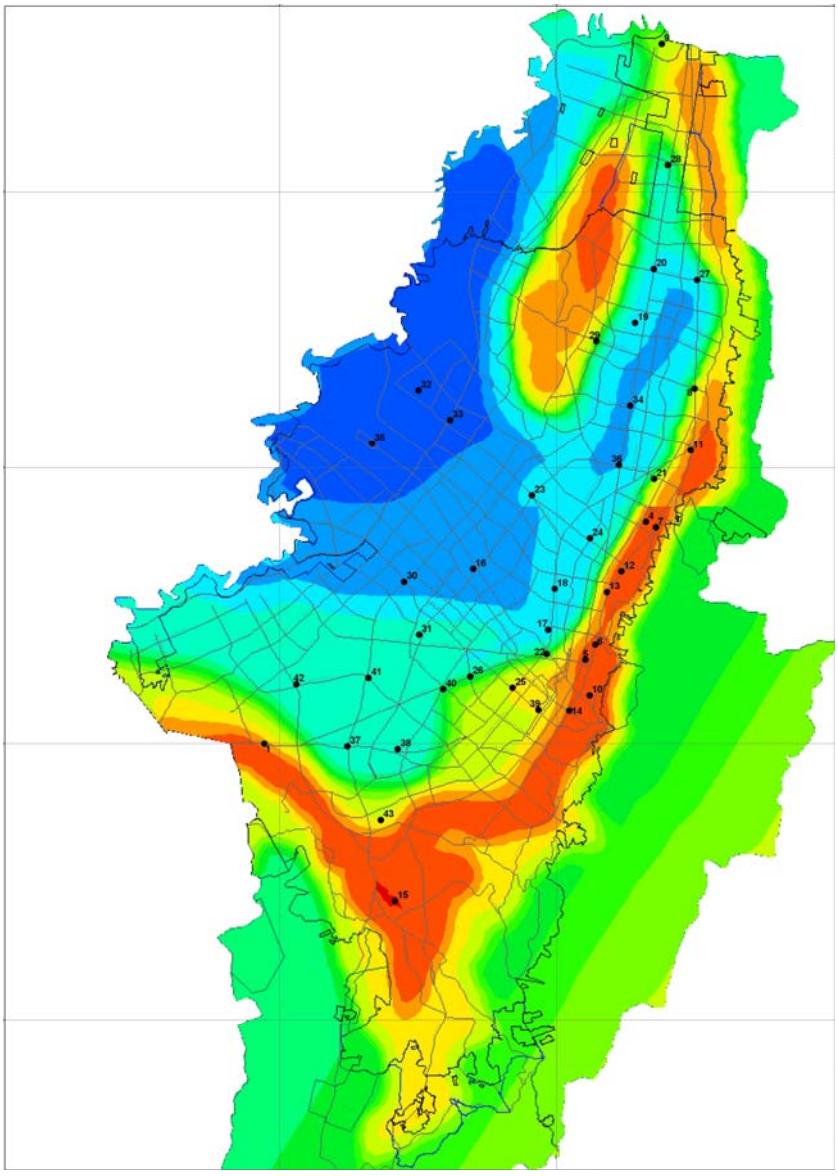
CAPÍTULO

5

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO



CAPÍTULO 5 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO

5.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los principales objetivos de este proyecto consiste en la elaboración del mapa de microzonificación sísmica del área urbana de Bogotá y el desarrollo de las recomendaciones para el diseño sismorresistente de estructuras en la zona estudiada. Estas recomendaciones serán complementarias a las dadas en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente, NSR-98, Ley 400 de 1997 y Decreto 193 de 2006. Las recomendaciones que se presentan se enmarcan dentro del literal A.2.9 “Estudios de Microzonificación” del Decreto 33 de 1998.

El mapa de microzonificación sísmica sirve para establecer los requisitos mínimos de diseño sismo resistente. Para cada punto que se encuentre en el perímetro urbano o en la zona de expansión de la ciudad, la microzonificación sísmica establece una especificación de diseño de tipo espectral (para todas las variaciones posibles de edificaciones dentro de ciertos límites) de manera que cualquier edificación, diseñada con la especificación proporcionada, tendrá en general la misma probabilidad de sufrir daño o colapso ante un evento sísmico futuro. De esta manera no se establecen, en principio, limitaciones a las características generales de las edificaciones a diseñar. Sin embargo, es claro que edificaciones con características dadas, tendrán especificaciones de diseño más exigentes que otras, dependiendo de su ubicación geográfica. Teniendo en cuenta las exigencias mínimas de la NSR-98, existe la posibilidad de no poder utilizar ciertos sistemas estructurales tradicionales en algunas zonas del Distrito, casos en los cuales el calculista deberá recurrir a sistemas estructurales que ofrezcan mayor rigidez y/o resistencia a las fuerzas horizontales.

Los requisitos de diseño sismo resistente que se especifican incluyen el nivel de fuerza sísmica de diseño a nivel de la superficie del terreno para diferentes tipos estructurales (desde casas de uno y dos pisos hasta edificaciones de mayor altura, o construcciones como bodegas, edificios industriales, tanques y otros). También se tiene en cuenta la posible ocurrencia de amplificaciones en la respuesta, consecuencia de las condiciones del subsuelo. Los resultados del presente proyecto de investigación pueden complementarse en el futuro con información recolectada posteriormente. Ésta podría incluir las zonas en las cuales existe posibilidad de presentarse fenómenos especiales asociados al sismo tales como eventuales fallas de taludes amplificación topográfica o similares. De esta manera se establece la necesidad de adelantar estudios particulares, en especial, cuando la magnitud del proyecto lo amerite.

No obstante su aparente similitud en comportamiento sísmico, las zonas que conforman las rondas de los ríos, las zonas inundables, las zonas especiales de reserva (humedales, pantanos y/o lagos), los rellenos, las zonas de fallamientos superficiales, entre otras, deben ser estudiadas por aparte. Esto se debe a que pueden tener un comportamiento sísmico diferente al esperado o a que en el futuro pueden presentar una restricción especial en cuanto a su uso.

Con base en un mapa de zonificación sísmica, una ciudad puede adelantar la planificación de su desarrollo definiendo claramente las políticas de uso de la tierra y las restricciones

necesarias a ciertos tipos de construcción. Paralelamente, puede adelantar un proyecto de mitigación del riesgo sísmico a través del diseño de construcciones teniendo en cuenta los efectos que un sismo máximo probable pueda producir en la zona que se encuentre. Como consecuencia, se minimizan los efectos de eventos sísmicos futuros, como las pérdidas de vidas humanas, el número de personas afectadas por el fenómeno natural y las pérdidas económicas asociadas.

Adicionalmente, la zonificación sísmica puede utilizarse para estudiar posibles escenarios de daños en sismos futuros esperados, tanto a nivel de las estructuras como en las líneas vitales. Solo después de muchos años de utilización de las especificaciones de diseño sismo resistente, la vulnerabilidad sísmica irá disminuyendo hasta alcanzar los estándares aceptables para la sociedad.

A cada punto que se encuentra dentro del perímetro urbano o en la zona de expansión de la ciudad se le asigna un espectro de diseño el cual se define de acuerdo con los parámetros establecidos por la norma NSR – 98 para edificaciones y que corresponden a los siguientes:

- Espectros de respuesta en términos de aceleración.
- Periodos de retorno de análisis: 475 años.
- Amortiguamientos con respecto al crítico: 5%
- Espectros a nivel de superficie del suelo o en terreno firme en función del tipo de cimentación en que se apoye el edificio y a criterio del ingeniero geotecnista.

5.2 ESPECTROS DE DISEÑO

A partir del análisis de respuesta dinámica se obtienen espectros de amenaza uniforme a nivel de superficie del terreno, para un periodo de retorno de 475 años y un amortiguamiento estructural del 5% respecto al crítico. Dichos espectros representan la aceleración impuesta a nivel de cimentación en las estructuras, para un evento sísmico con igual probabilidad de ocurrencia para todas las fuentes sísmicas incluidas en el análisis (ver Capítulo 2). Por está razón se especifican los espectros de diseño como los mismos espectros de respuesta de amenaza uniforme, para los puntos de control estudiados. La Figura 5.1 presenta los 43 espectros de amenaza uniforme resultantes del análisis de respuesta dinámica unidimensional, y empleados como base para la microzonificación sísmica.

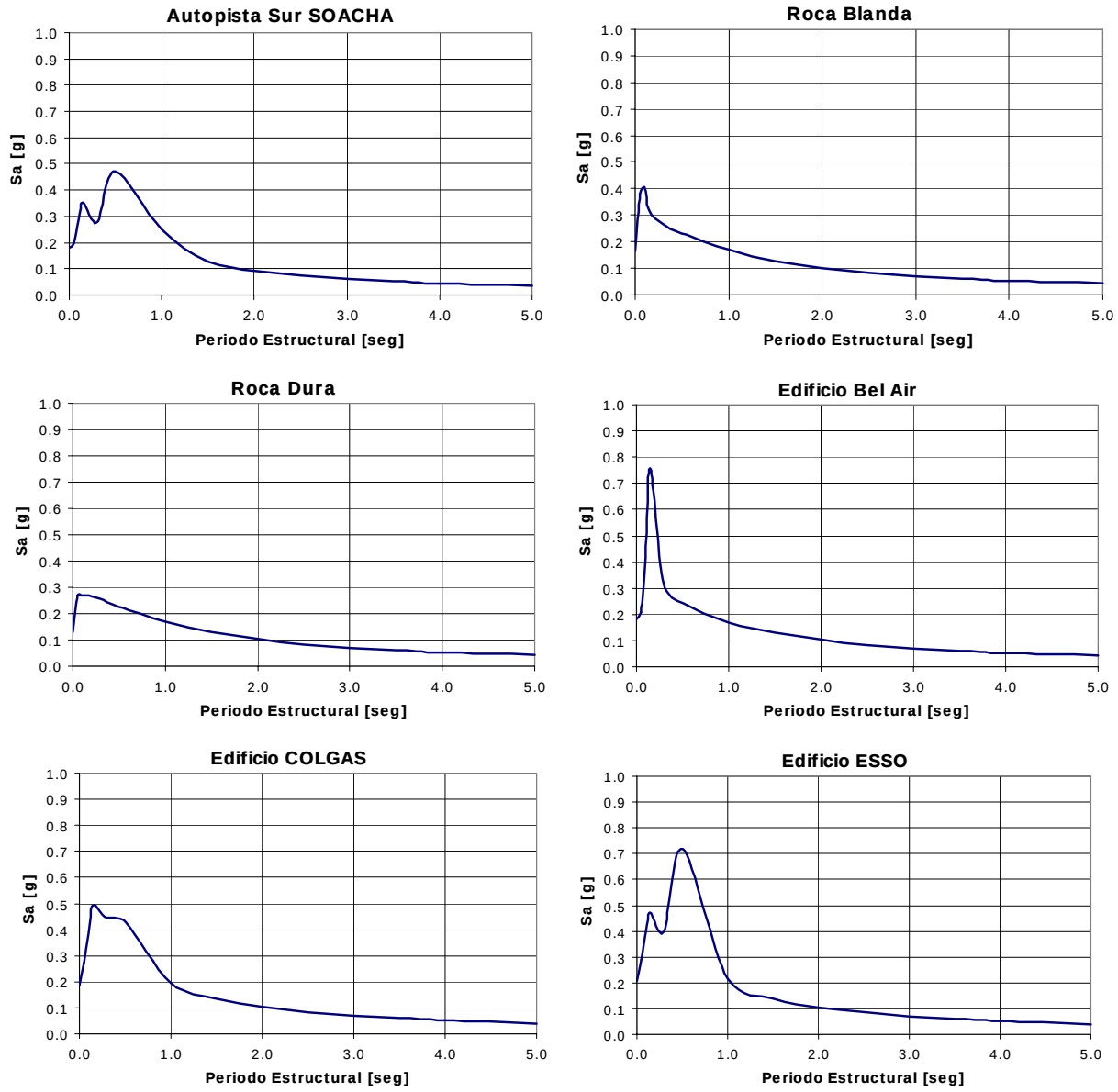
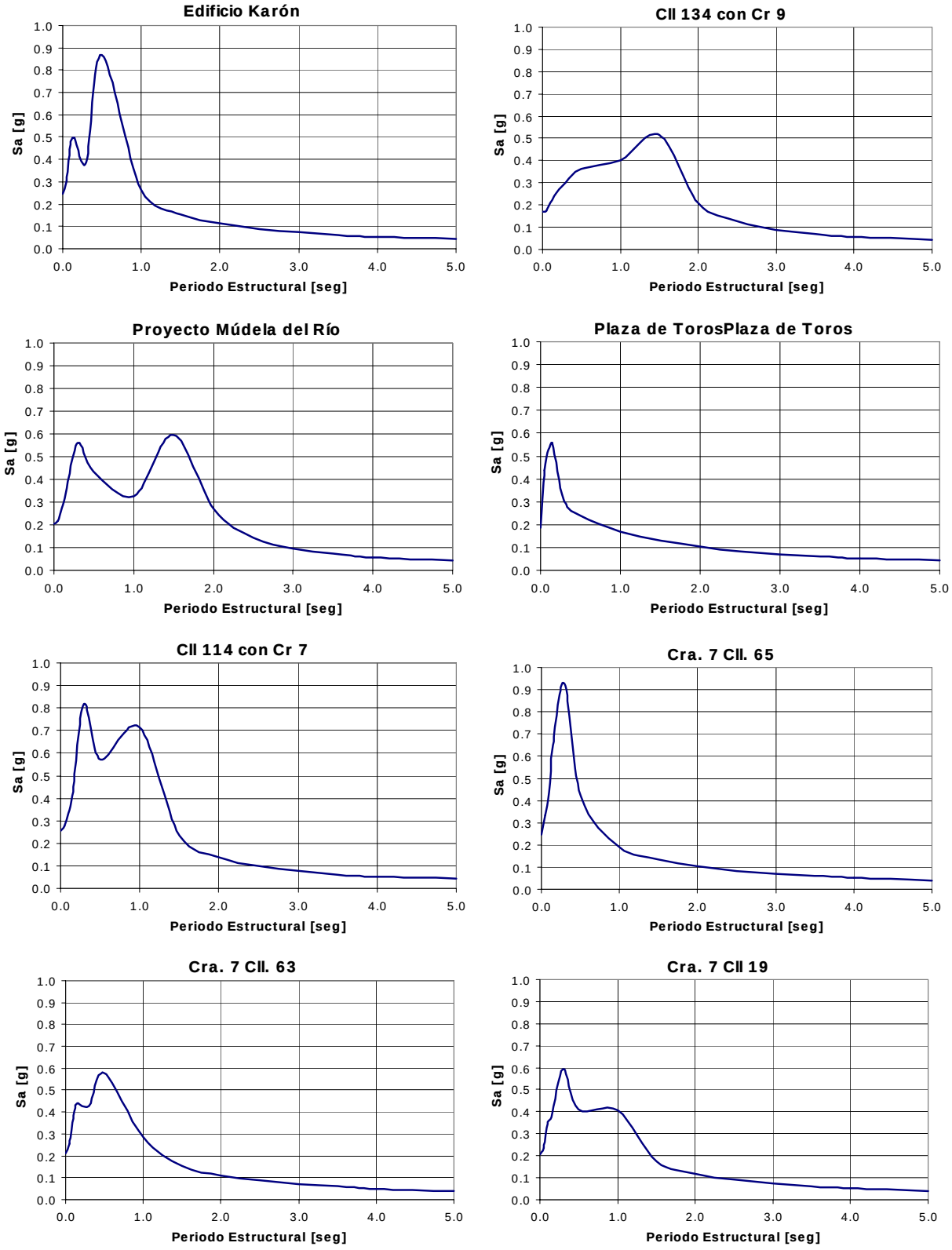
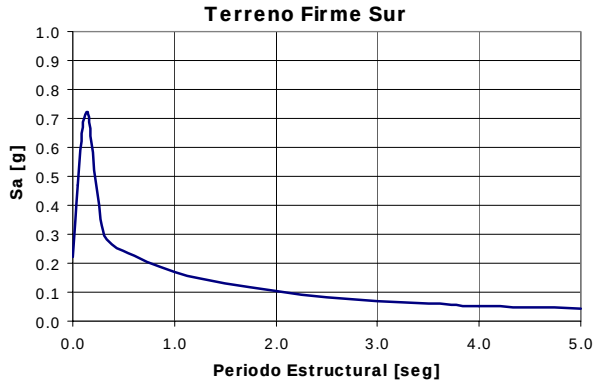
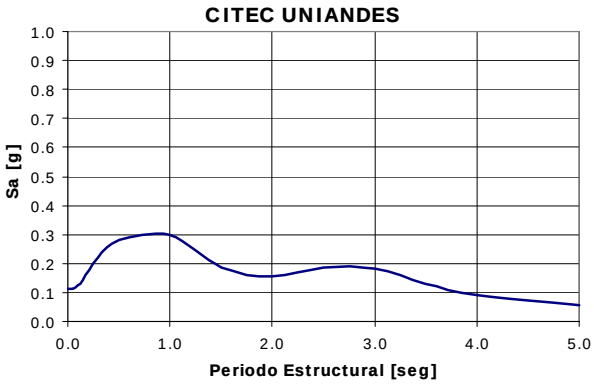


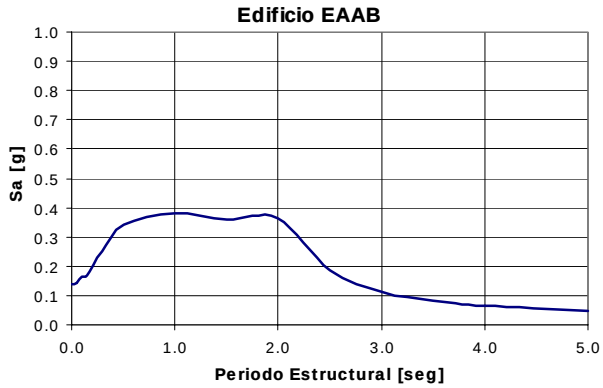
Figura 5.1 Espectros de Diseño para los puntos de control analizados

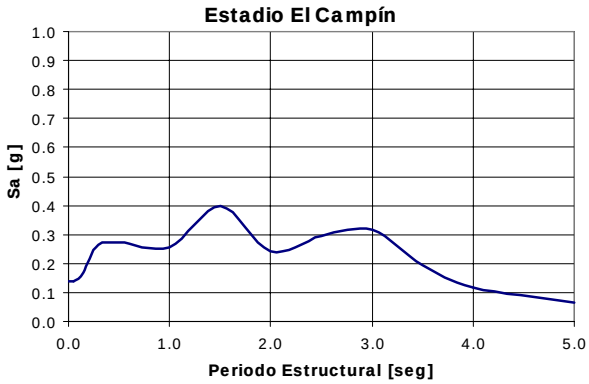


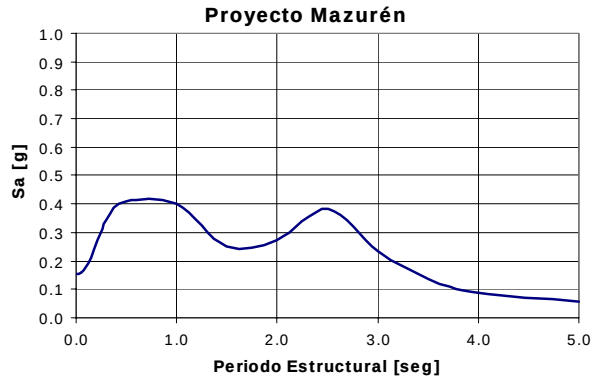
Continuación Figura 5.1 Espectros de Diseño para los puntos de control analizados

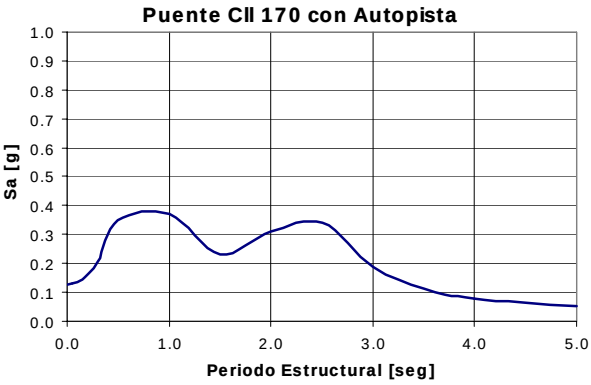

Terreno Firme Sur
Sa [g]
Periodo Estructural [seg]

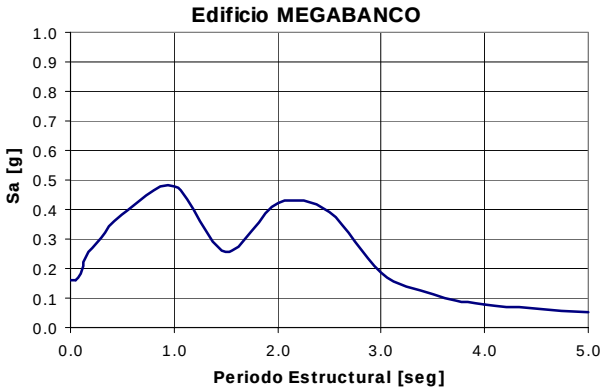

CITEC UNIANDES
Sa [g]
Periodo Estructural [seg]

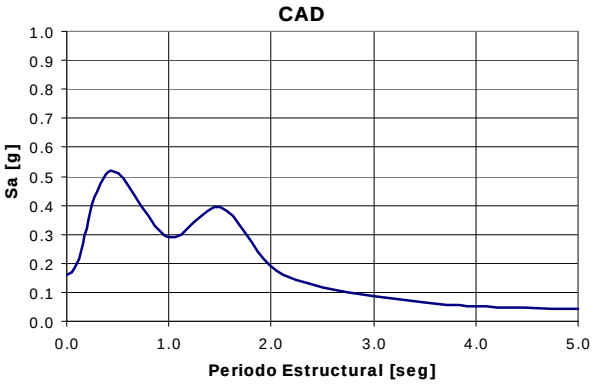

Edificio EAAB
Sa [g]
Periodo Estructural [seg]


Estadio El Campín
Sa [g]
Periodo Estructural [seg]

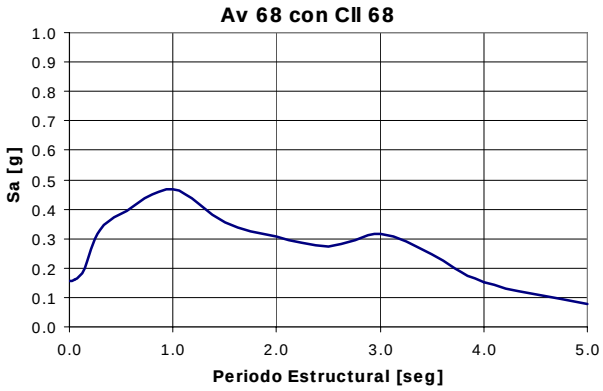

Proyecto Mazurén
Sa [g]
Periodo Estructural [seg]

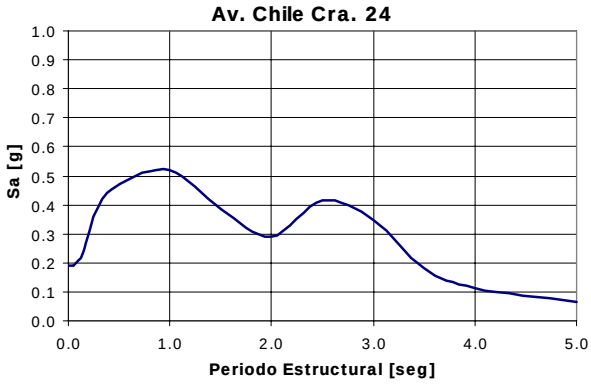

Puente Cll 170 con Autopista
Sa [g]
Periodo Estructural [seg]

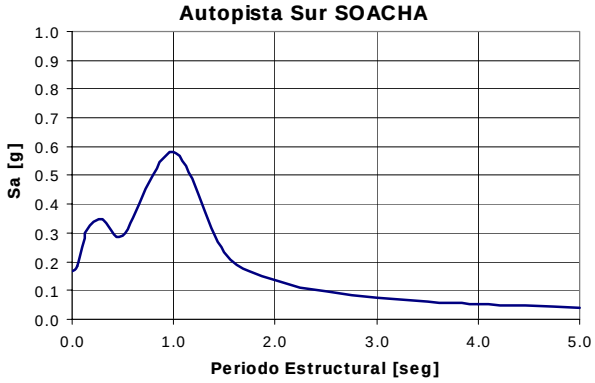


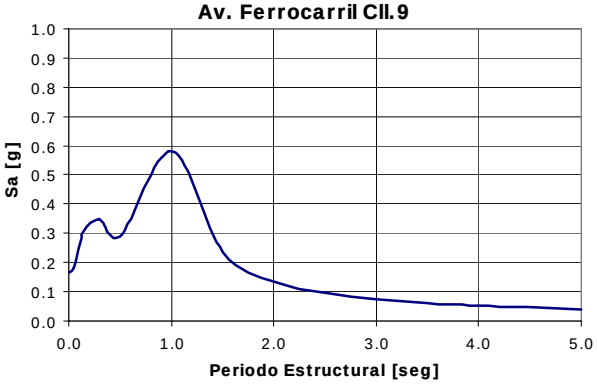


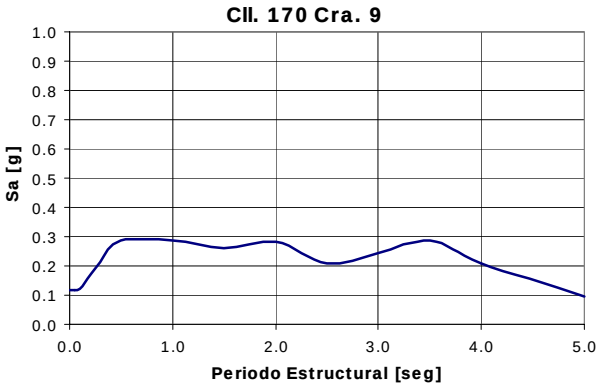
Continuación Figura 5.1 Espectros de Diseño para los puntos de control analizados

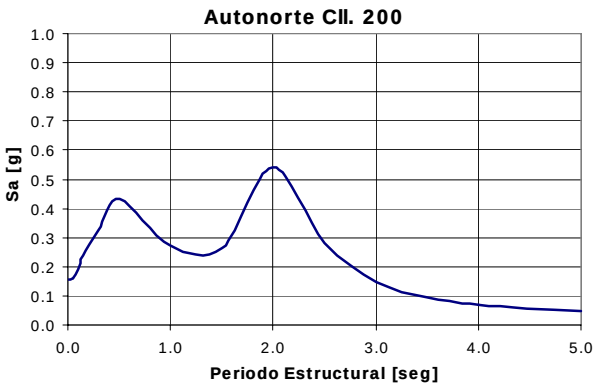


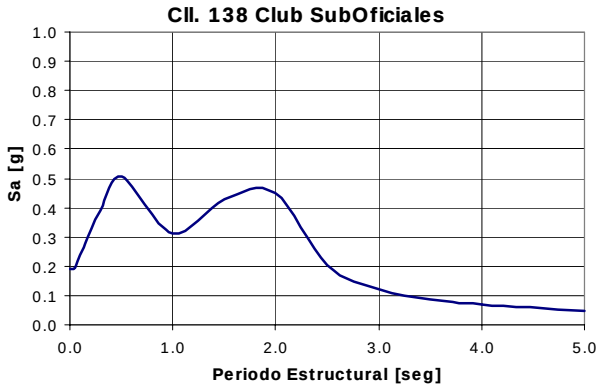


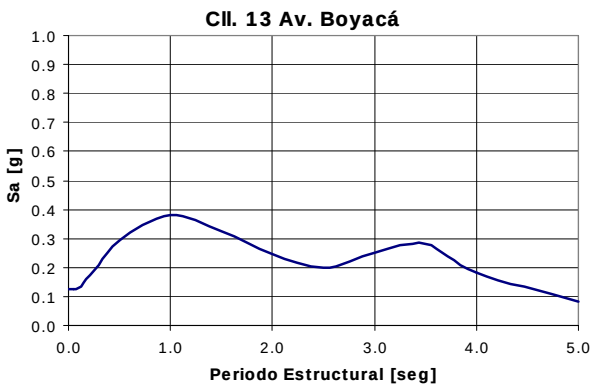




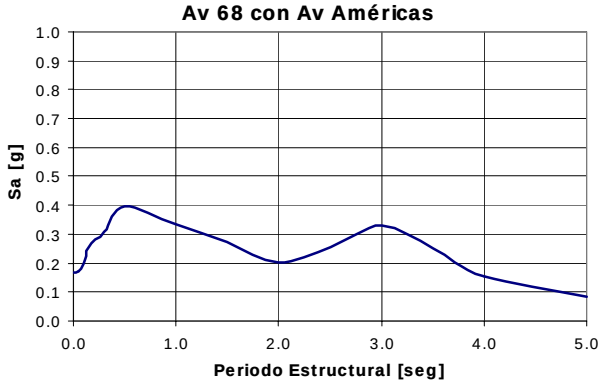


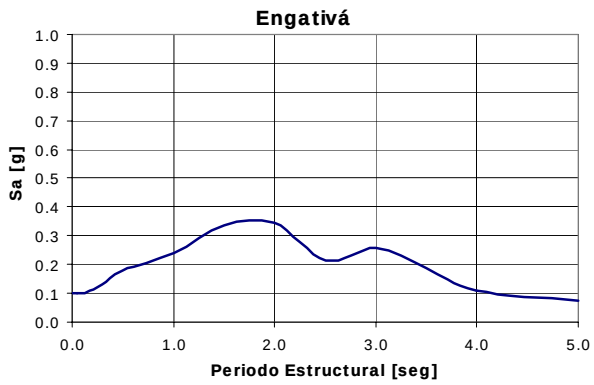


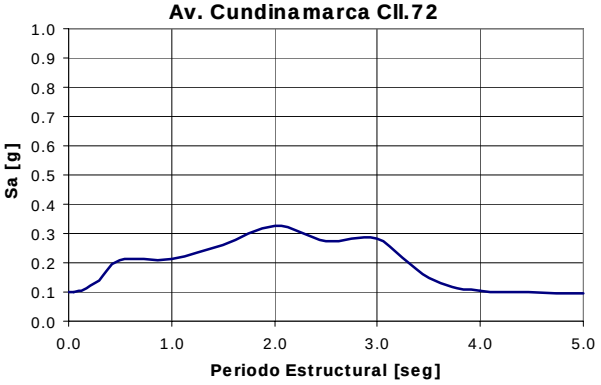


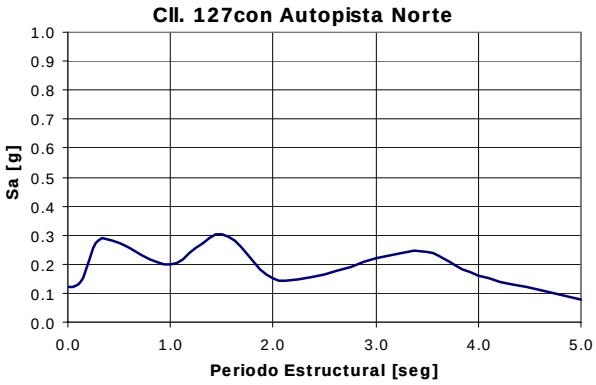


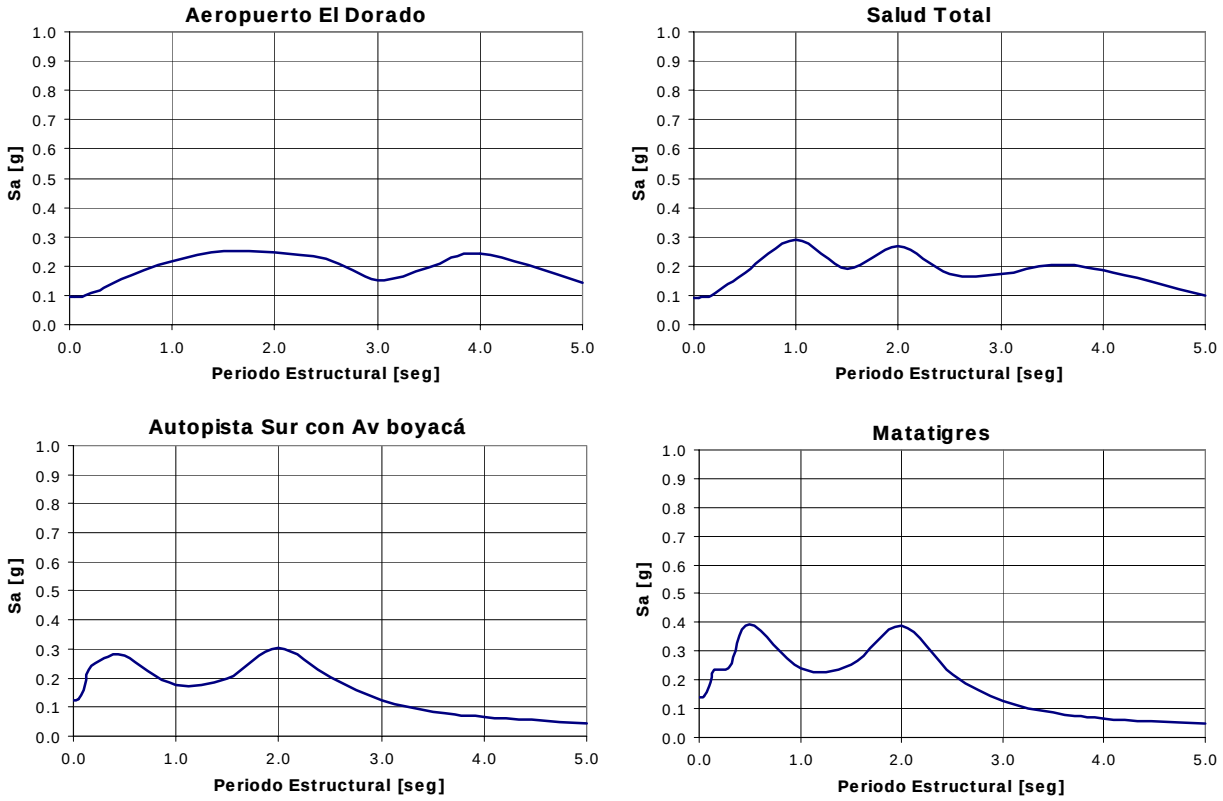
Continuación Figura 5.1 Espectros de Diseño para los puntos de control analizados



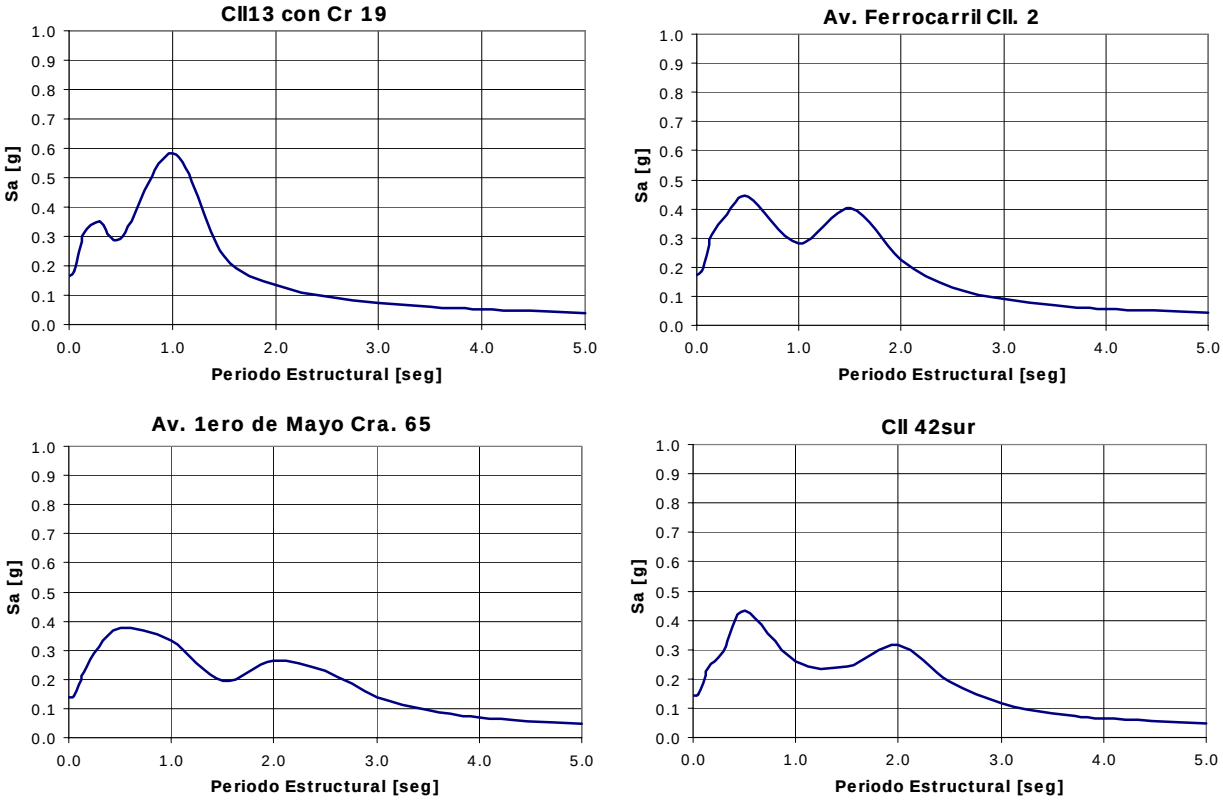


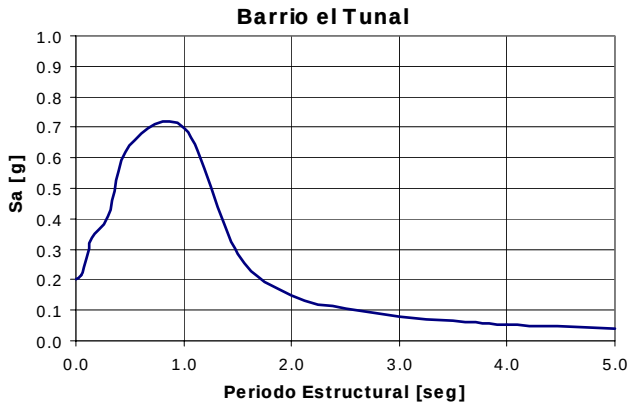






Continuación Figura 5.1 Espectros de Diseño para los puntos de control analizados





Continuación Figura 5.1 Espectros de Diseño para los puntos de control analizados

5.3 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA

5.3.1 Generalidades

La evaluación de la amenaza sísmica a nivel de la superficie del terreno se realiza con base en una zonificación basada en una serie de polígonos o subzonas dentro de las cuales la respuesta sísmica se ha caracterizado con base en los estudios específicos de sitio. Lo anterior con el fin de detallar de mejor manera los resultados del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad utilizando la información disponible en la actualidad. Estas subzonas corresponden a una depuración de las cinco zonas tradicionales incluidas en el Decreto 193 de 2006. Para ello se emplea la información recopilada y se construye un modelo que tiene en cuenta la profundidad y las características de los diferentes depósitos de suelo como se presenta en el Capítulo 3 de este informe.

En la Figura 5.2 se presenta el mapa de polígonos utilizado para la ciudad el cual se establece con base en la información existente, como el mapa de isoperíodos, mapa de profundidad de los depósitos, zonificación geotécnica, distribución geográfica de los sondeos analizados y su respectiva respuesta de sitio.

Es importante indicar que el contar con funciones de transferencia para cada polígono es un avance notable con respecto a otros casos donde existen solamente áreas homogéneas o un mapa de microzonificación de áreas características, en cuyo caso se define en cada área una envolvente de la respuesta sísmica, lo que puede conducir a valores demasiado conservadores. En el presente caso se ha seleccionado una microzonificación más detallada con el fin de eliminar posibles factores de sobreestimación de la amenaza que resultarían de la aplicación directa del Decreto 193 de 2006.

Aunque en un principio se pensó en proponer como zonas de microzonificación sísmica los polígonos de la Figura 5.2, la definición de espectros en las fronteras de estas nuevas zonas implicaría las mismas dificultades que con la normativa actual, debido principalmente a las variaciones en la respuesta dinámica de un sitio a otro. Teniendo en cuenta esta dificultad se decidió realizar una interpolación de los espectros encontrados en los puntos de control siguiendo el procedimiento de interpolación por mínima curvatura [Golden Software, 2002]. Mediante este procedimiento se encuentra el espectro de diseño para cualquier punto que se encuentre al interior del perímetro urbano o de las zonas de expansión de la ciudad, logrando lo siguiente:

a) Representar en forma confiable la respuesta obtenida en cada uno de los puntos de control, logrando con esto una optimización del diseño.

b) Lograr una transición bidimensional (en el plano) suave y uniforme entre todos los espectros de los puntos de control disponibles dentro del perímetro urbano de la ciudad

c) Evitar especificaciones muy conservadoras al tratar de proponer zonas de comportamiento sísmico uniformes.

d) Permitir la adopción de nuevos puntos de control en el futuro sin necesidad de modificar todos los resultados del estudio.

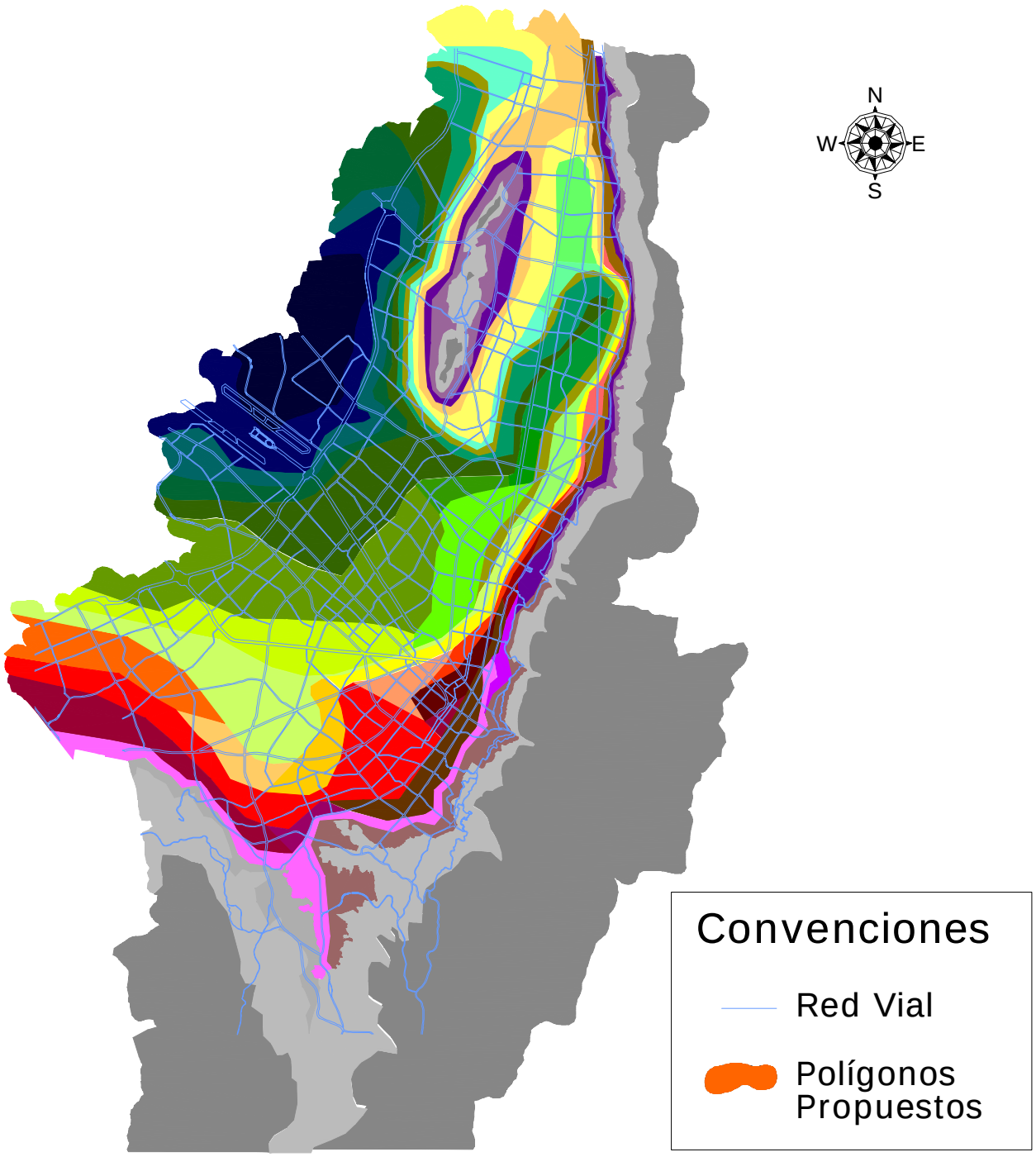


Figura 5.2 Mapa de polígonos utilizados como base para la microzonificación sísmica

5.3.2 Procedimiento práctico para definir el espectro de diseño

Para efectos de definir los espectros de diseño en un predio específico de la ciudad que tenga en cuenta la metodología anterior, se ha desarrollado un sistema de visualización (SISBOG V 1.1) en el cual se han incluido los espectros interpolados, según lo explicado anteriormente, cada 50 m. El sistema indicará al usuario el espectro de diseño recomendado en cada punto de la ciudad, mediante la selección visual (o con coordenadas) del predio exacto a estudiar con ayuda de todo el sistema de visualización disponible. En el Capítulo 6 se explica en detalle el funcionamiento del sistema y el procedimiento para obtener los espectros de diseño en cualquier punto de la ciudad.

5.3.3 Mapa de Microzonificación sísmica

La metodología de microzonificación propuesta no establece como tal zonas homogéneas o sectores de igual comportamiento. Por esta razón, no es posible adoptar como tal un mapa de microzonificación sísmica. Se tiene más bien un mapa de variación continua de espectros de respuesta de diseño en toda la ciudad. Para efectos de ilustración únicamente se presentan mapas de microzonificación sísmica con tendencias de variación en los espectros. La Figura 5.3 presenta en forma ilustrativa las variaciones en las formas espectrales de diseño para la ciudad.

Para efectos de ilustrar la variación continua en la forma de los espectros de un punto a otro, se ha seleccionado como factor de graficación en la Figura 5.3 la aceleración espectral correspondiente a un periodo estructural de T=0.15 seg en espectros con un amortiguamiento con respecto al crítico del 5%. Se ha seleccionado este factor ya que se trata de las aceleraciones espectrales que mayor variación presentan geográficamente de punto a punto en comparación con las aceleraciones espectrales para otros períodos estructurales.

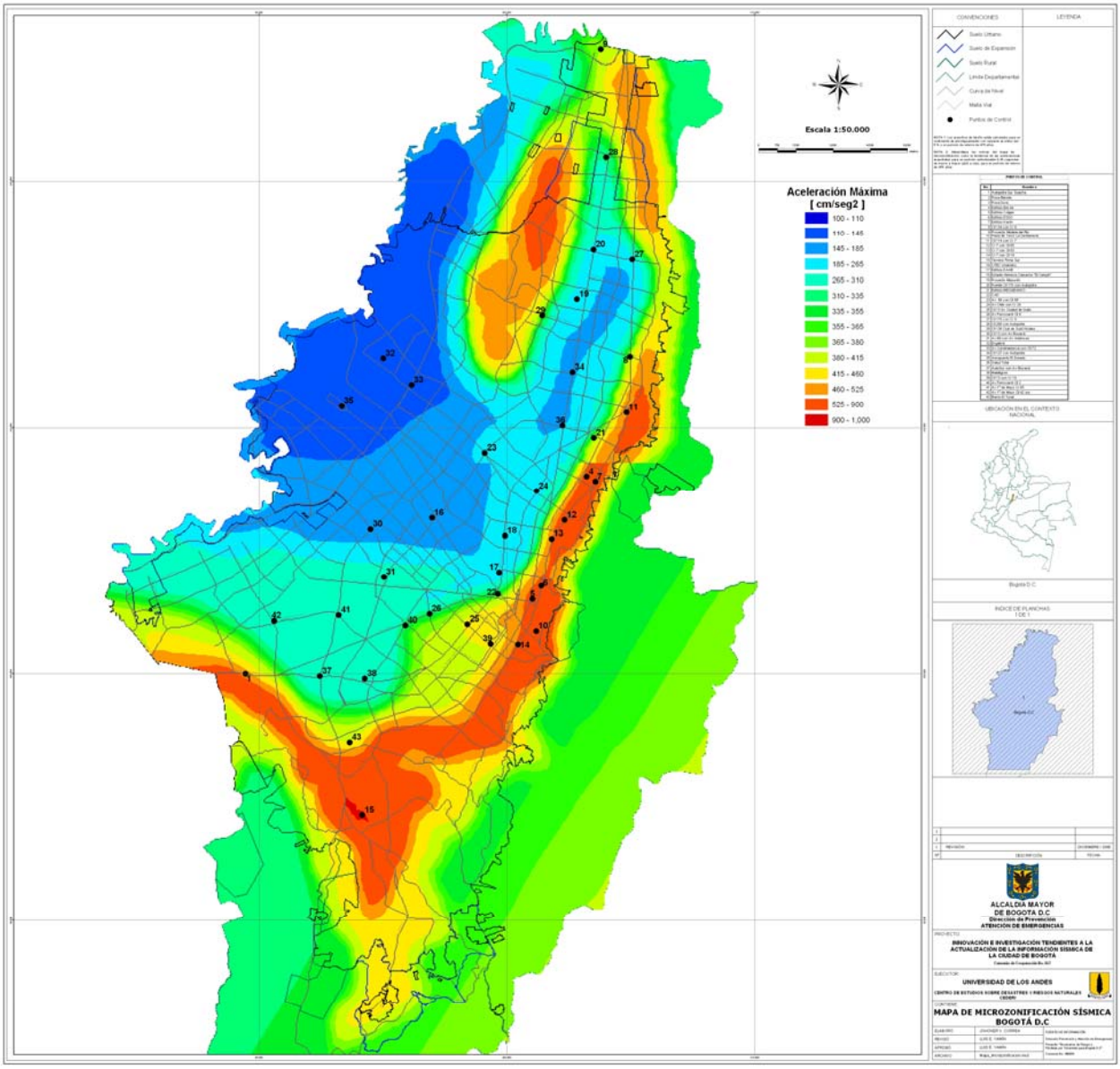


Figura 5.3 Mapa de variación de formas espectrales de diseño para Bogotá

5.4 MAPAS DE AMENAZA REPRESENTATIVOS

Con base en el sistema SISBOG V 1.1 (ver detalles del mismo en el Capítulo 6), se presentan una serie de mapas de amenaza representativos para la ciudad de Bogotá. En las Figuras 5.4 a 5.10 se presentan los siguientes mapas de amenaza:

- Aceleración en superficie del terreno para T=475 años
- Velocidad máxima del terreno para T=475 años
- Desplazamiento máximo del terreno para T=475 años.
- Juego de mapas de aceleración espectral en superficie del terreno para T=475 años y para varios períodos estructurales (T=0.5, T=1.0 y T=1.5 segundos).
- Aceleración máxima en superficie del terreno para T=1000 años.

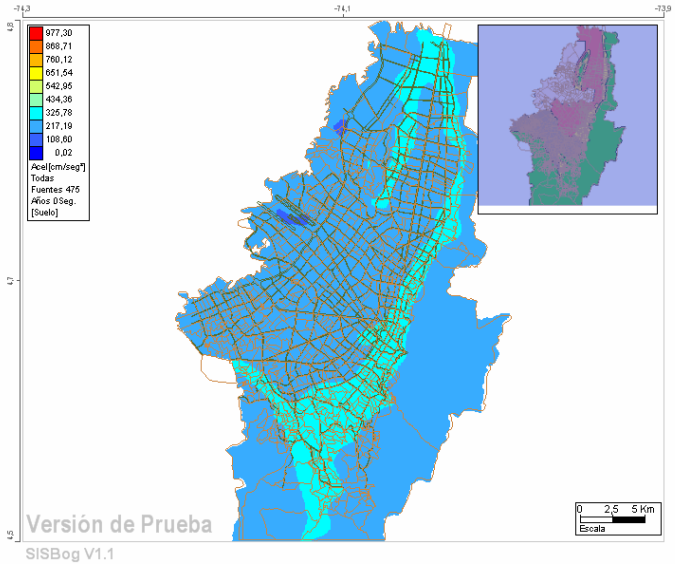


Figura 5.4 Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =475 años

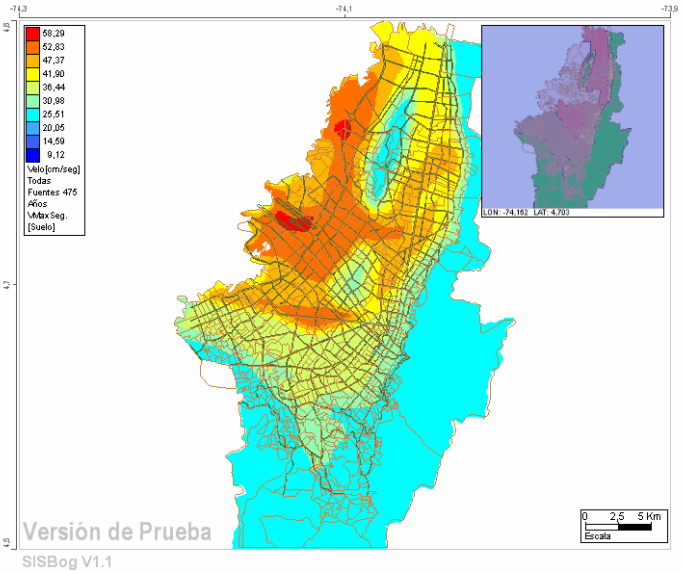


Figura 5.5 Velocidad máxima del terreno, Tr =475 años

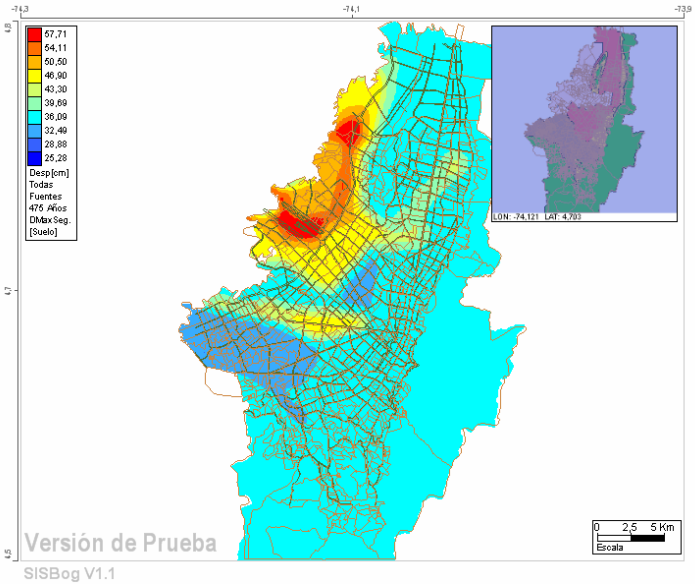


Figura 5.6 Desplazamiento máximo del terreno, Tr =475 años

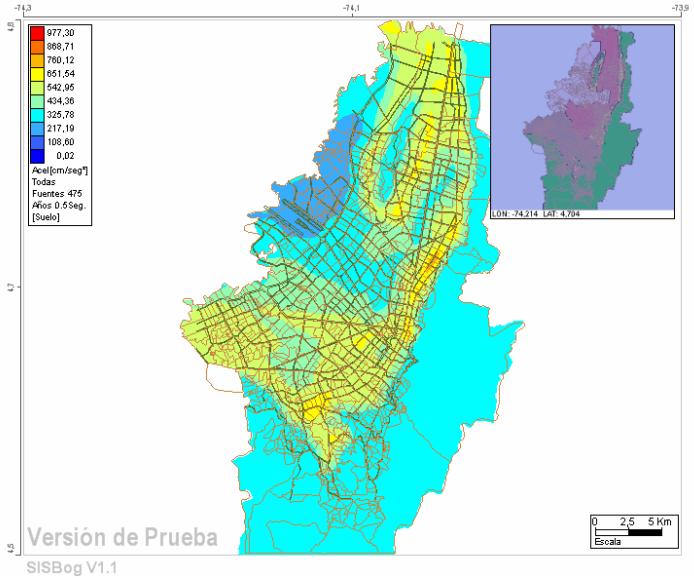


Figura 5.7 Aceleración espectral en superficie del terreno, Tr =475 años, periodo estructural 0.5 seg

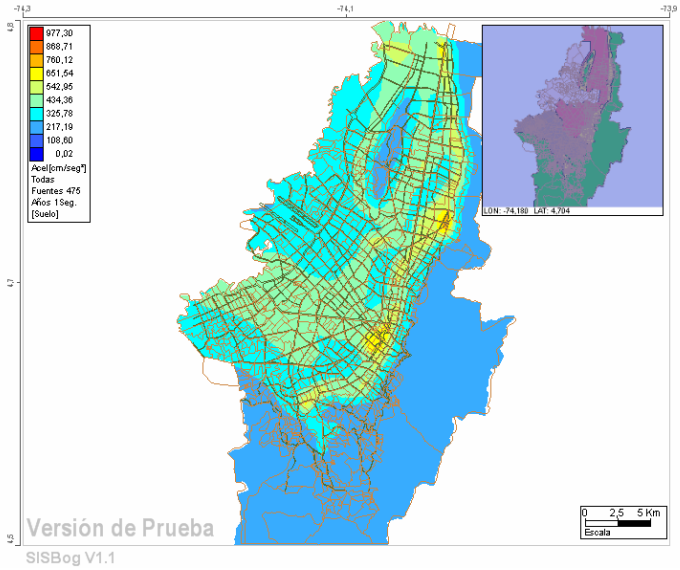


Figura 5.8 Aceleración espectral en superficie del terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.0 seg

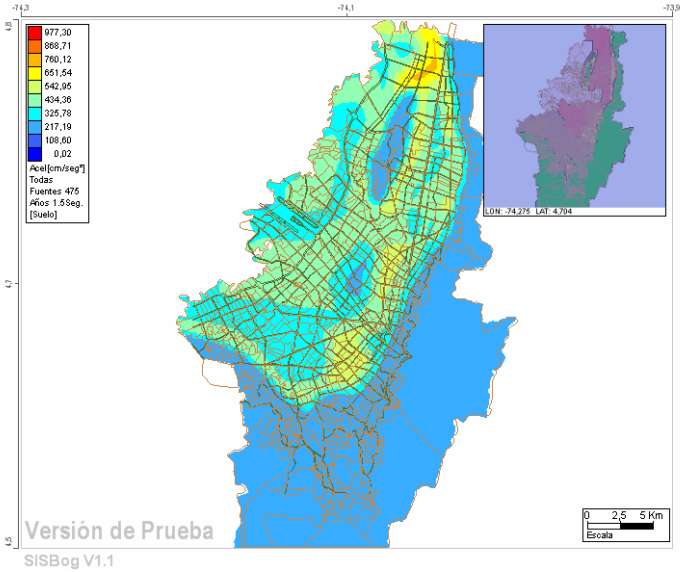


Figura 5.9 Aceleración espectral en superficie del terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.5 seg

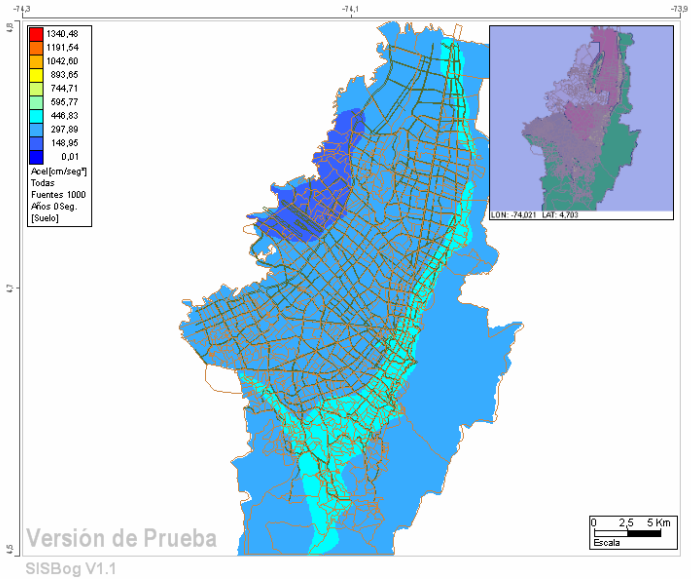


Figura 5.10 Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =1000 años

5.5 CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA INSTRUMENTO JURÍDICO DE ADOPCIÓN DEL ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN

La adopción por parte de la administración distrital de la reglamentación que ponga en práctica obligatoria los resultados del estudio de microzonificación debe tener en cuenta las siguientes consideraciones técnicas.

1. Todas las recomendaciones de diseño aquí establecidas son complementarias a las dadas en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistentes, Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998 y Decreto 34 de 1999 y en ningún caso podrá tomarse un requisito inferior al establecido por la Norma.

2. Todos los espectros de diseño recomendados son a nivel de la superficie del terreno para un amortiguamiento con respecto al crítico del 5%.

3. En las zonas con efectos topográficos de consideración como son las zonas cercanas a los bordes de los taludes deben aplicarse, factores de amplificación de acuerdo con las recomendaciones del ingeniero geotécnico.

4. Para estructuras con períodos de vibración fundamental mayores o iguales a 2.0 seg deben adelantarse análisis sísmicos especiales que se salen del alcance de las presentes recomendaciones.

5. Podrán utilizarse fuerzas de diseño diferentes a las que resultan de la utilización de los espectros de diseño recomendados siempre y cuando se justifique el valor empleado con análisis de respuesta de perfiles debidamente estudiados, utilizando hipótesis equivalentes a las dadas en el presente estudio y atendiendo los requisitos mínimos establecidos en las NSR-98 (Capítulo A.2). Para el efecto deberán utilizarse en el análisis al menos los tres (3) acelerogramas de diseño establecidos en el presente estudio y que se incluyen en formato digital anexo. En ningún caso la fuerza sísmica de diseño adoptada podrá ser inferior al 80% de la fuerza que resulta utilizando los espectros dados en el presente estudio.

6. Para efectos de aplicación de requisitos complementarios de las NSR-98, el la ciudad de Bogotá sigue perteneciendo a una zona de Amenaza Sísmica Intermedia.

7. Para el caso de estructuras de período corto (viviendas de uno y dos pisos y edificaciones de muros de pocos pisos), la selección del valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía para el sistema estructural, R, deberá realizarse de acuerdo con lo establecido en el numeral A.2.9.4 del Decreto 34 de 1999.

8. En Terrenos con pendiente superior a 10 grados (17%), deben realizarse estudios de estabilidad de taludes, geotécnicos y estudios adicionales de amenaza por fenómenos de remoción en masa que incluyan los efectos sísmicos. Para este efecto se deben aplicar tanto lo contenido en la sección A.2.4.1.6 y el Título H del Decreto 33 de 1998.

9. Podrán considerarse en el diseño los efectos de la interacción dinámica suelo estructura de acuerdo con los lineamientos establecidos en el Apéndice A-2 de la NSR-98.

5.6 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS

Con base en los resultados encontrados en el presente estudio se pueden establecer las siguientes recomendaciones generales:

1. La calibración del modelo de comportamiento propuesto solo puede realizarse mediante el registro de una serie de eventos sísmicos que puedan ser registrados en las estaciones acelerográficas instaladas en diferentes puntos de la ciudad. Para una adecuada calibración se requiere además que los registros disponibles tengan amplitudes significativas ya que para señales de baja amplitud los ruidos locales no permiten una adecuada interpretación. Por otro lado se pretende calibrar el comportamiento en el rango inelástico de los suelos para lo cual se requieren de señales sísmicas significativas (en general señales que se clasifican como de movimientos fuertes).

2. Para efectos de conocer el comportamiento global de los diferentes depósitos característicos de la zona se recomienda la instalación de instrumentos en profundidad, en especial para conocer la señal en la roca base y contar simultáneamente con registros en superficie.

3. Otro aspecto que requiere mayor estudio es el de la caracterización geotécnica de los suelos de la ciudad. Hasta el presente se cuenta con información geotécnica de calidad en muy pocos sitios y debe pensarse en el futuro en mejorar la cantidad y calidad de esta información. Además deben realizarse perforaciones adicionales en las diferentes zonas de la ciudad con el fin de confirmar la delimitación de cada una de ellas. Debe darse prioridad a los métodos de investigación de campo y a ensayos básicos como son la medición de la velocidad de onda de cortante en el sitio con métodos como el Down Hole o similares. En cuanto a la ubicación de posibles nuevos puntos de investigación deberá darse prioridad a las zonas de expansión de la ciudad y lzonas en que los puntos de control se encuentren más alejados.

4. Los aspectos de modelación bi y tridimensional requieren definitivamente mucha más información y desarrollo para poder ser aplicados al caso de Bogotá. La instrumentación resulta vital para conocer mejor las características de amplificación de diferentes depósitos y el comportamiento de los efectos topográficos.

5. Los efectos geométricos locales, asociados a la heterogeneidad de los depósitos de suelo o a cambios topográficos en superficie (como el caso de taludes o colinas) deben evaluarse en detalle para efectos de complementar la normativa de diseño. Para esto se recomienda igualmente adelantar una instrumentación básica que permita el dimensionamiento de estos efectos.

6. Con los resultados de este estudio, la ciudad puede emprender una serie de actividades complementarias tales alternativas de reducción y mitigación del riesgo en edificaciones (públicas y privadas), retención y transferencia del riesgo sísmico de la ciudad, evaluación del riesgo de los sistema de líneas vitales (energía, acueducto, alcantarillado, comunicaciones, gas y otros) y elaboración de los planes de contingencia respectivos y otros.

5.7 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

Aguilar, R., A. Arciniega, M. Ordaz, L.E. Pérez-Rocha, E. Reinoso, y F.J. Sánchez-Sesma. 1991. Respuesta sísmica del Valle de México: Aplicaciones y teoría, Informe final de actividades del Centro de Investigación Sísmica A.C. a la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.

Alcaldía de Manizales & Universidad de los Andes. 1998. Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales - Caldas, Universidad de los Andes, Marzo de 1998

Berg. Glen V. 1982. Seismic Design Codes and Procedures. Earthquake Engineering research Institute.

Chopra Anil. K. 1982. Dynamics of Structures. Earthquake Engineering Research Institute.

Corporación Autónoma Regional del Quindio, CRQ. 1997. Microzonificación Sísmica Preliminar de la Cuidad de Armenia - Quindio", Universidad de los Andes, Julio de 1997

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC, Municipios de Palmira, Tulúa y Buga, UNIANDES, 2005. Microzonificación Sísmica y Estudios Generales de Riesgo Sísmico para las Ciudades de Palmira, Tulúa y buga.

Decreto 193 del 08 de Junio de 2006. "Por el cual se complementa y modifica el Código de construcción de Bogotá D. C., se adoptan los espectros de diseño y las determinantes de la Microzonificación Sísmica".

García L. E. 1996. Dinámica Estructural y Diseño Sismorresistente. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería.

Golden Software. 2002. SURFER, Surface Mapping System Version 8.00, February 2002.

Housner G.W & Jennings P.C. 1982. Earthquake Design Criteria. Earthquake. Engineering research Institute.

Hudson D.E. 1982. Reading and Interpreting Strong Motion Accelerograms. Earthquake Engineering research Institute.

INGEOMINAS & Universidad de los Andes. 1992. Microzonificación Sísmogeotectonica de Popayán.

INGEOMINAS. 1999. Terremoto del Quindío (Enero 25 de 1999) Informe Técnico-Científico.".

Meli, R. 1986. Evaluación de los efectos de los sismos de 1985 en los edificios de la Ciudad de México (3 volúmenes y 7 anexos), *Informe Interno DE/ESTV2/ 1*, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Meli, R. & Avila, J. 1988. Analysis of building response, Earthquake Spectra, 5, 1-18.

Miranda E. 1991**.** Seismic and Upgrading of existing structures. Tesis Doctoral. Universidad de California en Berkeley- Berkeley, CALIFORNIA, Estados Unidos de América

National Earthquake Hazards Reduction Program. 1994. Recommended provisions for seismic regulation for building". Part 1 and 2. 1994 Edition.

Newmark N.M. & Hall W.J. 1982. Earthquake Spectral and Design. Earthquake Engineering Research Institute.

Ordaz, M, Reinoso E. y Pérez Rocha L. E. 1996**.** Criterios de diseño sísmico: consideraciones para suelos blandos, Ingeniería Sísmica, (53) 25-35.

Ordaz M. & Perez-Rocha L. E. 1998. Estimation fo strength reduction factors for elastoplastic systems: a new approach, Earthquake Engineering Structural Dynamics 27 – 99-901.

República de Colombia. 1998. Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes – NSR-98, Ley 400 de 1997.Decreto 33 de 1998.

Rosas H. & Ruiz, S (1990), Factor de amplificación de la respuesta de estructuras con resistencia asimétrica, Revista de Ingeniería Sísmica, SMIS, No. 39, pp. 15-26

Sarria A. 1996. Ingeniería Sísmica. Ediciones UNIANDES.

Seed H. B, Idriss & I.M Lysmer. 1982. Ground motions and soil liquefaction during Earthquake. Earthquake Engineering Research Institute, 1982.

Universidad de los Andes & INGEOMINAS.1997. Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá.

Universidad de los Andes. 2002. Microzonificación Sísmica de la ciudad de Manizales.

Veletsos A. S. & Newmark N. M. 1960. Effect of inelastic behavior on the response of simple system to earthquake motion. Proceedings of second world conference on earthquake engineering 895 – 912.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 5 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y ESPECTROS DE DISEÑO 5-1

5.1 INTRODUCCIÓN 5-1

5.2 ESPECTROS DE DISEÑO 5-3

5.3 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA 5-10
5.3.1 Generalidades 5-10
5.3.2 Procedimiento práctico para definir el espectro de diseño 5-12
5.3.3 Mapa de Microzonificación sísmica 5-12

5.4 MAPAS DE AMENAZA REPRESENTATIVOS 5-14

5.5 CONSIDERACIONES TÉCNICAS PARA INSTRUMENTO JURÍDICO DE ADOPCIÓN DEL ESTUDIO DE MICROZONIFICACIÓN 5-18

5.6 RECOMENDACIONES PARA ESTUDIOS FUTUROS 5-19

5.7 BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS 5-20

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1 Espectros de Diseño para los puntos de control analizados 5-3
Figura 5.2 Mapa de polígonos utilizados como base para la microzonificación sísmica 5-11
Figura 5.3 Mapa de variación de formas espectrales de diseño para Bogotá 5-13
Figura 5.4 Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =475 5-14
Figura 5.5 Velocidad máxima en terreno, Tr =475 5-14
Figura 5.6 Desplazamiento máximo en terreno, Tr =475 años 5-15
Figura 5.7 Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 0.5 seg 5-15
Figura 5.8 Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.0 seg 5-16
Figura 5.9 Aceleración espectral en terreno, Tr =475 años, periodo estructural 1.5 seg 5-16
Figura 5.10 Aceleración máxima en superficie del terreno, Tr =2500 5-17