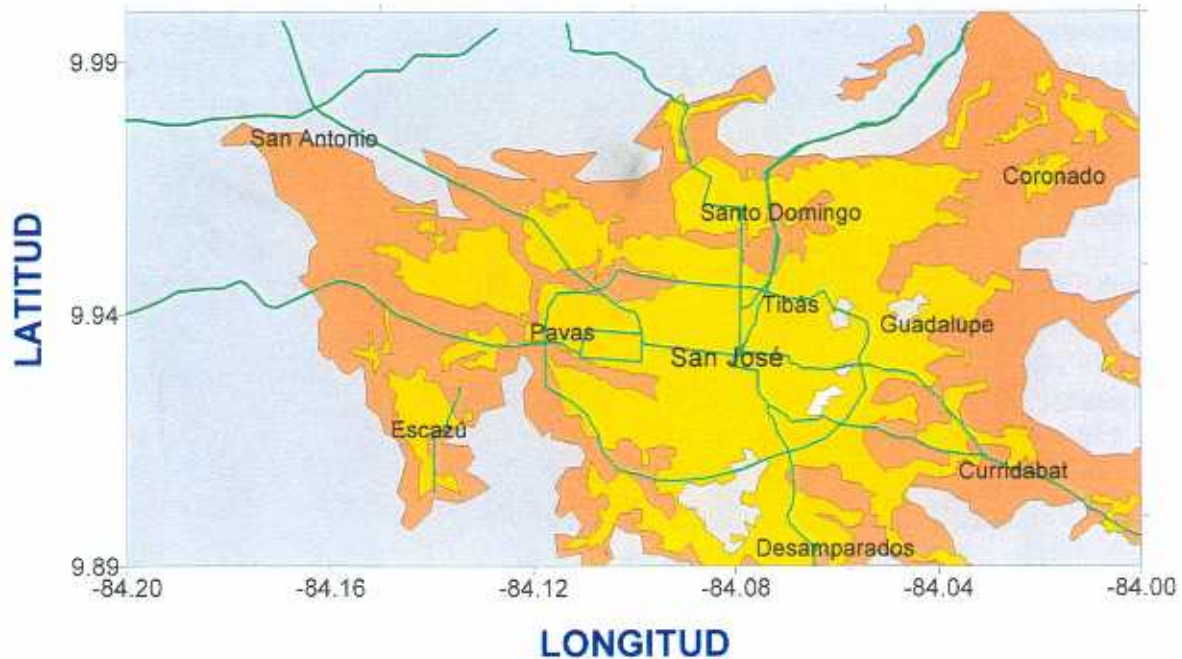


Fig.VI-4. Mapa de crecimiento urbano en la zona en estudio en el periodo de 1976 (amarillo) a 1996 (anaranjado).

Es necesario realizar pruebas de geofísica en el sector noreste de la zona de estudio, ya que es donde los suelos son menos firmes y de mayor espesor, de acuerdo con los mapas de isoperíodos y de espesores de suelos ya discutidos.

6.5 ESPECTROS DE RESPUESTA PARA EL ÁREA METROPOLITANA

La Figura VI-5 muestra los espectros de respuesta promedio normalizados por sitio, obtenidos a partir de espectros de respuesta modelados, considerando en el análisis tres registros de sismos débiles y tres fuertes (Capítulo 5). Estos espectros normalizados son conocidos en el Código Sísmico de Costa Rica como Factores de Amplificación Dinámica (FAD).

Con respecto a los resultados obtenidos a partir de los registros sísmicos débiles, se observa una gran similitud entre los valores, tanto en los de FAD como en los periodos correspondientes, a excepción de los sitios de Curridabat y La Sabana que, como se ha dicho anteriormente, representan sitios particulares dentro de la zona en estudio. En estos dos casos se observa un valor de máxima amplificación (máximo FAD) ligeramente menor que para el resto de los sitios, aunque los periodos correspondientes a estos máximos sí son claramente mayores. Además, a partir de 0,4 s las amplificaciones en estos dos sitios son bastante mayores que en el resto de los sitios analizados. Lo anterior justifica una vez más que los sitios específicos de medición de La Sabana y Curridabat son los sitios con suelos menos consolidados dentro de la zona en estudio, junto con el área noreste, para la que no se cuenta aún con pruebas de geofísica.

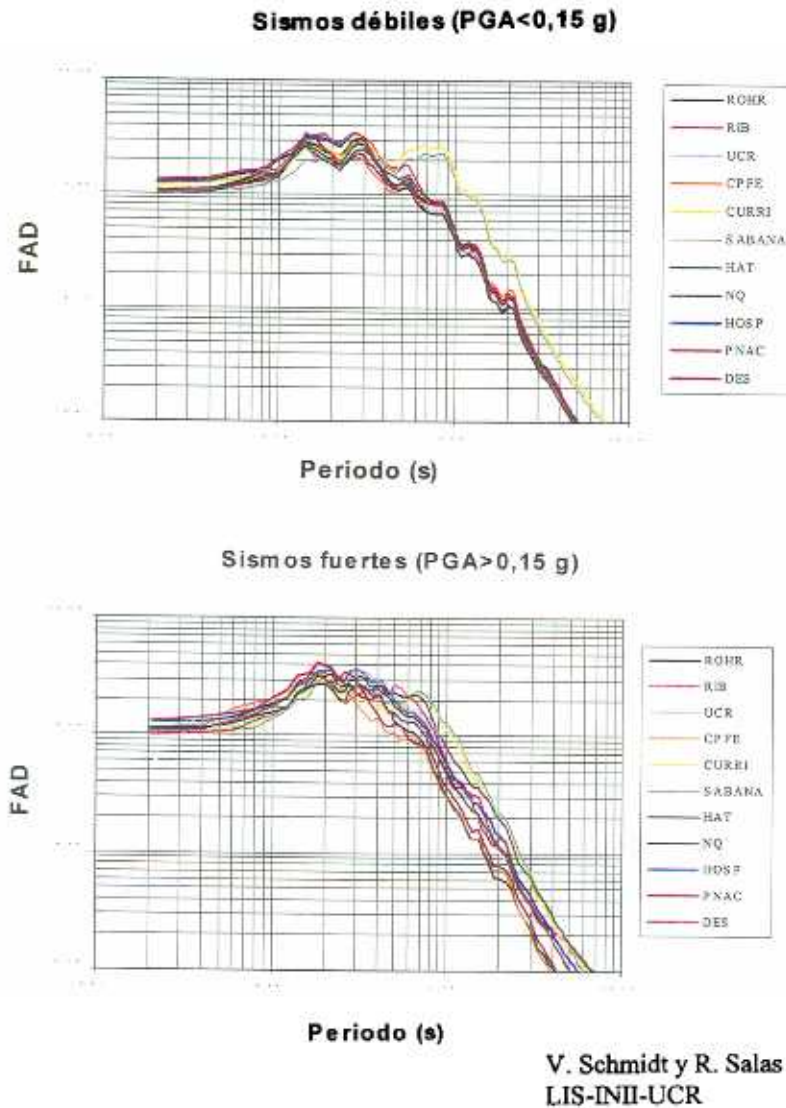


Fig VI-5. Factores de amplificación obtenidos a partir de espectros de respuesta modelados, para los 11 sitios considerados, para el 5% de amortiguamiento.

Según los resultados obtenidos con el uso de registros sísmicos fuertes, aún cuando la tendencia que siguen los espectros es semejante, existen más diferencias entre los resultados obtenidos para cada sitio que en el caso anterior. Sin embargo, para este caso los sitios de Curridabat y La Sabana no se diferencian tanto del resto, aunque siguen siendo los que presentan máximas amplificaciones en un rango de periodos mas amplio.

La Figura VI-6 muestra el espectro de respuesta promedio para la zona en estudio. Se consideró conveniente generalizar en uno solo ya que las diferencias entre los tipos de respuesta encontrados en la zona en estudio, no son realmente significativas, aunque como se anotó anteriormente, físicamente puede hacerse una pequeña diferenciación según los

tipos de suelo existentes y su espesor. El espectro suavizado se obtuvo considerando el promedio de todos los sitios para sismos débiles y fuertes. Además, se graficaron los promedios por sitio según el contenido frecuencial de las señales utilizadas para el modelado y se observa que en todos los casos la tendencia es la misma. Puede observarse que el factor de amplificación dinámica máxima es de 2,5, para periodos entre 0,15 y 0,4 s. Como se trabaja con promedios totales, es obvio esperar que los pocos sitios que presentan singularidades (Curridabat y La Sabana) tengan una débil influencia en el resultado final, por lo que se recomienda para estos sitios considerar los factores de amplificación observados en la Figura VI-7.

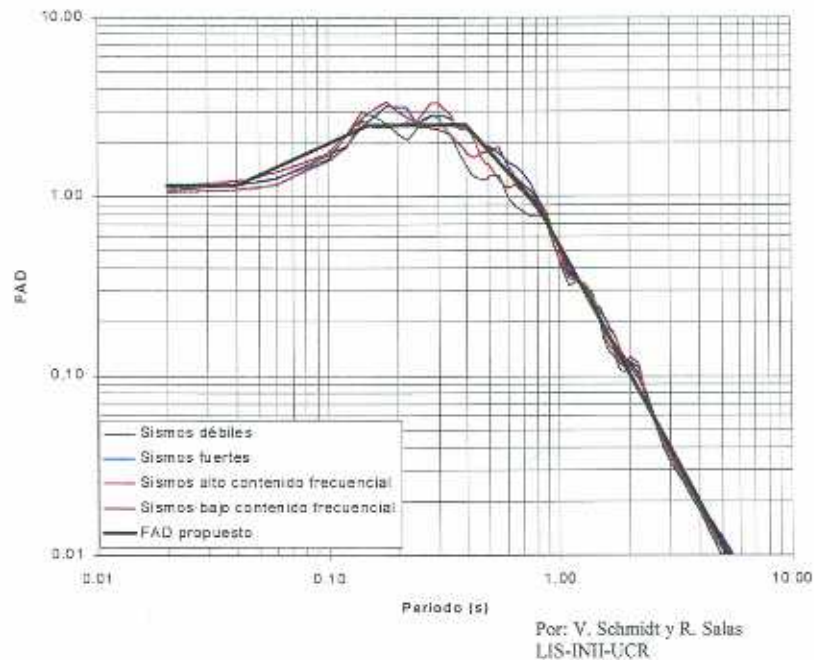


Fig. VI-6. Espectro de respuesta propuesto (línea negra) para el área metropolitana a partir de métodos analíticos, para el 5% de amortiguamiento.

En la Figura VI-8 se presentan juntos los espectros de respuesta, para condición de suelo y de roca que han sido desarrollados en este proyecto y que caracterizan y resumen el comportamiento dinámico en el Área Metropolitana de San José, según las estimaciones realizadas.

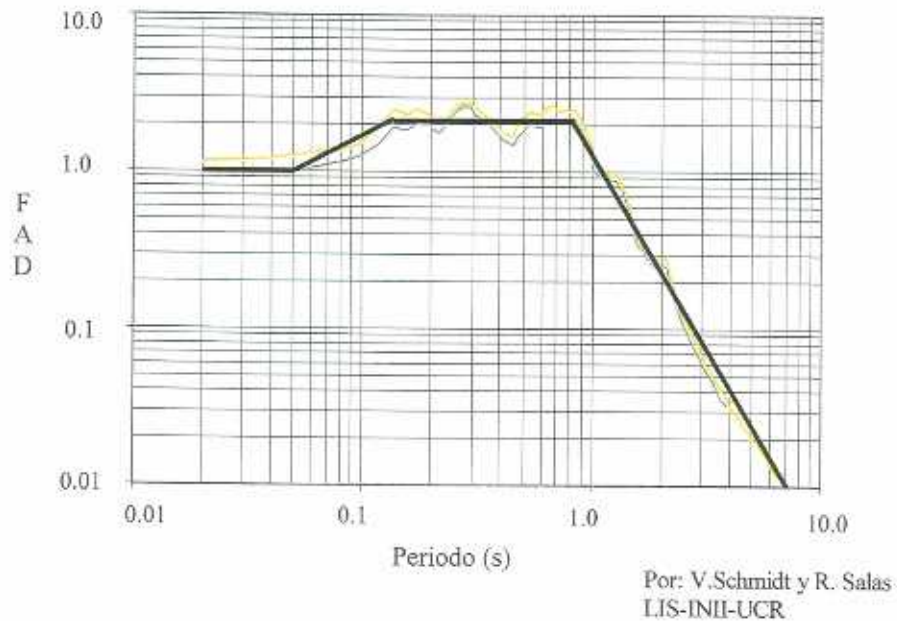


Fig VI-7. Espectro de respuesta propuesto para los sitios puntuales de La Sabana y de Curridabat (alrededores del CFIA) a partir de métodos analíticos para el 5% de amortiguamiento.

El espectro para condición de suelo fue obtenido utilizando registros de movimiento fuerte y débil de sismos y realizando estimaciones numéricas con el programa SHAKE y en el caso del espectro para condición de roca, con base en el análisis probabilístico de amenaza, que permite obtener espectros de respuesta de amenaza uniforme.

En el caso del espectro de respuesta obtenido para la condición de suelo, por medio del uso del programa SHAKE, la experiencia ha mostrado que éste puede subestimar el movimiento en la superficie en periodos sobre 1,0 a 2,0 segundos, ya que no considera el efecto de las ondas superficiales. Además, el algoritmo de cálculo se basa en la consideración que los movimiento horizontales del suelo consisten en ondas de corte que se propagan verticalmente (Nadim, 1999). En este sentido y para efectos de uso ingenieril, el decaimiento de la forma espectral para periodos mayores a 1,0 s puede ser ajustado con base en la curva de amenaza uniforme.

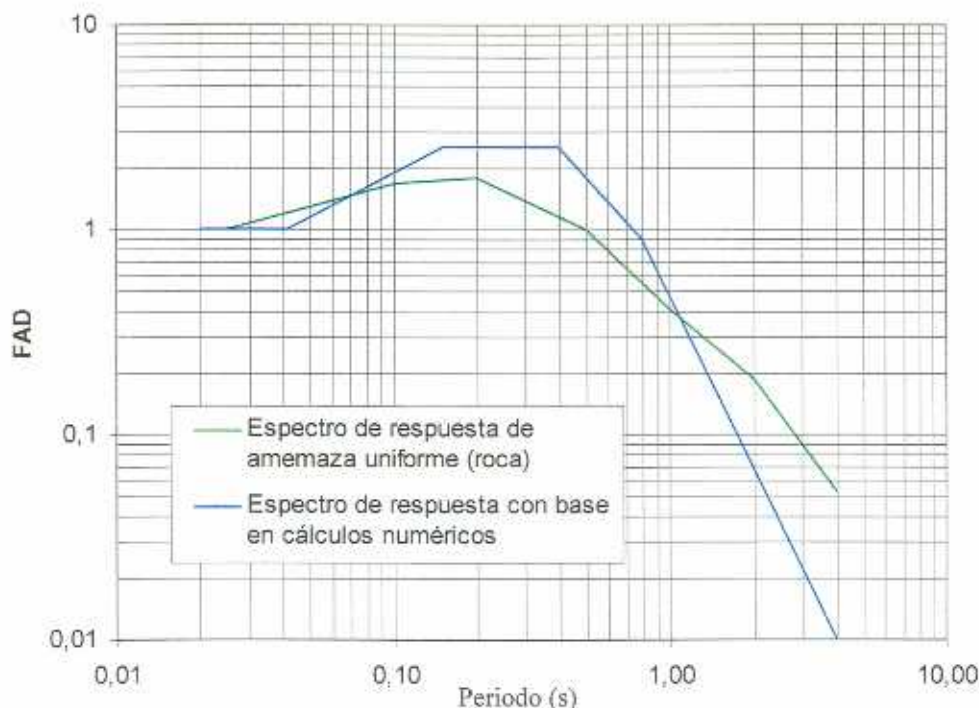


Fig. VI-8. Espectros de respuesta característicos para condición de roca (verde) y suelo (azul) en el Área Metropolitana de San José.

En la Figura VI-9 se compara el espectro de respuesta mayor obtenido en este estudio con los recomendados por el Código Sísmico de Costa Rica (CSCR) para suelos clasificados como blandos. Esta comparación es meramente ilustrativa ya que los espectros obtenidos son elásticos, mientras que los propuestos por el Código son del tipo inelástico. Se observa que los valores máximos de FAD del espectro obtenido son bastante semejantes a los de estructuras tipo 5 (que muestra los valores máximos de amplificación), que según el CSCR corresponden a estructuras de una planta y afines, tales como tanques elevados o chimeneas, que resisten fuerzas sísmicas con una o varias columnas que actúan esencialmente como voladizos aislados, libres o articulados en su extremo superior y empotrados en la base, entre otros (CFIA, 1986). Es importante destacar que el rango de periodos correspondiente al máximo FAD es más angosto para el caso del espectro obtenido (de 0,15 a 0,4 s) que para el presentado por el CSCR (0,125 a 0,6 s), por lo que, de acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, son menos los tipos estructurales que verán amplificada su respuesta en comparación con lo indicado por el CSCR. Sin embargo, si se le agrega la respuesta de los sitios Curridabat y Sabana (Fig. VI-7) se llega a resultados muy similares. Además, tal y como se dijo anteriormente, la forma espectral para periodos mayores a 1,0 s puede ser cambiada con base en el espectro de amenaza uniforme. Si se hace esto, se puede decir, de manera general, que la forma de los espectros utilizados en el Código y la observada a partir de las mediciones y cálculos tienen cierta coincidencia.

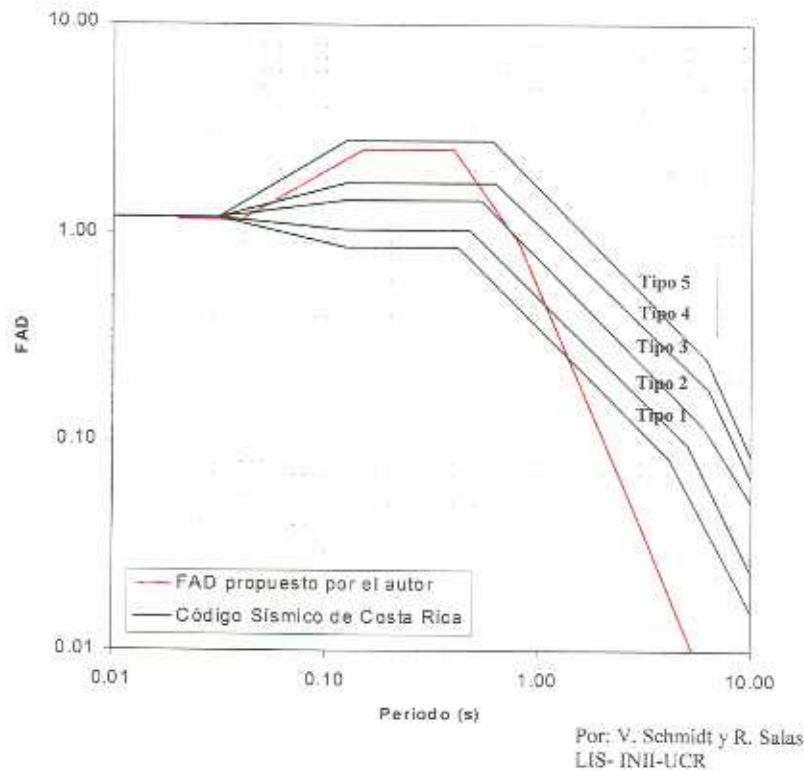


Fig. VI-9. Comparación del espectro de respuesta máximo calculado por métodos analíticos (línea roja), con los presentados en el Código Sísmico de Costa Rica para suelo blando.

Finalmente, en la figura VI-10 se comparan los espectros obtenidos en este estudio para suelo, calculados a partir de distintas metodologías: estudio de amenaza uniforme y estimación según métodos analíticos (programa Shake). Estos resultados se comparan además en el mismo gráfico con los espectros de respuesta calculados a partir de registros acelerográficos obtenidos en las estaciones HTO (Hatillo) y ECA (Paseo Colón, San José) ambas pertenecientes a la red de acelerógrafos permanente del LIS. Se consideraron registros de sismos representativos con un rango de aceleraciones pico entre 1% y 17.5% de g, así como magnitudes entre 4 y 6. Se seleccionaron las estaciones HTO (acelerógrafo analógico SMA-1 Kinematics instalado en 1985, con 20 registros hasta la fecha) y ECA (digital SSA-2 Kinematics instalado en 1993, con 56 registros hasta hoy, en su mayoría débiles), debido a que se encuentran dentro del área de estudio, específicamente en las zonas 3 y 2 ya descritas, respectivamente.

Se puede observar que en términos generales, el espectro obtenido por métodos analíticos resulta ser un buen promedio respecto a los espectros de HTO y ECA hasta 0,4s de periodo, y el calculado a partir del estudio de amenaza es mas bien un límite inferior. Desde este valor y hasta 2,0s (zona donde los espectros decrecen), ambos se acercan a los máximos valores de FAD calculados con base en los registros acelerográficos, superando el de amenaza al calculado por medio de métodos analíticos a partir de 0,9s.

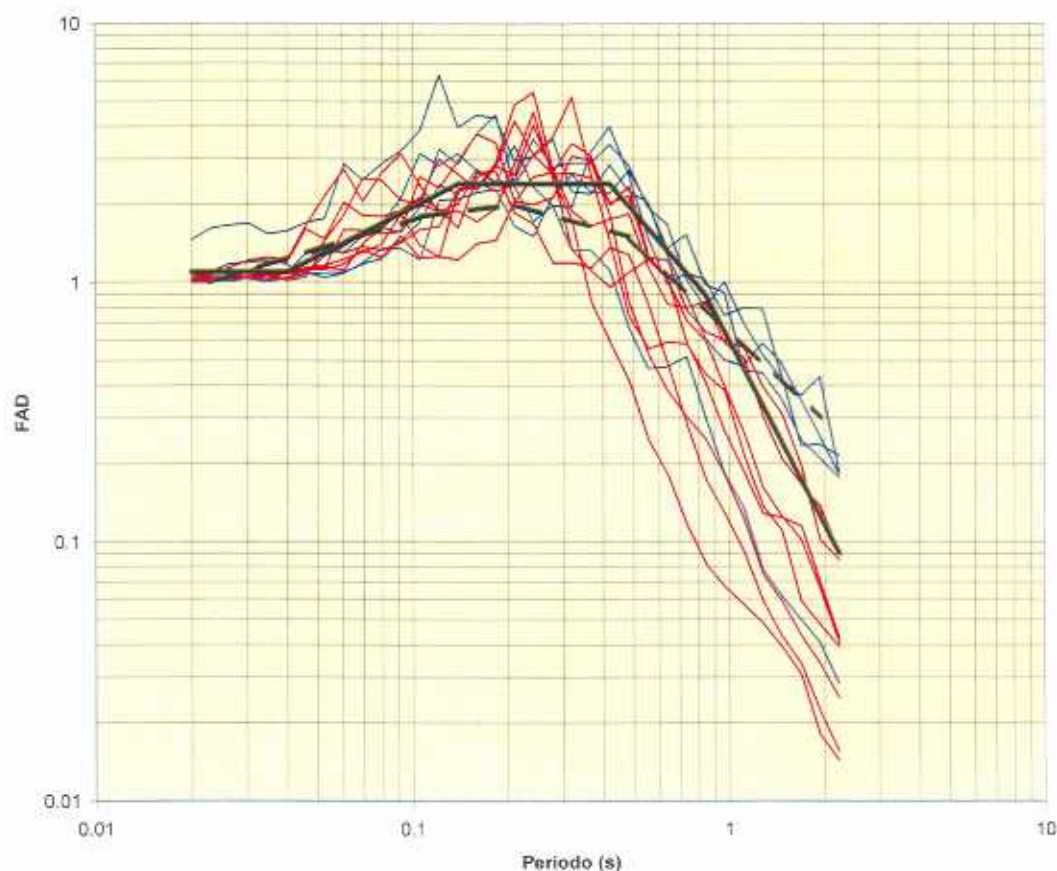


Fig. VI-10. Comparación entre el espectro de respuesta propuesto según métodos analíticos (línea negra continua) y el obtenido según el estudio de amenaza uniforme (línea negra a trazos) ambos para suelo, con los calculados a partir de registros acelerográficos reales en las estaciones HTO (líneas en azul) y ECA (líneas en rojo), todos calculados para el 5% de amortiguamiento.

6.6 REFERENCIAS

American Petroleum Institute, 1993: Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-load and resistance factor design. API Recommended Practice 2A-LRFD, First edition July 1.

Climent, A. y M. Bolaños, 1999: Mapa de espesores de materiales no consolidados en el Área Metropolitana de San José. Instituto Costarricense de Electricidad. UEN Proyectos y Servicios Asociados. San José, Costa Rica, 12 pp.

Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica, 1986: Código Sísmico de Costa Rica. Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Guzmán, J., 1999: Comportamiento dinámico en suelos del Area Metropolitana de San José utilizando técnicas empíricas. Informe final de Trabajo de Graduación para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José.

Nadim, F., 1999: Notas sobre conferencia: Soil Response: Goals and Techiques. Norwegian Geotechnical Institute.

Porras, J.P., 1998: Evaluación hidrológica de cuencas urbanas para el control de inundaciones y el ordenamiento territorial mediante sistemas de información geográfica. Informe de trabajo de graduación. Escuela de Ingeniería civil, Universidad de Costa Rica.

Rojas, W., C. Lindhohlm, H. Bungum, I. Boschini, A. Climent, R. Barquero, G. Alvarado, G. Soto, W. Montero, M. Fernández, M. Protti, A. Moya, L. Esquivel y V. Schmidt, 1998: Seismic Hazard Analysis for the Metropolitan Area of the Central Valley, Costa Rica. Technical Report, Norsar, Norway.

Salas, R., 1999: Análisis de la amplificación dinámica de suelos del Area Metropolitana de San José mediante perfiles de suelo. Informe final de Trabajo de Graduación para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería Civil. Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José. 114 pp.

