CLASIFICADO

ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de Prevención y
Atención a Emergencias

DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

ACTUALIZACIÓN DE LA MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y RECOMENDACIONES PARA LA REGLAMENTACIÓN DE DISEÑO SISMORESISTENTE DE BOGOTÁ.

VERSIÓN PRELIMINAR PARA DISCUSIÓN

INFORME FINAL

VOLUMEN 1

ORIGINAL

SUBDIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS TÉCNICOS

ENERO DE 2008

BOG BOGOTÁ POSITIVA
GOBIERNO DE LA CIUDAD

Diagonal 47 No. 77A -09 Interior 11 - Conmutador: 4292801 Fax. 4292833 - Bogotá D.C. - Colombia
Página Web: www.fopae.gov.co y www.sire.gov.co mail: fopae@fopae.gov.co

Nota especial: De acuerdo con el articulo 20 de la ley 23 de 1982, los derechos de autor pertenecen al FOPAE, la solicitud de reproducir éste documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE.

CLASIFICADO

ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de Prevención y
Atención a Emergencias

DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

DIANA MARCELA RUBIANO VARGAS
Directora

GUILLERMO ÁVILA ÁLVAREZ
Subdirector de Investigación y Desarrollo

FERNANDO JAVIER DÍAZ PARRA
Profesional Especializado – Geotecnista

SOCIEDAD COLOMBIANA DE GEOTECNIA

JORGE ALBERTO RODRÍGUEZ
Presidente

ÁLVARO GONZÁLEZ
EDGAR RODRÍGUEZ
Miembros de la SCG

ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA

CARLOS BERNAL
Presidente

JOSEF FARBIARZ
MANUEL ROBERTO VILLARAGA
Miembros de la AIS

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

LUIS YAMÍN
Director CEDERI

GABRIEL BERNAL
Profesional Especializado CEDERI

Diagonal 47 No. 77A -09 Interior 11 - Conmutador: 4292801 Fax. 4292833 - Bogotá D.C. - Colombia
Página Web: www.fopae.gov.co y www.sire.gov.co mail: fopae@fopae.gov.co

Nota especial: De acuerdo con el articulo 20 de la ley 23 de 1982, los derechos de autor pertenecen al FOPAE, la solicitud de reproducir éste documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE.

ALCALDÍA MAYOR
DE BOGOTÁ D.C.
GOBIERNO SEGURIDAD Y CONVIVENCIA
Fondo de Prevención y
Atención a Emergencias

DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS

RESUMEN

Bogotá viene adelantando desde hace varios años diversas actividades en torno a la gestión general del riesgo sísmico del área urbana de la ciudad. Han transcurrido aproximadamente 10 años desde que se publicaron los resultados finales del estudio de microzonificación sísmica de Bogotá, tiempo en el cual es estado del conocimiento ha avanzado considerablemente en diferentes aspectos. Por lo anterior, la DPAE desde finales del año 2005 a través del Ingeniero Fernando Ramírez (Director DPAE 2003 a 2006), la Ingeniera Diana Rubiano (Directora DPAE 2007) y la participación de representantes de la Sociedad Colombiana de Geotecnia, SCG, la Asociación de Ingeniería Sísmica, AIS y la Universidad de los Andes, UNIANDES, emprendieron labores encaminadas a realizar la actualización del estudio de microzonificación sísmica de Bogotá. El presente documento técnico resume los resultados preliminares para discusión obtenidos del proyecto de actualización de la microzonificación, cuyos productos principales son la actualización del mapa geotécnico y de efectos locales de Bogotá, en los cuales se definen las zonas de comportamiento uniforme desde los puntos de vista geotécnico y sísmico.

Diagonal 47 No. 77A -09 Interior 11 - Conmutador: 4292801 Fax. 4292833 - Bogotá D.C. - Colombia
Página Web: www.fopae.gov.co y www.sire.gov.co mail: fopae@fopae.gov.co

Nota especial: De acuerdo con el articulo 20 de la ley 23 de 1982, los derechos de autor pertenecen al FOPAE, la solicitud de reproducir éste documento parcial o totalmente, se debe dirigir por escrito al Director del FOPAE.

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 1
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN 2
1.2 OBJETIVOS 3
1.2.1 General 3
1.2.2 Específicos 3
1.3 ALCANCE 4
1.4 METODOLOGÍA GENERAL 4
2 ESTUDIOS PREVIOS Y CONVENIOS INTERADMINISTRATIVOS 7
2.1 ESTUDIO BASE E INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA 7
2.1.1 Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá - MZSB 7
2.1.2 Señales sísmicas compatibles con la amenaza 8
2.1.3 Información cartográfica y catastral de la ciudad 8
2.2 CONVENIOS INTERADMINISTRATIVOS 8
3 AMENAZA SÍSMICA Y SEÑALES DE DISEÑO 13
3.1 Amenaza sísmica total y desagregada 13
3.2 Señales de diseño 16
3.2.1 Escalamiento de las señales de diseño 21
3.2.2 Desviación estándar de las señales de diseño 22
3.2.3 Observaciones adicionales 23
4 MODELO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO DE LA CIUDAD 25
4.1 METODOLOGÍA DE ZONIFICACIÓN 25
4.2 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA 27
4.2.1 Modelo digital del terreno 27

Versión Preliminar Para Discusión Enero 2008

4.2.2 Geología local 27
4.2.3 Información geotécnica 32
4.2.4 Variación espacial de la humedad natural y velocidad de onda cortante 36
4.2.5 Información sísmica 40
4.2.6 Cruces temáticos y análisis superficial 41
4.2.7 Mapa de zonificación geotécnica 43
4.2.8 Secciones esquemáticas de los depósitos de la ciudad 43
4.3 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA PARA RESPUESTA SÍSMICA 48
4.3.1 Profundidad del basamento rocoso 48
4.3.2 Periodo fundamental del suelo 48
4.3.3 Cruces temáticos y análisis en profundidad 52
4.3.4 Mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica 53
5 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO Y EFECTOS DE SITIO 56
5.1 RESULTADOS DE LOS MODELOS NUMÉRICOS 56
5.1.1 Universidad de los Andes 56
5.1.2 Sociedad Colombiana de Geotecnia 58
5.1.3 Asociación de Ingeniería Sísmica 59
5.2 AGRUPACIÓN DE LOS MODELOS DE RESPUESTA 66
5.3 ZONIFICACIÓN DE EFECTOS LOCALES 67
5.4 CÁLCULO DE ESPECTROS SUAVIZADOS 69
5.4.1 Cerros 70
5.4.2 Piedemonte 71
5.4.3 Lacustre 71
5.4.4 Aluvial 72
5.4.5 Resultados 72
5.5 PARÁMETROS DE DISEÑO 87

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

5.6 CONSIDERACIONES ESPECIALES 90

6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y NORMATIVIDAD 92

6.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LA NORMA ACTUAL 92

6.2 RECOMENDACIONES PARA LA ACTUALIZACIÓN DE NORMATIVIDAD 101

6.2.1 Mapa de zonificación de efectos locales 101

6.2.2 Reclasificaciones 102

6.2.3 Estudios de efectos locales con interacción cinemática suelo-estructura 102

6.2.4 Espectros de diseño 103

6.2.5 Diseño de edificaciones 103

6.2.6 Diseño de cimentaciones 103

6.2.7 Análisis de estabilidad de taludes 104

6.2.8 Diseño de infraestructura 104

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 105

7.1 CONCLUSIONES 105

7.1.1 Metodología 105

7.1.2 Estudios previos y convenios 105

7.1.3 Amenaza sísmica y señales de diseño 106

7.1.4 Zonificación Geotécnica 106

7.1.5 Zonificación de efectos locales y espectros de diseño 107

7.1.6 Comparación de resultados y normatividad 107

7.2 RECOMENDACIONES 108

8 REFERENCIAS 109

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Metodología para la actualización de la zonificación geotécnica y de efectos locales de Bogotá 5

Figura 1.2. Esquema de trabajo con los participantes del proyecto 6

Figura 3.1. Zonas de amenaza sísmica (AIS, 1996) 14

Figura 3.2. Espectro de Amenaza Uniforme (UNIANDES, 2006) 15

Figura 3.3. Acelerogramas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos sin escalar 18

Figura 3.4. Espectros de respuesta de la fuente local 19

Figura 3.5. Espectros de respuesta de la fuente regional 20

Figura 3.6. Espectros de respuesta de la fuente de subducción 20

Figura 3.7. Espectros de respuesta escalados de acuerdo a MZSB (1997) 21

Figura 3.8. Espectros de respuesta escalados de acuerdo a UNIANDES (2006) 22

Figura 3.9. Espectros de respuesta sin escalar promedio más desviaciones estándar 23

Figura 4.1. Esquema metodológico de zonificación 26

Figura 4.2. Modelo tridimensional del terreno de la ciudad 28

Figura 4.3. Modelo tridimensional de pendientes del terreno de la ciudad 28

Figura 4.4. Mapa Geológico Ingeominas 1997 29

Figura 4.5. Mapa Geotécnico Ingeominas 1988 33

Figura 4.6. Mapa Geotécnico Ingeominas 1997 34

Figura 4.7. Localización de exploraciones geotécnicas 35

Figura 4.8. Variación de la humedad natural promedio hasta 50 m de profundidad 37

Figura 4.9. Variación de la velocidad de onda de corte promedio hasta 50 m de profundidad 38

Figura 4.10. Mapa de perfiles típicos superficiales 39

Versión Preliminar Para Discusión Enero 2010

Figura 4.11. Mapa de isoperiodos por microtrepidaciones (UNIANDES, 2006) 40

Figura 4.12. Cruces temáticos – análisis superficial 41

Figura 4.13. Interpretación geotécnica de unidades de abanicos aluviales..... 42

Figura 4.14. Mapa actualizado de zonificación geotécnica 44

Figura 4.15. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 127 a Cl 200 aprox..... 46

Figura 4.16. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 13 a Cl 127 aprox. 46

Figura 4.17. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 36 sur a Cl 13 aprox..... 47

Figura 4.18. Esquema geotécnico típico de una sección norte – sur entre Cr 72 a Cl 86 aprox. 47

Figura 4.19. Modelo de basamento rocoso a partir de gravimetría (Ingeominas, 1997).. 49

Figura 4.20. Modelo de basamento rocoso actualizado por SCG y DPAE..... 50

Figura 4.21. Mapa de isoperiodos de los modelos de respuesta unidimensionales (Uniandes, 2006) 51

Figura 4.22. Cruces temáticos – análisis profundo 52

Figura 4.23. Mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica..... 54

Figura 5.1. Localización de los modelos de respuesta..... 65

Figura 5.2. Distribución de los modelos de respuesta en cada zona 66

Figura 5.3. Mapa de efectos locales de la ciudad de Bogotá..... 68

Figura 5.4. Construcción del espectro suavizado..... 69

Figura 5.5. Variación del amortiguamiento viscoso en función de la frecuencia empleando la formulación del amortiguamiento de Rayleigh (Hashash et al., 2002)..... 71

Figura 5.6. Cálculo del espectro de diseño para la Zona de Cerros..... 73

Figura 5.7. Cálculo del espectro de diseño para la Zona de Piedemonte 74

Figura 5.8. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-50 75

Figura 5.9. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-100 76

Figura 5.10. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-150..... 77

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

Figura 5.11. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-200 78

Figura 5.12. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-250 79

Figura 5.13. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-300 80

Figura 5.14. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-500 81

Figura 5.15. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Aluvial-50 82

Figura 5.16. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Aluvial-100 83

Figura 5.17. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Aluvial-150 84

Figura 5.18. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Aluvial-200 85

Figura 5.19. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Aluvial-250 86

Figura 5.20. Construcción de los espectros de diseño de campos cercano y lejano 88

Figura 5.21. Espectros envolventes de aceleración, velocidad y desplazamiento espectral 89

Figura 6.1. Espectro envolvente propuesto zona de Cerros 92

Figura 6.2. Espectro envolvente propuesto zona de Piedemonte 93

Figura 6.3. Espectros envolventes propuestos Zonas Lacustre de menos de 200 m 93

Figura 6.4. Espectros envolventes propuestos zonas Lacustre de más de 200 m 94

Figura 6.5. Espectros envolventes propuestos Zonas Aluviales 94

Figura 6.6. Diferencia entre los espectros propuestos y los espectros vigentes 95

Figura 6.7. Mapa de Sa máxima vigente 96

Figura 6.8. Mapa de Sa para T = 0.5 s propuesto 97

Figura 6.9. Mapa de Sa para T = 1.0 s propuesto 98

Figura 6.10. Mapa de cambio en Sa para T=0.5 s propuesto y vigente 99

Figura 6.11. Mapa de cambio en Sa para T=1.0 s propuesto y vigente 100

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Amenaza sísmica tenida en cuenta en cada convenio 9

Tabla 2.2. Modelo geotécnico tenido en cuenta en cada convenio 10

Tabla 2.3. Métodos de análisis de respuesta del suelo empleados en cada convenio 11

Tabla 2.4. Métodos de cálculo de espectros de respuesta en superficie empleados en cada convenio 12

Tabla 2.5. Propuestas de actualización del mapa de zonificación sísmica 12

Tabla 3.1. Valores de amenaza sísmica reportados para Bogotá 16

Tabla 3.2. Acelerogramas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos (Adaptado de Martínez et al., 2002) 17

Tabla 3.3. Valores de Amax de las señales de diseño, promedios y desviaciones estándar de cada escenario 19

Tabla 4.1. Descripción de las zonas geotécnicas 45

Tabla 4.2. Descripción de las zonas geotécnicas para respuesta sísmica 55

Tabla 5.1. Sitios modelados por UNIANDES 57

Tabla 5.2. Sitios modelados por SCG 60

Tabla 5.3. Sitios modelados por AIS 62

Tabla 5.4. Número de modelos por zona geotécnica de respuesta sísmica 66

Tabla 5.5. Descripción de las zonas de efectos locales 67

Tabla 5.6. Parámetros espectrales propuestos 87

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

CAPITULO 1

1 INTRODUCCIÓN

Bogotá viene adelantando desde hace varios años diversas actividades en torno a la gestión general del riesgo sísmico del área urbana de la ciudad. Es así como en el año 1993 adelantó los estudios de microzonificación sísmica de Bogotá, MZSB, a través de un convenio interadministrativo entre la Unidad para la Prevención y Atención de Emergencias, UPES, (actual Dirección de Prevención y Atención de Emergencias, DPAE), el Instituto de Colombiano de Geología y Minería, INGEOMINAS y la Universidad de los Andes, UNIANDES. Los resultados de dicho estudio fueron posteriormente adoptados mediante el Decreto 074 de 2001 y el Decreto 193 de 2006, en el cual se consignaron los principales resultados del estudio de microzonificación. En este Decreto se reglamentó la microzonificación misma de la ciudad, es decir se establecen las zonas con comportamiento sísmico similar y se especifican en cada una de ellas los requisitos de diseño sismorresistente que deben tenerse en cuenta para generar una confiabilidad uniforme en los diseños de cualquier tipo de edificación.

Han transcurrido aproximadamente 10 años desde que se publicaron los resultados finales del estudio de microzonificación sísmica de Bogotá, tiempo en el cual es estado del conocimiento ha avanzado considerablemente en diferentes aspectos; tal es el caso de las recientes metodologías para calcular la amenaza sísmica y seleccionar señales de diseño compatibles con los escenarios sísmicos, existe nueva información geotécnica producto de estudios de efectos locales facultados en el Decreto 193 de 2006 y de proyectos importantes como el metro, hay nueva información sísmica local que se ha logrado recopilar en la Red de Acelerógrafos de Bogotá RAB desde su implementación en el año 1999, se cuenta con nuevos procesos y herramientas que permiten la optimización de los tiempos de calculo numérico, el desarrollo de nuevas aplicaciones para el calculo de la respuesta sísmica y el uso de avanzados sistemas de información geográfica.

Por lo anterior, la DPAE desde finales del año 2005 a través del Ingeniero Fernando Ramírez (Director DPAE 2003 a 2006), la Ingeniera Diana Rubiano (actual Directora DPAE) y la participación de representantes de la Sociedad Colombiana de Geotecnia, SCG, la Asociación de Ingeniería Sísmica, AIS y la Universidad de los Andes, UNIANDES, emprendieron labores encaminadas a realizar la actualización del estudio de microzonificación sísmica de Bogotá, definiendo tres instancias para el desarrollo del estudio. En la primera parte se modificó el Decreto 074 de 2001 para involucrar aspectos importantes que estaban fuera de éste, como es el caso de la delimitación de las zonas y especificaciones para los estudios particulares de respuesta, proponiendo así el Decreto 193 de 2006. La segunda instancia corresponde a la actualización de la zonificación sísmica de la ciudad (mapa de efectos locales) y de los espectros de diseño, con base en la información dispone a la fecha, que corresponden a los resultados del presente informe. Finalmente se tiene prevista una fase final de largo plazo, en la que se estudie la tectónica local y regional para actualizar la amenaza sísmica de la ciudad.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

Como ya se indicó, el presente documento técnico presenta los resultados obtenidos en la segunda etapa del proyecto de actualización de la microzonificación, cuyos productos principales son la actualización del mapa geotécnico y de efectos locales de Bogotá, en los cuales se definen las zonas de comportamiento uniforme desde los puntos de vista geotécnico y sísmico. Para ello, se empleó la información geotécnica y sísmica disponible a la fecha y se realizaron convenios interadministrativos con la Sociedad Colombiana de Geotecnia, la Universidad de los Andes y la Asociación de Ingeniería Sísmica, con el fin de evaluar en diferentes sitios y por diferentes metodologías, la respuesta sísmica de los depósitos de la ciudad.

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Actualmente existen nuevas metodologías para el cálculo de la respuesta de sitio ante un sismo y se cuenta con nueva información sísmica y geotécnica, todo esto hace que se puede detallar mejor los análisis de respuesta, dentro de lo cual se destaca:

- Las recientes metodologías para el cálculo probabilístico de la amenaza sísmica, desagregación en escenarios sísmicos y selección de señales compatibles con la amenaza.

- Información sísmica recopilada en la Red de Acelerógrafos de Bogotá - RAB desde su implementación en el año 1999 hasta el año 2007.

- Nueva información geotécnica producto de estudios de efectos locales de acuerdo con el Decreto 074 de 2001 y 193 de 2006, pues en el año 1997 se disponía de menos de 50 sitios con exploraciones iguales o superiores a 50 m mientras hoy en día se cuenta con más de 200 sondeos profundos.

- Nueva información geotécnica de proyectos importantes como el metro y de infraestructura de la ciudad.

- Nuevos modelos de comportamiento dinámico y métodos de análisis numéricos de la respuesta de sitio.

- La optimización de los tiempos de cálculo numérico y el desarrollo de nuevas aplicaciones para el análisis de la respuesta sísmica.

- Avance de los sistemas de información geográfica e información cartográfica de la ciudad.

Luego de varios años de utilización de la normativa vigente se ha identificado una serie de aspectos que merecen ser revisados con respecto a las especificaciones dadas en el Decreto 193 de 2006, dado que estas pueden generar un impacto importante en el nivel de demanda sísmica de diseño de estructuras. Tales aspectos son los siguientes:

- La zonificación sísmica adoptada simplifica de manera importante el comportamiento real de los suelos de la ciudad y lleva a la necesidad de establecer especificaciones de diseño uniformes para zonas que no necesariamente presentan un comportamiento homogéneo.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2009

- Los espectros de diseño especificados no tienen una confiabilidad uniforme para todos los períodos estructurales, lo que se presenta en la existencia de prolongadas mesetas y la falta de control en los desplazamientos espectrales.

- Los espectros de diseño pueden someterse a una serie de correcciones y ajustes con base en los espectros respuesta. Estas correcciones pueden incluir suavizados para eliminación de picos, consideración de la incertidumbre en la determinación del período estructural y consideraciones especiales de respuesta inelástica en suelos blandos.

- Las señales sísmicas empleadas en el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá ha sido revisadas exhaustivamente, concluyendo que no representan adecuadamente los posibles escenarios sísmicos.

Todos los anteriores aspectos llevan a la necesidad de adelantar una serie de trabajos y actividades tendientes a actualizar los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 General

El objetivo general del presente estudio es actualizar la microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá y formular recomendaciones para la reglamentación de diseño estructural sismo-resistente.

1.2.2 Específicos

- Comparar los resultados de respuesta sísmica del terreno obtenidos a partir de tres metodologías de análisis y sintetizar en un modelo común los aspectos relevantes de cada método.

- Revisar los resultados obtenidos de los nuevos análisis de amenaza sísmica realizados por UNIANDES y la selección de señales de diseño compatibles con la amenaza recomendadas por INGEOMINAS, con el fin de establecer los niveles de amenaza sísmica y señales sísmicas para las modelaciones.

- Compilar la información geotécnica recopilada por UNIANDES, SCG y DPAE de manera tal que se integre a un sistema de información geográfica para fines de actualizar la zonificación geotécnica y de efectos locales de la ciudad

- Compilar la información geográfica relevante para realizar la actualización de los mapas de zonificación geotécnica y de efectos locales, tal como: el modelo digital del terreno, los mapas geológicos y geotécnicos anteriores, el modelo de basamento de roca, el mapa de iso-periodos y demás coberturas de información geográfica útiles para zonificar.

- Realizar la actualización del modelo geotécnico de la ciudad, estableciendo la estratigrafía típica, comportamiento geotécnico y distribución espacial, lo cual se resume en el mapa de zonificación geotécnica

Versión Preliminar para Discusión Enero 2006

- Realizar la actualización del mapa de efectos locales o de respuesta sísmica teniendo en cuenta la nueva zonificación geotécnica, el modelo actualizado de basamento rocoso y los resultados de los análisis de respuesta sísmica.

- Organizar y analizar los resultados de las modelaciones de la respuesta de sitio realizadas por la UNIANDES, SCG y AIS para establecer los espectros de diseño acordes con el nuevo mapa de efectos locales propuesto.

- Realizar análisis de sensibilidad de resultados con respecto a la especificación actual.

- Generar recomendaciones para la implementación de los resultados y resumir aspectos importantes que se deben tener en cuenta en la reglamentación futura.

1.3 ALCANCE

El presente informe analiza los aspectos relacionados con la respuesta local de los depósitos de la ciudad ante un sismo, para lo cual se parte de la amenaza sísmica reportada en estudios previos y la información geotécnica disponible de la ciudad.

En esta etapa de actualización del estudio de microzonificación sísmica no se hacen estudios detallados de geología, tectónica y sismicidad para calcular la amenaza sísmica, puesto que está actividad demandaría de mayores recursos, tiempo y participación de Ingeominas quien es la entidad con mayor competencia en este tema y que en el momento se encuentra adelantando la actualización del mapa nacional de amenaza sísmica.

1.4 METODOLOGÍA GENERAL

Para concebir los objetivos propuestos se estableció el diagrama metodológico que se ilustra en la **Figura 1.1**, con el cual se definió el orden de las actividades que se realizaron y la interacción con cada frente de trabajo. A continuación se resumen las principales actividades.

1) Estudios previos e información secundaria.

- Actualización de la amenaza total y desagregada por cada escenario sísmico estudiado (UNIANDES).

- Señales de diseño (INGEOMINAS).

- Registros de la RAB (INGEOMINAS – DPAE).

- Estudios de Efectos Locales (DPAE, SCG).

- Proyectos geotécnicos importantes (UNIANDES – SCG).

- Modelo geotécnico general de Bogotá y mapa actualizado de basamento rocoso (SCG).

- Modelaciones de la respuesta de sitio así: UNIANDES por medio de modelos de espectros uniforme de amenaza, SCG mediante modelos bidimensionales de

Versión Preliminar para Discusión Enero 2009

respuesta y AIS por medio de modelos unidimensionales con sensibilización estadística de parámetros.

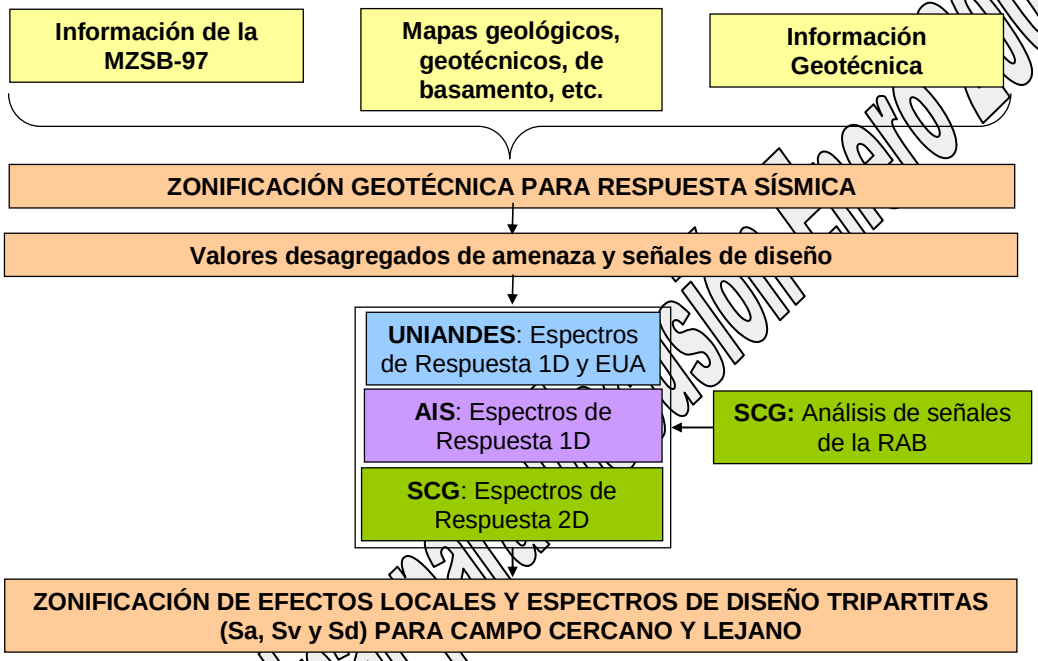


Figura 1.1. Metodología para la actualización de la zonificación geotécnica y de efectos locales de Bogotá

2) Seleccionar los valores de amenaza desagregada y acelerogramas de diseño acordes con las condiciones de amenaza recomendadas.

3) Actualización de la zonificación geotécnica de la ciudad aplicando geo-estadística y herramientas del sistema de información geográfica.

4) Análisis de las respuestas de sitio de cada tipo de modelo con el fin de proponer la zonificación de efectos locales y sus correspondientes espectros de diseño en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento espectral.

En general, se aprecia que la metodología aplicada consistió en recopilar toda la información disponible que fue generada por cada uno de los grupos que participó en el proyecto, luego organizarla y estructurarla en un sistema de información geográfica, para de esta manera analizar integralmente y lograr proponer así la actualización de la microzonificación sísmica reflejado en el mapa de zonificación geotécnica, el mapa de efectos locales y los espectros de diseño.

La manera como se interactuó con cada uno de los grupos que participaron en la actualización de la microzonificación sísmica de Bogotá resumen en la **Figura 1.2**, en la que se aprecia que la DPAE directamente se encargó de la gestión con cada grupo participante, realizó la integración de los resultados para proponer la nueva zonificación y espectros de diseño para finalmente preparar una etapa de socialización de los resultados a la comunidad.

Versión Preliminar para discusión Enero 2008

Es importante mencionar que aparte de los informes de cada uno de los grupos de trabajo, su participación activa en las reuniones técnicas y los valiosos aportes de los representantes de la Universidad de los Andes, Sociedad Colombiana de Geotecnia y Asociación de Ingeniería Sísmica, han servido para que la DPAE actualice el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá y presente a la sociedad un estudio que se puede considerar muy completo a la luz de la información disponible y avances técnicos existentes en el momento.

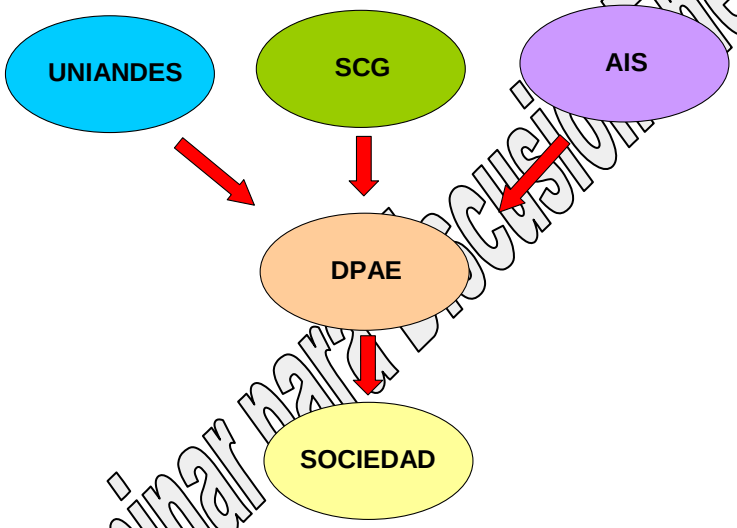


Figura 1.2. Esquema de trabajo con los participantes del proyecto

Finalmente, con base en los resultados presentados en este informe se debe continuar con las siguientes actividades para dar un buen término al proyecto que se adelanta:

1) Presentación y discusión técnica de resultados con distintos actores

2) Incorporación de aspectos relevantes que resulten de las discusiones en la propuesta de actualización de la norma

3) Propuesta de actualización de la normatividad y presentación de la misma

Versión Preliminar para Discusión Enero 2009

CAPITULO 2

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

2 ESTUDIOS PREVIOS Y CONVENIOS INTERADMINISTRATIVOS

Se presentan en este capítulo los aspectos generales de los estudios que se tuvieron en cuenta para la actualización de la microzonificación sísmica de la ciudad. Fundamentalmente se revisó inicialmente el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá (1997), MZSB, y los aportes más importantes realizados por Ingeominas en los últimos años sobre este tema, a partir de esta información se definió la necesidad de actualizar la respuesta sísmica del depósito de la ciudad. Posteriormente la DPAE realizó tres convenios interadministrativos con el propósito aunar esfuerzos para complementar la información geotécnica y modelar la respuesta de sitio de acuerdo a las distintas metodologías existentes. Para finamente desarrollar un estudio integral con la información y participación de cada convenio.

A continuación se resume la información que se tuvo en cuenta y los aspectos generales de los convenios realizados en el marco de la actualización de la microzonificación sísmica de Bogotá.

2.1 ESTUDIO BASE E INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

2.1.1 Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá - MZSB

La información del proyecto de Microzonificación Sísmica de Bogotá (Ingeominas y Uniandes, 1997) fue el punto de partida de los análisis realizados, específicamente se tuvieron en cuenta los siguientes subproyectos:

- Subproyecto 2. Estudios Geológicos
- Subproyecto 6. Microtrepidaciones
- Subproyecto 7. Estudios Geofísicos
- Subproyecto 8. Información Geotécnica
- Subproyecto 9. Ejecución de sondeos
- Subproyecto 10. Ensayos de Laboratorio y de Campo – Zonificación Geotécnica
- Subproyecto 11. Microzonificación Sísmica

Es importante aclarar que dentro de los alcances de este estudio no se incluye una actualización de los estudios de tectónica, neotéctonica y sismicidad regional o local, pues estos temas son de más largo plazo y se podrán en una fase futura, con la participación

de otras entidades, entre ellas necesariamente INGEOMINAS, que en el momento se encuentra adelantando la actualización del mapa nacional de amenaza sísmica.

2.1.2 Señales sísmicas compatibles con la amenaza

Después de publicado el estudio de MZSB en el año 1997, Ingeominas ha continuado estudiando la amenaza sísmica del país. En el año 2002 se publicó en el IX Congreso y IV Seminario Colombianos de Geotecnia, el artículo "Selección de señales de diseño consistentes con el escenario regional de amenaza sísmica: casos aplicados a Colombia" (Martínez A., Alvarado C, Rubiano D., 2002), en este artículo se recomiendan las señales sísmicas compatibles con la amenaza que pueden emplearse para modelar la respuesta de sitio en varias ciudades de Colombia, incluida Bogotá.

2.1.3 Información cartográfica y catastral de la ciudad

En el centro de documentación de la DPAE se encuentra información cartográfica y catastral de la ciudad, la cual está debidamente homologada en el sistema de información geográfica. Dentro de está información se destaca la siguiente:

- Modelo digital del terreno
- Imagen satelital spot (2005)
- Mapa geológico de Bogotá (1997)
- Mapa de espesor de sedimentos (1997)
- Mapa geotécnico de Bogotá (1997)
- Mapa de microzonificación sísmica de Bogotá (1997 y 2001)
- Mapa de la red de drenajes y vial
- Mapa de manzanas, upz y localidades

2.2 CONVENIOS INTERADMINISTRATIVOS

Se realizaron tres convenios interadministrativos con el propósito aunar esfuerzos para modelar la respuesta de sitio de los depósitos de la ciudad de acuerdo con las distintas metodologías existentes, contar con la experiencia de las agregaciones reconocidas en Colombia en este tema y ver de manera integral el problema. A continuación se presentan los objetivos y los aspectos técnicos de cada uno de los convenios:

Convenio de cooperación 667 de 2005 FOPAE – UNIANDES.

- Realizar nuevas evaluaciones de amenaza incluyendo la respuesta dinámica del subsuelo para generar espectros de amenaza uniforme consistentes.
- Revisar la información disponible y presentar una nueva propuesta de zonificación de la ciudad.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

- Implementar el sistema SISBog V1.0 el cual permitirá la visualización de todos los resultados de los análisis de amenaza realizados.

Convenio de cooperación 460 de 2006 FOPAE – SCG.

- Proponer un modelo geotécnico para la ciudad.
- Evaluar, mediante análisis bidimensional la respuesta sísmica del subsuelo.
- Revisar la microzonificación vigente para la ciudad y presentar propuesta de actualización.

Convenio de cooperación 487 de 2006 FOPAE – AIS:

- Realizar análisis unidimensionales, considerando el comportamiento no lineal del subsuelo.
- Evaluar el efecto en posibles periodos estructurales involucrados, determinando situaciones críticas que se lleguen a presentar.
- Hacer la revisión y propuesta de la zonificación sísmica de la cuidad.

Los aspectos más importantes que se tuvieron en cuenta en el desarrollo de cada uno de los trabajos realizados se presentan de manera comparativa de la **Tabla 2.1** a la **Tabla 2.5**, donde se puede apreciar en general el tratamiento de los principales aspectos que contribuyen a la definición del mapa de efectos locales y los espectros de diseño, tales como: las consideraciones sobre la amenaza sísmica, el modelo geotécnico, el método de análisis, la forma de obtener el espectro de diseño y la zonificación sísmica. De este modo se logra identificar las bondades y limitaciones de cada uno de los trabajos, para así fortalecer los criterios de decisión a la hora de combinar o escoger la opción más acertada desde el punto de vista técnico.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

Aspecto	UNIANDES	AIS	SCG
Amenaza en roca	EUA – Variable para la ciudad. Recomienda los siguientes valores Total: 0.175g Cercano: 0.187g Intermedio: 0.165g Lejano: 0.038g	MZSB-97 Total: 0.20g Cercano: 0.25g Intermedio: 0.20g Lejano: 0.038g	Recalcula periodos de retorno Recomienda no escalar las señales Valores Promedio Cercano: 0.12g Intermedio: 0.08g Lejano: 0.032g
Señales	INGEOMINAS sin escalar	INGEOMINAS escaladas	INGEOMINAS sin escalar

Tabla 2.1. Amenaza sísmica tenida en cuenta en cada convenio

Como se aprecia en la tabla anterior la metodología de UNIANDES contempló la reevaluación de la amenaza sísmica considerando los mismos parámetros sísmicos del estudio de MSZB pero empleó un método de cálculo diferente, obteniendo de este modo Espectros Uniformes de Amenaza (EUA) y valores desagregados de amenaza para cada escenario sísmico analizado (Local o cercano, Regional o intermedio y Subducción o lejano). En el caso de AIS se trabajó con los valores desagregados de amenaza reportados en el estudio MZSB y con las señales recomendadas por INGEOMINAS. Finalmente, el grupo de la SCG recomendó trabajar con las señales de INGEOMINAS sin

escalar, sustentando esta decisión principalmente en los problemas numéricos que se ocasionan en las modelaciones bidimensionales al escalar las señales.

Con estos enfoques, se logró considerar las diferentes maneras como se puede abordar las modelaciones con las señales de diseño recomendadas, dado que el efecto del escalamiento o no escalamiento de las señales de diseño ha sido cuestionado por especialistas en el tema.

Sin embargo, es pertinente aclarar que las señales seleccionadas por Ingeominas son el resultado de aplicar la metodología propuesta por Bommer (2000), en la cual la selección de señales sísmicas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos deben ser escaladas a los niveles de amenaza de diseño, siempre y cuando se cumpla con ciertas condiciones. La recomendación de Bommer está basada en que las señales compatibles con la amenaza son representativas en magnitud y distancia, logrando así un contenido frecuencial, duración y magnitud acordes con la fuentes estudiada, por lo cual el escalamiento en magnitud de este tipo de señales es razonable (Martínez et al., 2002 y Bommer J., 2000). El detalle de la evaluación de la amenaza desagregada y las señales de diseño seleccionadas se presenta en el capítulo tres.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

Aspecto	UNIANDES	AIS	SCG
Perfil estratigráfico	MSZB-97, Estudios de Efectos Locales, Proyecto Metro y otros	Estudios de efectos locales y algunos de MSZB-97	Estudios de efectos locales, algunos de MSZB-97
Método de extrapolación del perfil	Perfiles profundos de acuerdo con la zona hasta la roca	Perfiles profundos de acuerdo con la zona y arenas de la formación Subachoque hasta la roca	Perfiles profundos de acuerdo con la zona y arenas de la formación Subachoque hasta la roca
Velocidad de onda	Mediciones in situ y ecuaciones empíricas de acuerdo con el tipo de material	Mediciones in situ y correlaciones con la profundidad a partir de análisis estadísticos de las mediciones de Down Hole	Correlación con la profundidad para zonas lacustre y ecuaciones empíricas para las demás zonas
Curvas dinámicas	Arcillas: Adaptadas de las Modificadas de Ishibashi por SCG Arenas: Seed e Idriss Dmin: 3 y 1.5%	Arcillas: Modificadas de Ishibashi Arenas: Seed e Idriss Residual: Leog Dmin: 1.5%	Arcillas: Modificadas de Ishibashi y MZB-97 Arenas: Seed e Idriss Gravas: Rollins Coluvión: Ingeniería y Georiesgos Turba: Moreno Dmin: 1.5 – 5%

Tabla 2.2. Modelo geotécnico tenido en cuenta en cada convenio

En cuanto a los perfiles estratigráficos y propiedades dinámicas del depósito, cada grupo en general empleó un modelo geotécnico similar, las diferencias encontradas están principalmente en los criterios que cada cual desarrolló para extrapolar información y en las curvas de degradación de materiales particulares como suelos residuales, gravas y turbas.

Para involucrar los diferentes métodos de análisis que se emplean comúnmente en la evaluación de la respuesta de sitio, cada grupo realizó las modelaciones como se indica en la **Tabla 2.3**. De esta manera se buscó que cada método fuese complementario de los otros, por ejemplo, los modelos basados en el espectro uniforme de amenaza tienen la bondad que no dependen de las señales de diseño, por lo cual estos espectros no presentan formas espectrales con picos marcados que son propios de la señal escogida y no necesariamente representan la condición de amenaza estudiada. Por otro lado, los modelos unidimensionales que consideran la variación de los parámetros geotécnicos y la señal de diseño pueden ser más representativos de las condiciones in situ, puesto que se maneja estadísticamente la incertidumbre producida por la variación de estos dos aspectos. Finalmente, los modelos bidimensionales consideran, además de las propiedades geotécnicas, la geometría del depósito y su interrelación con la roca, en ellos se puede apreciar las amplificaciones producidas por los efectos topográficos y el efecto de las ondas superficiales, aspectos que no se logran evaluar en los modelos unidimensionales.

Aspecto	UNIANDES	AIS	SCG
Software	Tipo Shake unidimensional	Tipo Shake unidimensional	Quad4m y Quake bidimensional
Modelo constitutivo	Lineal equivalente con amortiguamiento histerético	Lineal equivalente con amortiguamiento histerético	Lineal equivalente con esquema de amortiguamiento de Rayleigh e histerético
Tratamiento de la incertidumbre de los parámetros	Ninguna	Análisis estadístico con 30 modelos de un mismo perfil variando propiedades y señales	Ninguna
Representación de la respuesta del suelo	Funciones de Transferencia (FT) promedio por cada nivel de amenaza	Relaciones Espectrales (ER)	Funciones de Transferencia (FT) y Relaciones Espectrales (ER) por fuente sísmica con diferentes Amax

Tabla 2.3. Métodos de análisis de respuesta del suelo empleados en cada convenio

En resumen cada uno de los métodos de análisis realizados son complementarios, por lo cual son la zonificación y espectros de diseño, la propuesta más completa de acuerdo con el estado del arte en este tema.

En el cuadro siguiente (**Nota: EUA:** Espectro Uniforme de Amenaza, FT: Función de Transferencia, T: Periodo

Tabla 2.4) se aprecia que para determinar los espectros de diseño se consideraron básicamente los espectros de respuesta de cada sitio modelado, teniendo en cuenta que si se trabajó con los valores de amenaza desagregada de la MZSB el espectro propuesto se define a partir del valor promedio de las respuestas y en el caso de que las señales no se escalaron se define a partir del promedio y la desviación estándar, como se explicará en detalle en el capitulo tres.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2009

Además, es bueno aclarar que el estudio de UNIANDES el espectro Uniformen de Amenaza EUA, no considera el campo cercano, por la falta de parámetros sismológicos y tectónicos, por ello lo involucra el campo cercano de manera determinística.

Las propuestas de espectros de diseño están dadas en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento espectral, logrando así coherencia de los resultados.

Aspecto	UNIANDES	AIS	SCG
Espectro de Respuesta en superficie (ERs)	ERs= EUA x FT Para aceleración, velocidad y desplazamiento	ERs = Señal escalada x Modelos 1D Para aceleraciones	ERs = Señal sin escalar x Modelo 2D Para aceleraciones Análisis de señales RAB
Espectro de Diseño (ED)	ED = ERs suavizado + Campo cercano	Promedio de campo cercan y promedio de campo lejano	Ponderación de cada escenario Espectro tripartita promedio mas desviación estándar
Limitaciones	Valido hasta T<2.5 segundos.	Valido hasta T<3 segundos	Valido hasta T<3 segundos

Nota: EUA: Espectro Uniforme de Amenaza, FT: Función de Transferencia, T: Periodo

Tabla 2.4. Métodos de cálculo de espectros de respuesta en superficie empleados en cada convenio

En cuanto a la propuesta de zonificación (**Tabla 2.5**), UNIANDES era el único grupo que cubría este objetivo, quienes por medio de cruces de información del proyecto MZSB y los modelos de respuesta que realizaron obtuvieron polígonos o zonas de respuesta sísmica homogénea. Sin embargo, esta propuesto no pudo contemplar toda la información que producía la SCG, AIS y DPAE, por lo cual como se mostrará en los próximos capítulos fue necesaria la actualización de la zonificación teniendo en cuenta toda la información disponible a la fecha.

Aspecto	UNIANDES	AIS	SCG
Metodología para obtener las zonas	Cruce temático de: Geología, Geotecnia, Espesores, Isoperiodos y Respuestas espectrales	Fuera de alcance del estudio, se analizó para las zonas actuales	Fuera de alcance del estudio, se analizó para las zonas actuales
Tipo de Zonas	Interpolación espacial de parámetros espectrales	Fuera de alcance del estudio, se analizó para las zonas actuales	Fuera de alcance del estudio, se analizó para las zonas actuales.
Modo de consulta	Módulo de consulta SisBog V1.0	Fuera de alcance del estudio	Fuera de alcance del estudio

Tabla 2.5. Propuestas de actualización del mapa de zonificación sísmica

Los convenios con AIS y SCG consideraron las zonas actuales del estudio MZSB para agrupar los resultados de las modelaciones, logrando así detectar que la variación de las respuestas espectrales es apreciable en cada zona, por ello cuando se definieron espectros de diseño a partir de la envolvente de los resultados de las zonas actuales resulta ser la condición más crítica, lo que lleva a que se sobreestimen las demandas. Lo anterior es una razón más por la cual era necesaria la actualización de las zonas de respuesta sísmica homogénea.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2009

CAPITULO 3

3 AMENAZA SÍSMICA Y SEÑALES DE DISEÑO

En el presente capítulo se resumen los valores de amenaza sísmica total y desagregada adoptados en este estudio, junto con las señales sísmicas que se emplearon en las modelaciones de la respuesta de sitio. Los estudios que se tuvieron en cuenta para tal fin son el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá (Ingeominas y Uniandes, 1997), selección de señales sísmicas compatibles con la amenaza (Martínez et al, 2002) y el estudio de actualización de la información sísmica de Bogotá, realizado por la Universidad de los Andes (Uniandes, 2006).

Para evaluar la información anterior se tuvieron en cuenta los aspectos técnicos de la bibliografía recomendada por la SCG acerca de este tema, algunos de los artículos considerados fueron el de Bommer J. et al., 2000, Bommer J., 2005 y Krinitzsky E., 2002. Finalmente, se recomienda en este capítulo la manera de considerar los valores de amenaza desagregada adoptados que deben cumplir las señales de diseño empleadas en las modelaciones realizadas.

Como se indicó en el numeral 1.3, es importante aclarar que en esta etapa de actualización del estudio de MZSB estuvo fuera del alcance la revisión detallada de la tectónica y sismicidad regional y local, puesto que esta actividad demandaría de mayores recursos y de la participación de institutos como Ingeominas quien es la entidad con mayor competencia en este tema y que en el momento se encuentra adelantando la actualización del mapa nacional de amenaza sísmica. Por lo anterior, los valores reportados y conclusiones dadas en este estudio son el resultado de analizar la información disponible y las recomendaciones de expertos. Sin embargo, los análisis muestran que aún la incertidumbre es alta en la caracterización tectónica de las fuentes sísmicas y en la sismicidad histórica e instrumental, esto muestra la necesidad de continuar con la investigación de estos temas a niveles local y regional.

3.1 Amenaza sísmica total y desagregada

En el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, EGAS, (AIS, 1996), se define que Bogotá está en la zona de amenaza sísmica intermedia con una Aceleración Media Am igual 0.2 g (ver **Figura 3.1**).

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

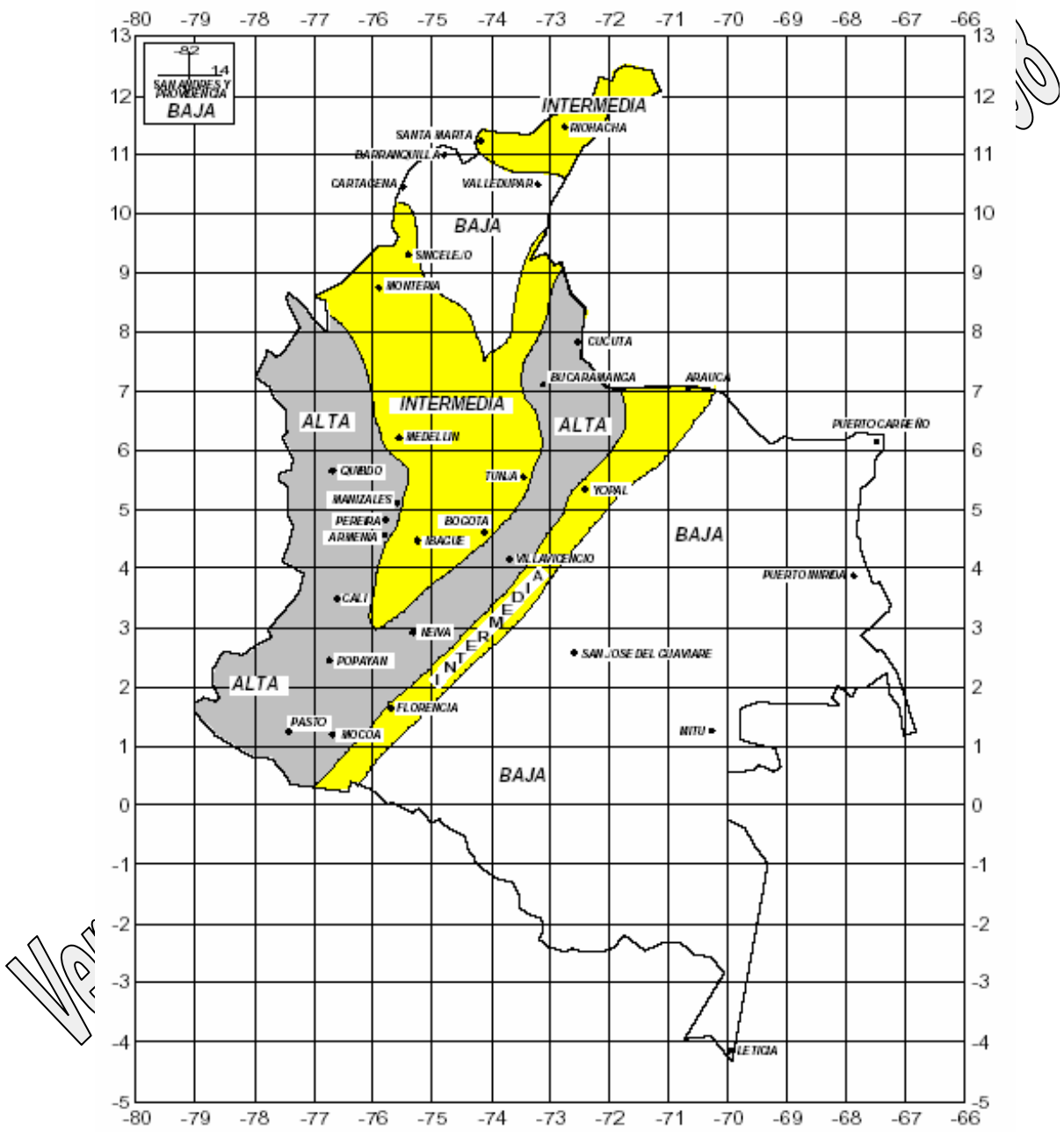


Figura 3.1. Zonas de amenaza sísmica (AIS, 1996)

Por otro lado, en el estudio MZSB se conserva el valor de Am igual a 0.2g y se definen las principales fuentes sismogénicas que pueden llegar a afectar la cuidad, concluyendo que la amenaza está controlada por la posible ocurrencia de un sismo de Fuente Regional a lo largo de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental con un valor de Am igual a 0.2g, por la posible incidencia en la respuesta dinámica en las zonas de depósitos blandos se incluye el escenario de fuente lejana (Subducción, Benioff) con un valor de 0.038g y de igual manera, se propuso un escenario de fuente local (falla de La Cajita, potencialmente activa y en las proximidades de la ciudad) con un valor de Am igual a 0.25g. Es importante mencionar que en el estudio MZSB no es clara la manera como se determinaron los

valores desagregados de la amenaza para cada escenario, además el empleo de metodologías para desagregar la amenaza fue posterior a ese estudio.

En años posteriores se han realizado investigaciones tendientes a reevaluar los valores de amenaza para la ciudad y específicamente para desagregarla de acuerdo con los escenarios sísmicos. Un primer estudio fue realizado por Ingeominas con el objeto principal de seleccionar señales compatibles con la amenaza en el año 2001, (publicado por Martínez et al., 2002), en este estudio se desagregó la amenaza considerando el modelo tectónico del EGAS y la metodología propuesta por Bommer (2000).

Como parte de las actividades desarrolladas en el convenio con UNIANDES en el año 2006, se reevaluó la amenaza sísmica con el mismo modelo tectónico del estudio de MZSB, únicamente se consideraron algunos parámetros diferentes para las fuentes lejanas de subducción, empleando la metodología probabilística (UNIANDES, 2006), en la cual se calcula la amenaza en términos de un Espectro Uniforme de Amenaza, EUA, que define para diferentes periodos de vibración el valor de amenaza en términos de aceleración espectral, denominado uniforme porque cada ordenada o valor de amenaza del espectro tiene mismo periodo de retorno, en la **Figura 3.2** se ilustran los EUA par la Cuidad de Bogotá para varios periodos de retorno.

Versión Discusión Enero 2018

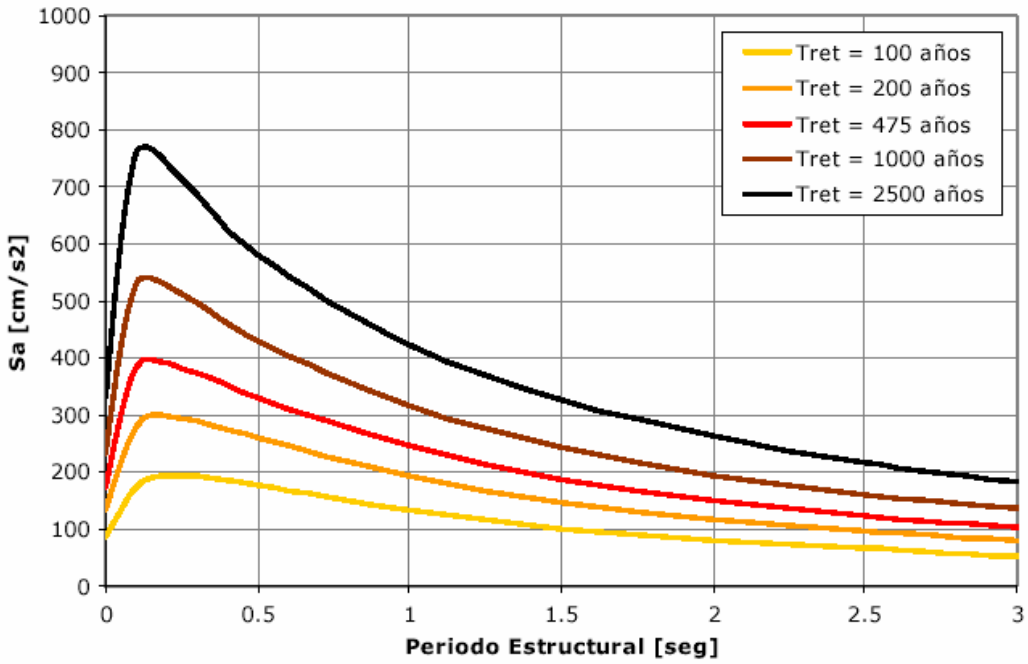


Figura 3.2. Espectro de Amenaza Uniforme (UNIANDES, 2006)

De manera complementaría, UNIANDES desagregó la amenaza en los tres escenarios sísmicos, obteniendo los valores de amenaza total y amenaza por fuente regional a partir de la metodología probabilística de cálculo, el valor de amenaza por fuente lejana corresponde al estipulado en el estudio MZSB y el valor de fuente local se obtuvo a partir de la definición de un escenario sísmico probable consistente con este tipo de fuente (magnitud, M=5.8 y distancia, D=20Km).

El resumen de los valores reportados por cada estudio se presentan en la **Tabla 3.1**, en todos los casos el nivel de amenaza corresponde a una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, es decir, lo cual representa un período de retorno de 475 años.

Estudio	Amenaza Total (g)	Fuente Local (g)	Fuente Regional (g)	Fuente Lejana (g)
MZSB, 1997	0.2	0.25	0.2	0.038
INGEOMINAS, 2002	0.2	0.156	0.134	0.035
UNIANDES, 2006	0.175	0.187	0.165	0.038

Tabla 3.1. Valores de amenaza sísmica reportados para Bogotá

Se analizaron los diferentes valores de amenaza total y amenaza desagregada, concluyendo con base en la información disponible, en las bondades y limitaciones de las metodologías de cálculo de amenaza y en las referencias nacionales e internacionales; que se conserva el valor de amenaza total de 0.2 g para la ciudad, lo cuales compatible con las exigencias normativas (NSR-98), y se adoptan para efectos de la actualización del mapa de efectos locales de Bogotá los siguientes valores de la amenaza desagregada:

- Fuente Local: 0.187 g
- Fuente Regional: 0.165 g
- Fuente Lejana: 0.038 g

3.2 Señales de diseño

La selección de las señales o acelerogramas apropiados se hace a partir de una base de datos real de movimiento fuerte. Para ello es indispensable definir escenarios sísmicos, compatibles con la amenaza como función de las magnitudes de las fuentes y sus distancias al sitio bajo estudio. Los escenarios sísmicos deben ser consistentes con las fuentes sísmicas que han sido determinadas en el estudio de amenaza, y de acuerdo con los parámetros de diseño del movimiento del terreno.

Siguiendo la metodología de selección de registros de movimiento fuerte compatibles con la amenaza propuesta originalmente por McGuire (1978), y atendiendo las modificaciones del estudio por Bommer et al. (2000) se tiene que el área de estudio presenta tres escenarios de amenaza correspondientes a las principales fuentes sismogénicas, como se ilustró en el numeral anterior.

De acuerdo con Martínez et al., (2002) no resulta recomendable simplemente “asumir” el sismo de magnitud máxima asociado a cada zona o falla sismogénica y asignarle la mínima distancia posible desde la fuente al sitio de estudio, ya que representa un caso especial muy conservativo. Por lo tanto, se deben analizar los diferentes escenarios sísmicos teniendo en cuenta la compatibilidad entre fuentes sísmicas y parámetros de diseño de movimiento fuerte. Considerando lo anterior, en Martínez et al. (2002) se aplicó la metodología de Bommer et al. (2000) para el caso de Bogotá D.C. encontrando sismos compatibles para cada escenario sísmico; local, regional y de subducción.

Como resultado de esta selección se recomendó un total de 37 acelerogramas compatibles con la Falla La Cajita, Falla Frontal de la Cordillera Oriental y la zona de

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

subducción, los cuales se deben escalar respectivamente a los valores de amenaza desagregados de cada escenario. Cabe anotar que el escalamiento de los acelerogramas en amplitud resulta adecuado bajo estas circunstancias, considerando que los registros son compatibles con el contenido frecuencial, duración y energía de eventos producidos por estas fallas y se recomienda que el factor de escala sea inferior a 2 (Bommer, 2000).

A mediados del año 2006 la DPAE junto con la SCG escogieron del grupo de 37 acelerogramas 16 señales para realizar los estudios de efectos locales, 6 de fuente local, 5 de fuente regional y 5 de fuente de subducción, las cuales se presentan a continuación en la **Tabla 3.2** y en la **Figura 3.3**.

Fuente	Fecha	Nombre Sismo	Estación	Ms	Amáx (g)
Local	1975/08/01	OROVILLE	ORO.SS	5.6	0.098
	1979/08/06	COYOTE LAKE	GILROY-1	5.7	0.119
	1980/05/25b	MAMMOTH LAKES AFTERSHOCK	LONG VAL.U	5.7	0.101
	1983/07/22	COALINGA AFTERSHOCK	SULPHUR.BH	5.8	0.134
	1984/04/29	UMBRIA	PIETRALUNG	5.4	0.188
	1995/19/01	LA URIBE	SANTA		0.091
Regional	1989/10/18	LOMA PRIETA	YERBABUENA	7.1	0.079
	1994/01/17	NORTHRIDGE	MT.BALDY	6.8	0.073
	1994/01/17	NORTHRIDGE	DEER CANYON	6.8	0.071
	1994/01/17	NORTHRIDGE	NEWPORT	6.8	0.107
	1995/01/16	HYOGO-KEN NANBU (KOBE)	OKAYAMA	6.8	0.081
Subducción	1985/09/19	MEXICO	CERRO DEPI	8.1	0.025
	1985/09/19	MEXICO	CU01	8.1	0.034
	1985/09/19	MEXICO	CUIP	8.1	0.035
	1985/09/19	MEXICO	CUMV	8.1	0.036
	1985/09/19	MEXICO	XALTINGUIS	8.1	0.029

Tabla 3.2. Acelerogramas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos (Adaptado de Martínez et al., 2002)

Versión Preliminar para Discusión Enero 2009

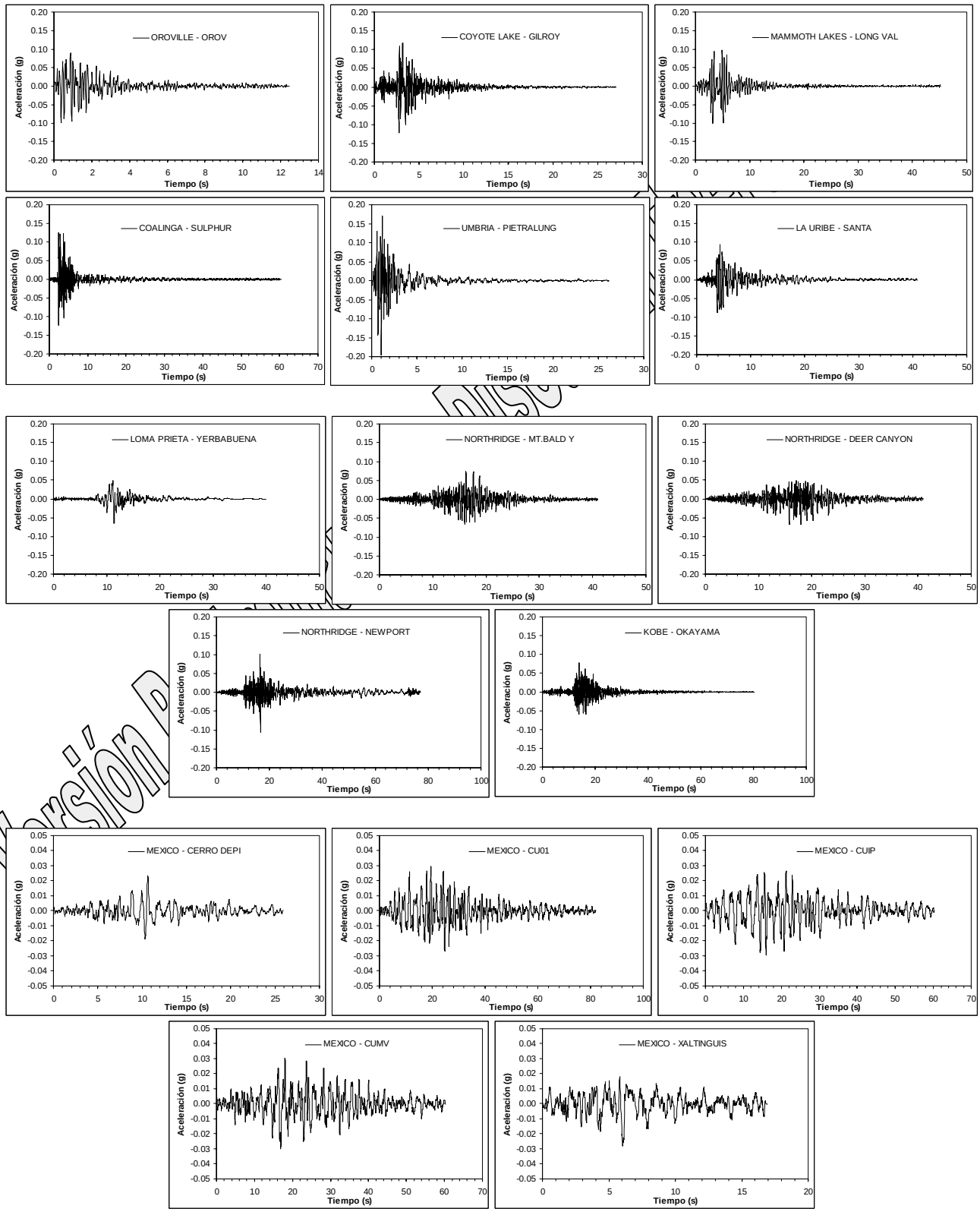


Figura 3.3. Acelerogramas de diseño compatibles con los escenarios sísmicos sin escalar

En la **Tabla 3.3** se observan para cada escenario los promedios y desviación estándar de las señales de diseño, donde se aprecia que para el campo cercano e intermedio los promedios son inferiores a los valores de amenaza desagregados y para el campo lejano es similar este valor. De la **Figura 3.4** a la **Figura 3.6** se ilustran los espectros de respuesta de las señales de diseño de cada escenario sísmico junto con el valor promedio y el promedio más desviación estándar.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

Fuente Local		Fuente Regional		Fuente Subducción	
Sismo	Amax (g)	Sismo	Amax (g)	Sismo	Amax (g)
Oroville	0.098	Loma Prieta - Yerbabuena	0.079	México - Cerro Depi	0.025
Coyote Lake	0.119	Northridge - Mt. Baldy	0.073	México CU01	0.034
Mammoth	0.101	Northridge - Deer Canyon	0.071	México CUIP	0.035
Coalinga	0.134	Northridge - Newport	0.107	México CUMV	0.036
Umbria	0.188	Kobe Okayama	0.081	México - Xaltinguis	0.029
La Uribe	0.091				
Promedio	**0.1218**	**Promedio**	**0.0822**	**Promedio**	**0.0318**
Desviación estándar	**0.0360**	**Desviación estándar**	**0.0145**	**Desviación estándar**	**0.0047**
Amenaza desagregada	**0.187**	**Amenaza desagregada**	**0.165**	**Amenaza desagregada**	**0.038**

Tabla 3.3. Valores de Amax de las señales de diseño, promedios y desviaciones estándar de cada escenario.

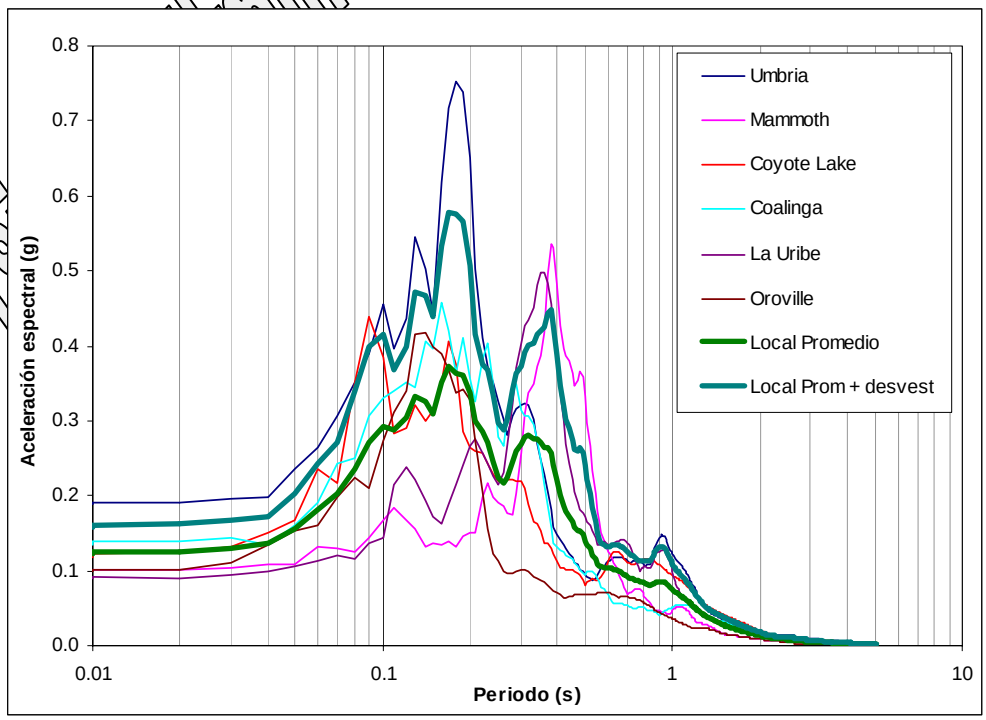


Figura 3.4. Espectros de respuesta de la fuente local

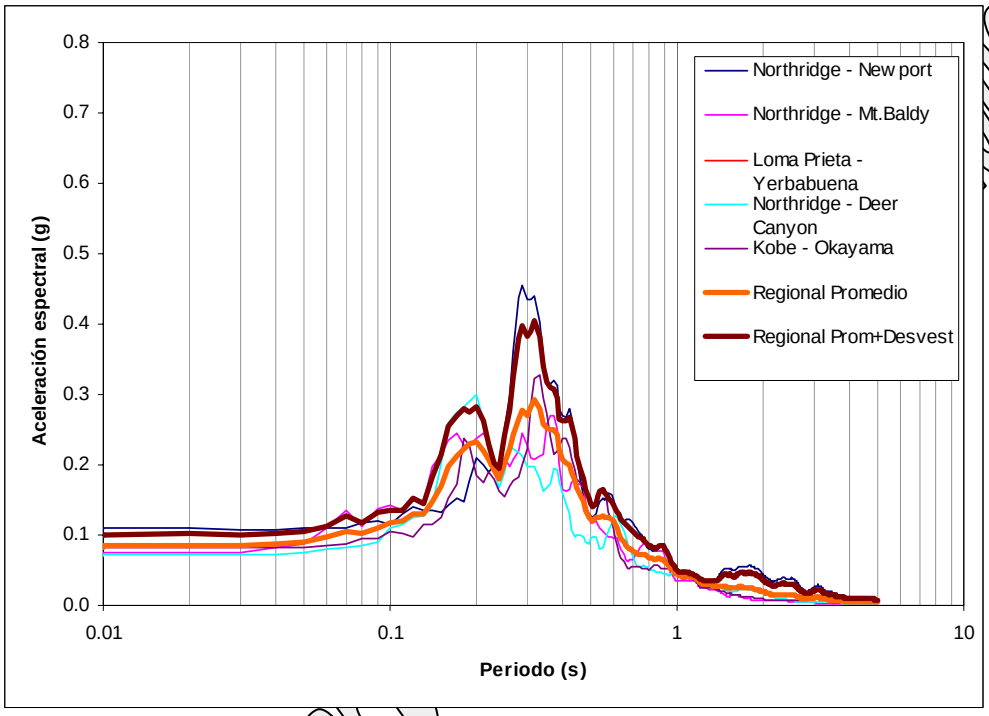


Figura 3.5. Espectros de respuesta de la fuente regional

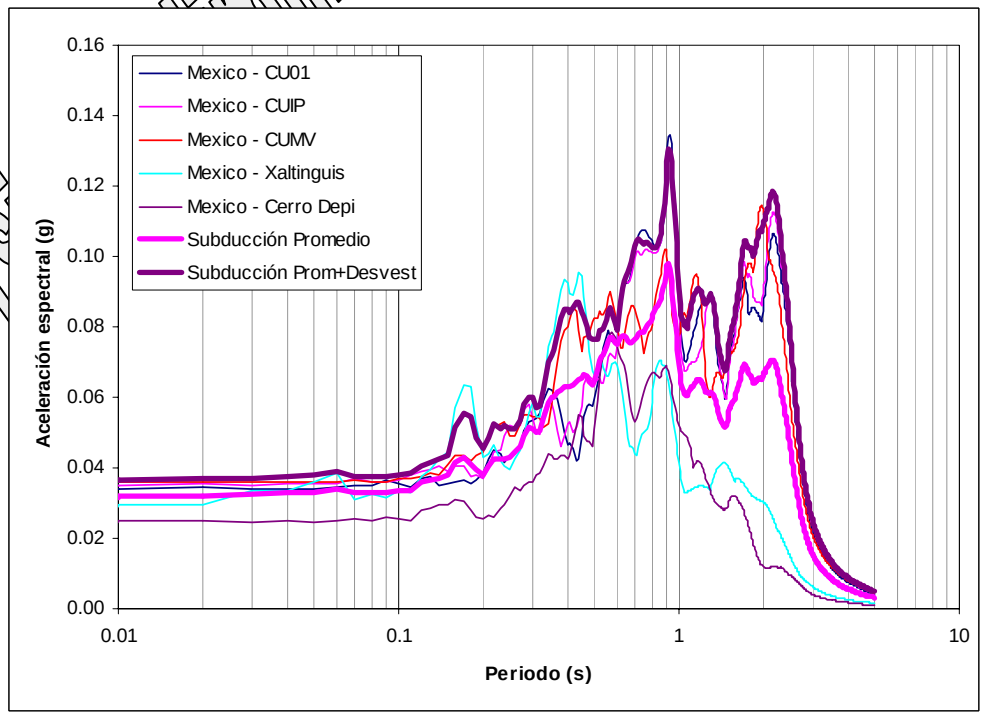


Figura 3.6. Espectros de respuesta de la fuente de subducción

Debido a que las señales sin escalar presentan valores de aceleración máxima inferiores los valores amenaza desagregada de diseño, es necesario buscar la manera de que sean similares los valores de las señales a los de diseño, teniendo el cuidado de no afectar demasiado la forma espectral de las señales. Por lo anterior se consideraron dos opciones, la primera opción es escalar las señales a los niveles recomendados por UNIANDES (2006) y la segunda opción es no escalar las señales y en lugar de ello, considerar la desviación estándar necesaria para cubrir estos niveles.

3.2.1 Escalamiento de las señales de diseño

En la **Figura 3.7** se presentan los espectros de respuesta de las señales de las fuentes local, regional y de subducción escaladas a los valores de la MZSB, es decir, 0.25g, 0.2g y 0.038g respectivamente, junto con el EUA de Bogotá para un periodo de retorno de 475 años, el cual se toma como referencia de acuerdo con la metodología de Bommer (2002), este caso fue el empleado por las modelaciones realizadas por la AIS.

Versión Enero 2009

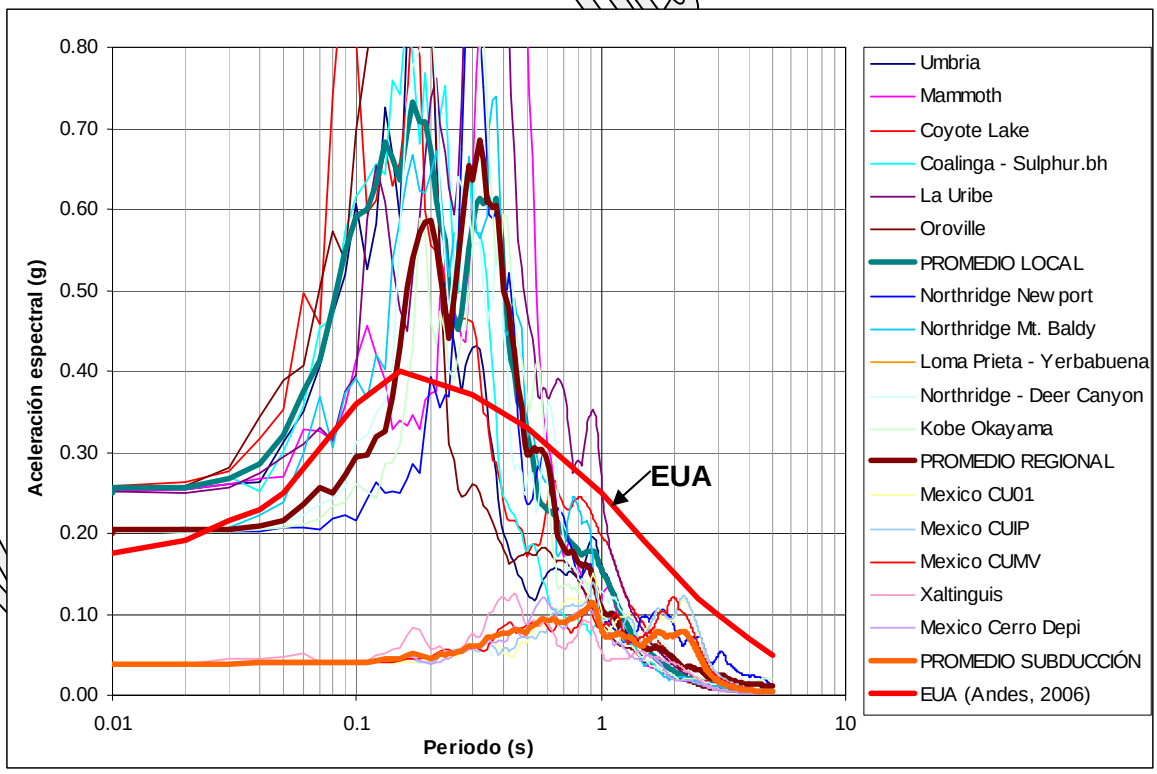


Figura 3.7. Espectros de respuesta escalados de acuerdo a MZSB (1997)

Se observa en la figura anterior que los promedios de las fuentes locales y regionales (línea gruesa) son superiores al EUA entre 0.01 y 0.6s, y para periodos superiores a 0.6s el EUA es superior a los promedios. Esto lleva a que en las modelaciones realizadas por AIS se estén sobrevalorando las aceleraciones espectrales principalmente en los periodos bajos, lo cual se debe tener en cuenta en el momento de definir los espectros de diseño.

En la **Figura 3.8** se presentan los espectros de respuesta de las señales de las fuentes local, regional y de subducción, escaladas a los valores de UNIANDES (2006), es decir, 0.187g, 0.165g y 0.038g respectivamente, junto con el EUA de Bogotá para un periodo de

retorno de 475 años. Se observa que los promedios de las fuentes locales y regionales (línea gruesa) son similares al EUA entre 0.1 y 0.5 s, y para periodos superiores a 0.5 s el EUA es superior a los promedios.

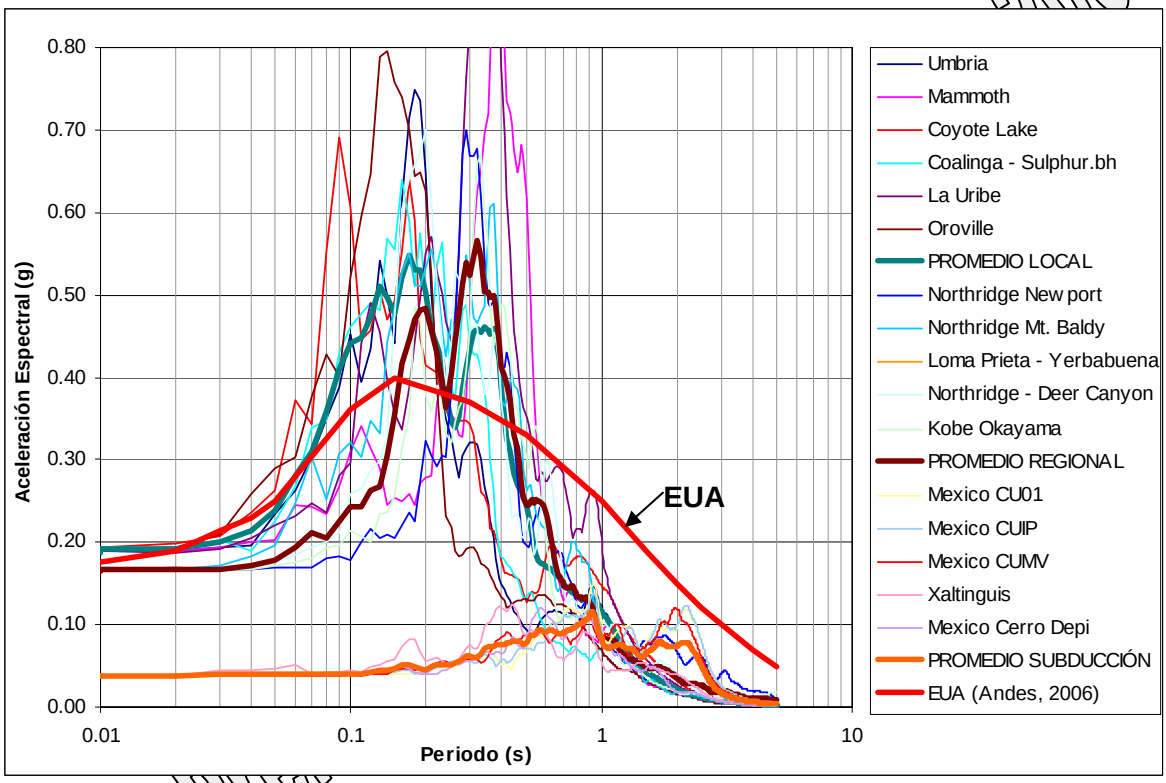


Figura 3.8. Espectros de respuesta escaldos de acuerdo a UNIANDES (2006)

En conclusión, para que las señales de diseño sean consistentes con los análisis de amenaza sísmica recientemente realizados (Ingeominas, 2002 y UNIANDES, 2006) es necesario escalar las señales a los niveles reportados por UNIANDES (2006). En este caso, los espectros de diseño se deben definir a partir de los promedios de las respuestas obtenidas de cada escenario.

Finalmente, se apreció que los valores de amenaza desagregados reportados en el estudio de Microzonificación sísmica de Bogotá de 1997 sobreestiman la amenaza sísmica para el intervalo de periodos bajos.

3.2.2 Desviación estándar de las señales de diseño

Debido a que el escalamiento de las señales puede cambiar la forma espectral y ocasionar problemas en la modelación numérica de la respuesta dinámica, se consideró la opción de modelar sin escalar las señales, y en vez de ello, definir los espectros de diseño considerando la desviación estándar necesaria para hacer estos resultados compatibles con la amenaza de diseño, este fue el caso de las modelaciones realizadas por UNIANDES y la SCG.

En vista de lo anterior, para cubrir los niveles de amenaza de las señales de diseño y comparando las formas espectrales respecto a los promedios de las señales escaladas

Versión Preliminar 2010

se obtuvo que se requiere 1.5 desviaciones estándar para acercarse a una aceleración promedio y a una forma espectral similar de la fuente local. Para la fuente regional es necesario aumentar 3.0 desviaciones estándar para aproximarse a la aceleración promedio y la forma espectral, y en al caso de las señales de subducción se aprecia que considerando el promedio únicamente es suficiente para representar la aceleración media y la forma espectral. Los resultados de aplicar las condiciones anteriores se pueden apreciar en la **Figura 3.9**.

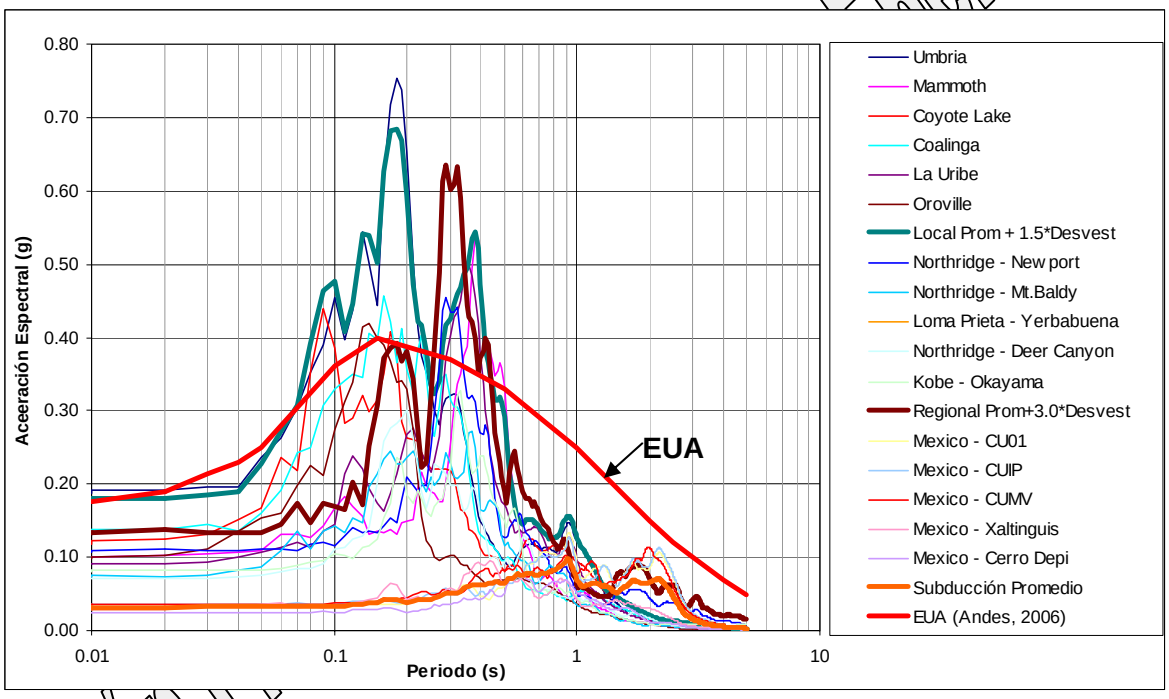


Figura 3.9. Espectros de respuesta sin escalar promedio más desviaciones estándar

En conclusión, para lograr normalizar a los niveles de amenaza sísmica de diseño (475 años) los resultados obtenidos en las modelaciones realizadas por cada uno de los grupos de trabajo, se consideró que los modelos unidimensionales trabajados por la AIS, que emplearon las señales escaladas, se trabaja con los promedios de las respuestas espectrales para todos los escenarios, considerando además que las aceleraciones espectrales entre 0.1 a 0.5s están sobrevaloradas; mientras que los modelos de unidimensionales realizados por UNIANDES y bidimensionales desarrollados por la SCG, se emplearon las señales sin escalar, por lo cual se trabajará para la fuente local con el promedio más 1.5 veces la desviación estándar, para la fuente regional con el promedio más 3.0 veces la desviación estándar y para la fuente de subducción con el promedio.

3.2.3 Observaciones adicionales

Como se observa en las figuras anteriores y de acuerdo con lo reportado en cada uno de los convenios acerca de las señales de diseño, se presentan las siguientes observaciones que se tendrán tenidas en cuenta en el momento de definir los espectros de diseño de cada zona.

Versión Marzo 2009

- La señal de Loma prieta – Yerbabuena tiene una forma espectral atípica, debido posiblemente a un efecto de sitio, por lo cual fue descartada en los análisis de resultados.

- Los espectros de respuesta del sismo de México de la Cuidad Universitaria (CU01, CUIP y CUMP) son prácticamente iguales y presentan un pico a los 2 s (Figura 3.6), lo cual ocasiona que esta señal tenga demasiado peso al momento de definir el promedio para la construcción del espectro de diseño. Adicionalmente, de acuerdo con las recomendaciones de la SCG (2007) este sismo puede ser representativo únicamente de las condiciones particulares de la zona de subducción de Centro América, por lo cual considerar esta señal puede conducir a sobrevalorar las amplificaciones en los periodos altos. Finalmente, con base en estos análisis se considerara en los resultados únicamente una de las señales de la Cuidad Universitaria de México en el promedio para definir el espectro de diseño.

- El EUA en comparación con las señales compatibles con la amenaza presenta menores valores para periodos entre 0.1 a 0.5 s y mayores valores a partir de 0.5 s, además la forma espectral no presenta control de desplazamientos, esto es fundamental a la hora de analizar los resultados de los espectros uniformes de amenaza en suelo, puesto que se puede llegar a subvalorar los resultados en los periodos bajos y sobrevaloranos en los periodos altos.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

CAPITULO 4

4 MODELO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO DE LA CIUDAD

En el presente capítulo se resumen los análisis geotécnicos realizados para concebir un modelo geológico – geotécnico de los depósitos de la ciudad de Bogotá. Para ello se articuló en el sistema de información geográfica una gran cantidad de información con el fin de facilitar la interpretación de los datos, logrando así un modelo que se resume en los mapas de zonificación geotécnica y zonificación geotécnica para respuesta sísmica, con los cuales se abordaran los resultados de los análisis de respuesta de sitio presentados en el siguiente capítulo.

Con base en la resolución de las diferentes coberturas de información se odoptó como escala de trabajo para los análisis de información 1:20.000 y para la presentación de los mapas finales se empleó una escala de 1:50.000.

4.1 METODOLOGÍA DE ZONIFICACIÓN

La metodología general para la elaboración de la zonificación por efectos locales se explicó en el Capítulo 1, pero conforme con los requerimientos específicos que se dieron a lo largo del desarrollo de las investigaciones, ésta fue objeto de ajustes se considero conveniente plantear una zonificación para los niveles mas superficiales (0 a 50 m) que se denomina propiamente *"Zonificación Geotécnica"* y otra que considera el depósito completo hasta la roca y se tienen en cuenta variables que afectan su comportamiento dinámico se llama *"Zonificación Geotécnica para Respuesta Sísmica"*. En la **Figura 4.1** se presenta el diagrama de flujo e información empleada para zonificar la ciudad.

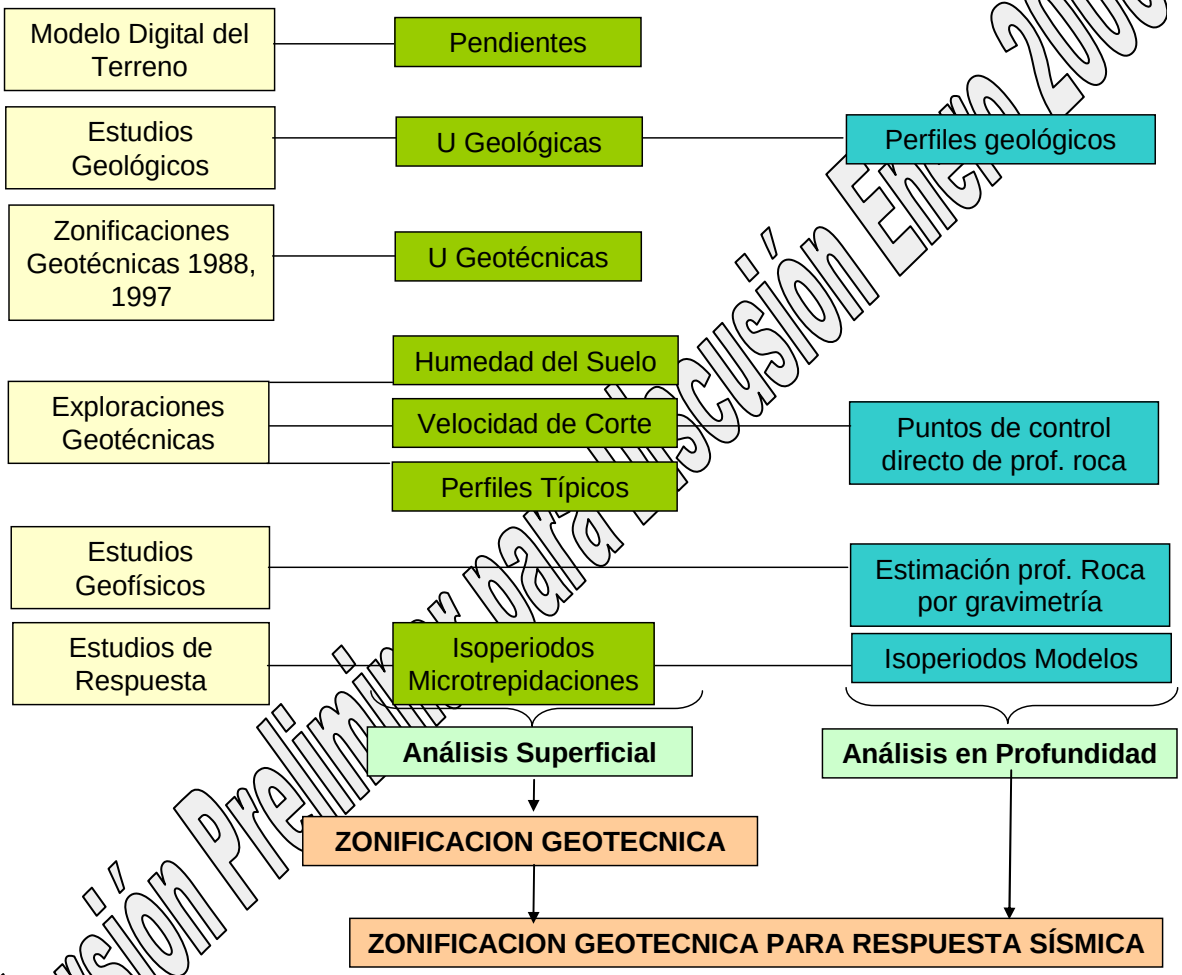
En general, la metodología consiste en realizar de una forma sistemática la integración de la información multidisciplinaria, tal como la geológica, la geofísica y la geotécnica. Para ello, se partió de las diferentes temáticas trabajadas, de las cuales se han generado coberturas de información. Paso seguido se analizan las coberturas bajo dos enfoques: uno a nivel superficial y otro a nivel de todo el depósito o en profundidad; para obtener finalmente la zonificación geotécnica a partir de los análisis superficiales y la zonificación geotécnica para respuesta sísmica al combinar los análisis superficiales y profundos.

En los análisis superficiales se utilizaron técnicas geo-estadísticas y con base en los resultados de elaboraron mapas de la variación de algunos parámetros geotécnicos, or otro lado se realizaron cruces temáticos con el modelo digital del terreno, las unidades geológicas, zonas geotécnicos anteriores e isoperidos por microtrepidaciones. El fin de estos análisis es diferenciar dentro de una misma unidad geológica la presencia de zonas geotécnicas.

En el análisis en profundidad o de todo el depósito se tienen en cuenta los perfiles geológicos, el mapa de profundidad del basamento rocoso y el mapa de isoperiodos fundamentales del depósito, con ellos se puede concebir el modelo tridimensional de los

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

sedimentos de la cuenca y lograr diferenciar así, para efectos de la respuesta de sitio, zonas de comportamiento sísmico homogéneo.



Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

Figura 4.1. Esquema metodológico de zonificación

Finalmente, al integrar los análisis superficiales y profundos se obtienen las zonas geotécnicas para respuesta sísmica, que presentaran un comportamiento sísmico homogéneo por tener en cuenta tanto la composición y caracterización geomecánica de los materiales presentes superficialmente, como las características generales de todo el depósito.

Dado que el proceso de análisis incorpora varios tipos de información, es necesario estructurar cada temática involucrada en coberturas de información. Para ello, la información se articuló en un Sistema de Información Geográfica SIG (ArcGis by ESRI) con el fin de poder realizar los análisis de interpolación y observar la variación espacial de algunos de los parámetros geotécnicos.

Cabe anotar, que a pesar de que se cuenta con información en varios puntos y que se hizo una evaluación geo-estadística, buena parte del ajuste y refinamiento de los mapas han sido de carácter eurístico, es decir, con base en el buen criterio y juicio del conocimiento del modelo geológico – geotécnico y de la mecánica de suelos aplicada, combinado con herramientas de los Sistemas de Información Geográfica, SIG.

4.2 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

A continuación se resumen las características generales de la información que se tuvo en cuenta para realizar la actualización de la zonificación geotécnica de Bogotá y se presenta una síntesis del tratamiento que se le dio a cada una para tal fin.

4.2.1 Modelo digital del terreno

A partir del modelo digital del terreno que dispone el centro de documentación de la DPAE, que tiene una resolución de píxel de 30 por 30 m, lo que equivale a una escala de trabajo aproximada de 1:30.000, se elaboraron los modelos digitales de elevación del terreno (**Figura 4.2**) y de pendientes (**Figura 4.3**). El fin de estos mapas fue identificar los rasgos geomorfológicos del terreno y diferenciar aproximadamente en unidades básicas como cerros, piedemonte, cono aluvial, planicie y llanuras de inundación.

Por otro lado, con el modelo digital del terreno e posible tener la imagen tridimensional de las formas geológicas presentes en la ciudad, lo cual permite tener una orientación más completa que la dispuesta en los mapas convencionales.

En general, a partir de estos mapas se puede ver que la cuidad de Bogotá está bordeada en el extremo oriental por los Cerros Orientales, que poseen una altura superior a los 3400 msnm, al costado sur se encuentran los Cerros del Sur, con una altura que oscila entre los 3100 y 3200 msnm, y por el lado norte y occidental de la ciudad se limita con el río Bogotá.

La zona de planicie, donde se desarrolla la mayor parte de la ciudad, tiene una altitud de los 2600 a los 2550 msnm que desciende en sentido oriente occidente. En la zona norte de la ciudad, en medio de la planicie, aflora el cerro de Suba con una altura aproximada de 2700 msnm.

En cuanto a las pendientes del terreno, se encuentran los valores más altos en la zona de los Cerros Orientales y en los Cerros del Sur, con valores que varían entre 15 y 30% aproximadamente. En las zonas de piedemonte las pendientes son medianas, variando entre 5 y 15% aproximadamente, y en la planicie, como tal son muy bajas, inferiores al 5%.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

4.2.2 Geología local

Para los análisis de zonificación se empleó el mapa geológico del estudio de MZSB, el cual fue realizado por Ingeominas y presentado en el año 1997. Este mapa fue trabajado a escala 1:25.000. Para efectos de presentación en este informe, se agruparon las formaciones rocosas, dicho mapa se ilustra en la **Figura 4.4**.

En general, geológicamente la ciudad se localiza sobre un extenso relleno sedimentario que conforma la Sabana de Bogotá y está rodeada por cerros constituidos por rocas de tipo areniscas, arcillolitas y conglomerados (Ingeominas, 1995).

A continuación se presenta la descripción resumida de las unidades geológicas, cuyos detalles se puede consultar en el Subproyecto 2 del estudio de MZSB (Ingeominas & Uniandes, 1997).

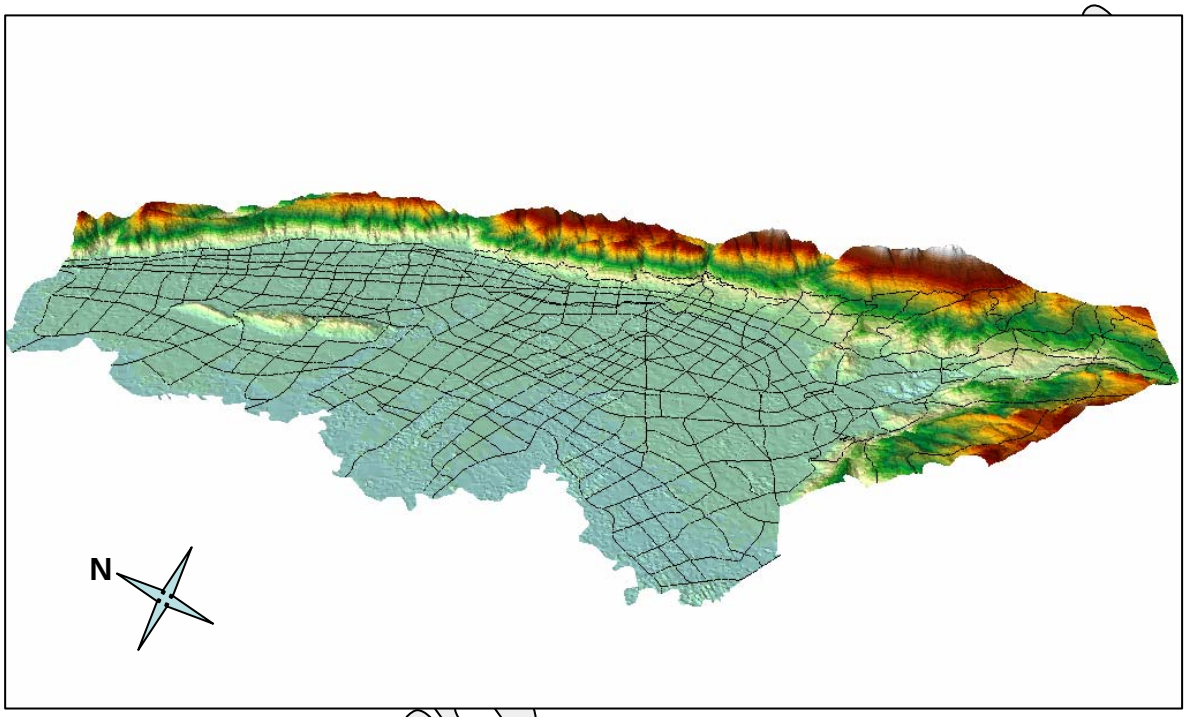


Figura 4.2. Modelo tridimensional del terreno de la ciudad

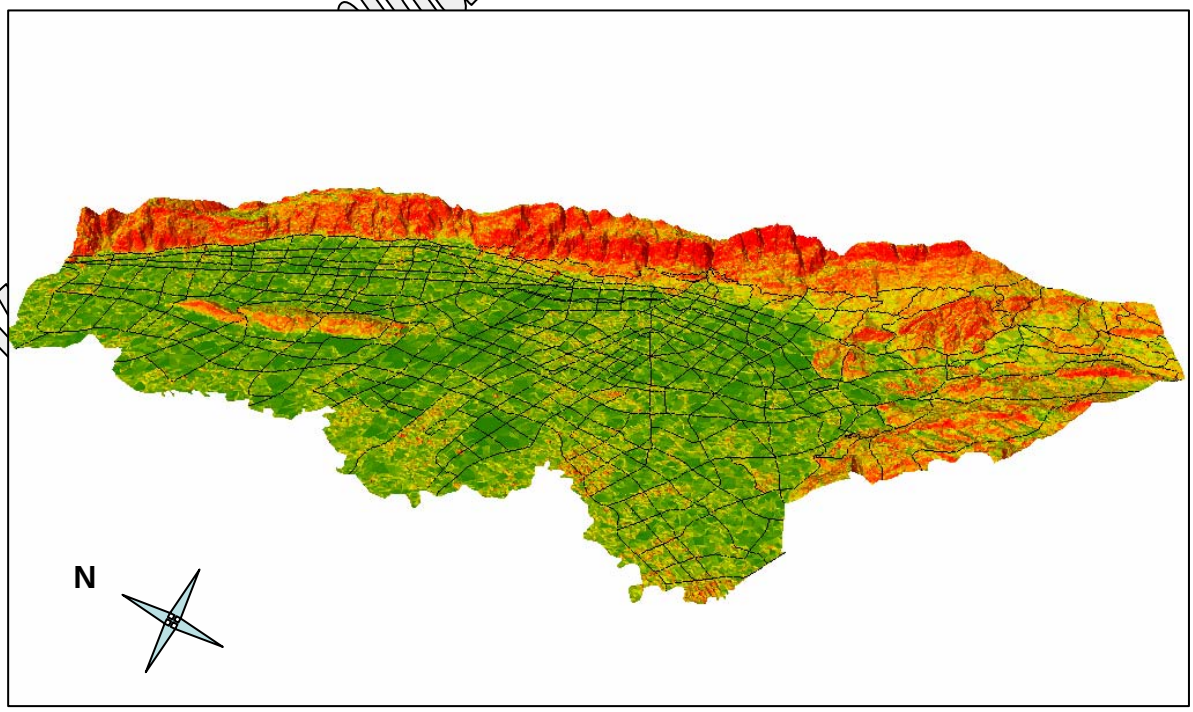


Figura 4.3. Modelo tridimensional de pendientes del terreno de la ciudad

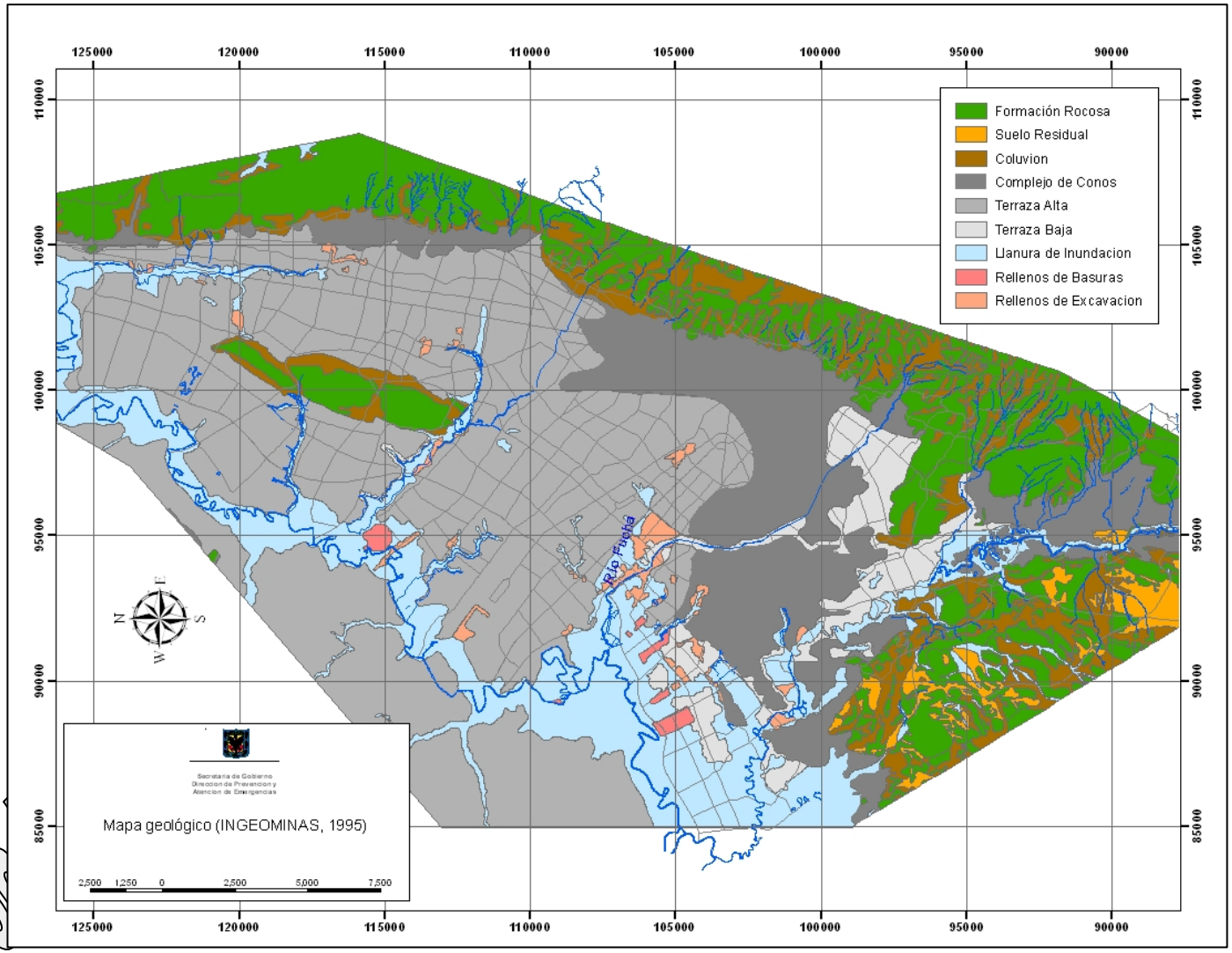


Figura 4.4. Mapa Geológico Ingeominas 1997

Versión

Formaciones Rocosas: En el área de estudio afloran rocas sedimentarias de origen marino y continental, dentro de estas formaciones se encuentran de la más antigua a la mas joven las siguientes: Chipaque (Ksch), Guadalupe (Ksg), Arenisca Dura (Ksgd), Plaeners (Ksgp), Labor-Tierra (Ksglt), Guaduas (KTg), Cacho (Tpc), Bogotá (Tpb), Arenisca La Regadera (Ter) y Usme (Tu).

Suelo Residual (Qrs): Es el material producto de la meteorización de las rocas y son importantes por su espesor, hasta de 10m, presentes en la parte sur oriental de la ciudad. Por tratarse de suelos predominantemente arcillosos, su permeabilidad es baja y su comportamiento geomecánico pobre. Las unidades que han permitido un amplio desarrollo de estos suelos son las formaciones de composición arcillosa, tales como: Chipaque, Plaeners, Guaduas, Bogotá, Usme y Regadera.

Coluvión o Derrubios de Pendiente (Qdp): Son los depósitos productos de la fracturación, meteorización y erosión de rocas preexistentes, que han sido transportados por acción de la gravedad y se han depositado en las partes media e inferior de las laderas. Sus mejores afloramientos se presentan en los piedemontes orientales, sur oriental y sur occidental. Dentro del área de estudio de presentan dos tipos de depósitos de esta clase: coluviones, donde existe predominio de matriz fina sobre el material grueso y talus donde predomina el material grueso.

Complejo de Conos o Abanicos (Qcc): Dentro de esta unidad se agrupan el Cono del Río Tunjuelo, el Cono de Terreros, Depósitos de Flujos Torrenciales y los Conos del piedemonte oriental de Bogotá, como el de San Cristóbal y Claret, entre otros. La composición, textura, espesor y la edad son variables y se difieren para cada depósito de acuerdo a las fuentes de aporte, distancia y tipo de transporte. En general esta unidad se componen de bancos de bloques, guijarros y guijos dentro de una matriz areno arcillosa en las zonas apicales y hacia las partes distales se encuentran materiales predominantemente arenosos y limo arcillosos.

Depósitos Fluvio – Lacustre (Terraza Alta, Qta): Llamada también Formación Sabana por Hubach (1957) y Helmens (1990) este depósito esta constituido por arcillas plásticas con lentes de arena suelta e intercalaciones de cenizas volcánicas, en algunos sectores se presentan varios niveles de turbas hasta de 1 m de espesor. Esta unidad constituye el relleno más importante de la Sabana, siendo su origen lacustre.

Depósitos Fluvio – Lacustre (Terraza Baja, Qtb): Llamada también Formación Chía por Helmens (1990) esta unida corresponde a depósitos originados por los ríos Bogotá, Tunjuelo, Juan amarillo y Fucha. Presenta geoformas planas a ligeramente onduladas, muy poco disectadas, las cuales se elevan unos 5 m en promedio sobre las llanuras aluviales. Su composición es predominantemente limo arcilloso y el ambiente de depositación se considera fluvial.

Llanura de inundación (Qlla): Llamada también Formación Chía por Helmens (1990) en esta unidad están los depósitos más jóvenes de los ríos Bogotá, Tunjuelo y algunos de sus afluentes. Estos depósitos constan de arcillas y limos, con un espesor promedio de cinco metros y son materiales de un ambiente fluvial y localmente lacustre.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2009

Rellenos de Basuras (Qb): Están conformados por desechos sólidos que produce la ciudad y se han concentrado en los rellenos sanitarios de: El cortijo, Gibraltar, Santa Cecilia y Doña Juana.

Rellenos de Excavación (Qr): Son los depósitos que han resultado de acciones antrópicas para la adecuación de terrenos principalmente en las zonas de humedales deprimidas, estos abundan en varias partes de la ciudad, alrededores de Guaymaral, Aeropuerto el Dorado, Autopista norte y Norte de Bosa.

De manera complementaría, en el estudio del Subproyecto 2 – Estudios Geológicos, se presenta la evolución geológica de los depósitos que conforman la ciudad, de donde se destacan los siguientes aspectos acerca de la acumulación de los depósitos en la cuenca de la Sabana:

- Los movimientos tectónicos – orogénicos se origina el desarrollo de la cuenca sedimentaria de la actual Sabana de Bogotá, la cual se inicia alrededor de hace 3.5 millones de años.

- Las condiciones de sedimentación de las partes marginales de la cuenca fueron gradualmente trasladadas a la parte central y dentro de un ambiente lacustre fluvial se depositaron en el Plioceno Superior – Pleistoceno Inferior los sedimentos de la Formación Tilatá Superior.

- Durante el Pleistoceno Inferior hubo un desarrollo gradual de la cuenca que da como resultado la configuración actual de la misma y dentro del mismo ambiente o complejo lacustre fluvial, se depositan los sedimentos de la Formación Subachoque.

- Como consecuencia de las glaciaciones que tuvieron lugar hace 2.7 a 2.4 millones de años, una importante fase de reajuste tectónico de la cuenca de la Sabana resultó en un ambiente lacustre de mayor profundidad (transición Formaciones Subachoque y Sabana), que tuvo lugar alrededor de hace 1 millón de años.

- Durante el Pleistoceno Medio y Superior el área corresponde a lo que hoy es la parte central de la Sabana, fue por mucho tiempo ocupada por un gran lago, el cual originó la depositación de los sedimentos de las terrazas altas (Formación Sabana).

- Posteriormente con la influencia de las condiciones de alternancia glacial e interglacial en los alrededores montañosos (Páramo de Sumapaz) se depositaron localmente en la región sureste (parte media e inferir de la cuenca del río Tunjuelo), los sedimentos fluvio-glaciales que conforman el Cono de Tunjuelo.

- Durante la parte superior de la última glaciación hubo un marcado descenso del nivel de las aguas de la gran laguna de la Sabana, que finalmente llevo a su desaparición que fue datada alrededor de hace 40.000 a 28.000 años.

- Durante los últimos 10.000 años de tiempo geológico se llego a la colmatación final de los lagos de la sabana y al proceso de desecación de los mismos, en el cual los ríos que la cruzaron depositaron arcillas de inundación (Llanura Aluvial).

- Finalmente, desde aproximadamente 3.000 años, localmente fueron depositados sedimentos limosos correspondientes a las Llanura Aluviales (Formación Chía).

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

4.2.3 Información geotécnica

4.2.3.1 Zonificaciones geotécnicas anteriores

Fueron tenidas en cuenta las zonificaciones geotécnicas realizada en el año 1988 y 1995 por ingeominas, esta última hace parte del estudio de MSZB. Estas zonificaciones se basaron principalmente en el mapa geológico de Bogotá y en alrededor de 40 exploraciones profundas, cientos de sondeos someros y descripciones estratigráficas de pozos de agua. En la **Figura 4.5** y en la **Figura 4.6** se presentan estas zonificaciones geotécnicas.

En general, a partir de estos trabajos en la ciudad de Bogotá se identifican cinco zonas con características geomecánicas homogéneas, que de acuerdo al estudio de MZSB se describen a grandes rasgos de la siguiente manera:

Roca o zona montañosa: caracterizada por la presencia de areniscas duras resistentes a la erosión y arcillositas cuya resistencia y deformabilidad depende de su humedad.

Piedemonte o conos de deyección: conformado por materiales que bajo el efecto de la gravedad se han transportado y depositado en forma de cono o abanico, donde predominan los materiales granulares gruesos con matriz arcillosa.

Suelos duros: predominan las arcillas preconsolidadas con intercalaciones de arena y suelos arenosas de origen aluvial.

Suelos blandos: caracterizados por la presencia de arcillas blandas de alta compresibilidad y de origen lacustre.

Ronda de ríos y humedales: pertenecen a esta zona los cuerpos de agua de la ciudad, tales como: humedades, antiguos lagos y zonas de inundación.

4.2.3.2 Exploraciones geotécnicas

En la actualidad la DPAE cuenta con una recopilación importante de exploraciones geotécnicas realizadas en toda la ciudad, dentro de esta información esta:

- Exploraciones del estudio de MZSB.
- Exploraciones para la línea del Metro suministradas por UNIANDES.
- Exploraciones suministradas por la SCG de infraestructura y edificios.
- Exploraciones realizadas en los estudios de efectos locales.

Esta información fue compilada por la SCG, UNIANDES y DPAE, logrando consolidar las características y propiedades geotécnicas de cada exploración, para posteriormente identificar variaciones espaciales de algunos parámetros geomecánicos. La distribución de la información se puede apreciar en la **Figura 4.7**, donde se destaca el buen cubrimiento en el piedemonte, en la zona lacustre y conos aluviales. Se identifica igualmente un menor número de exploraciones en la zona sur de la ciudad y hacia la llanura de inundación del río Bogotá.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

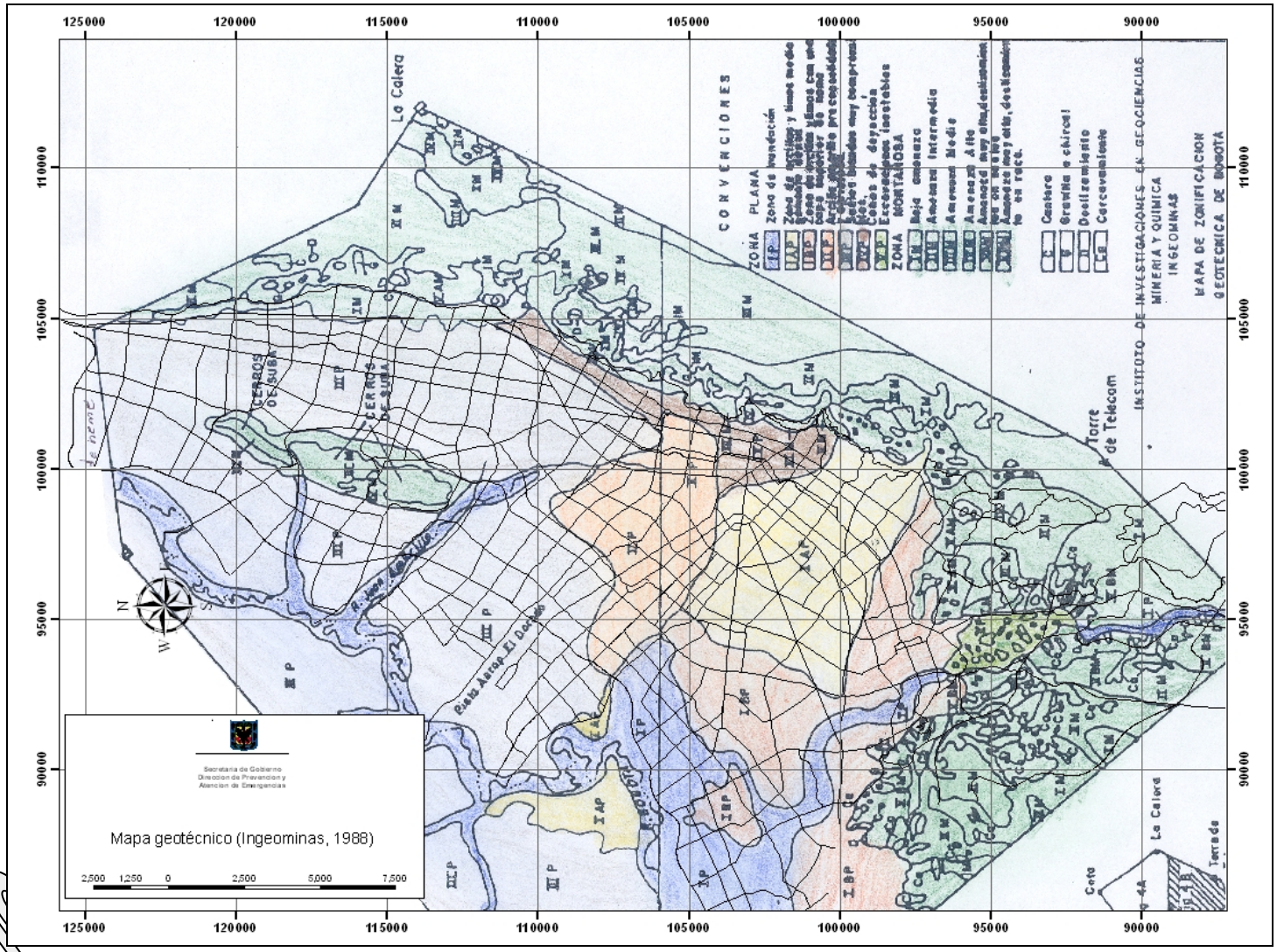


Figura 4.5. Mapa Geotécnico Ingeominas 1988

Versión

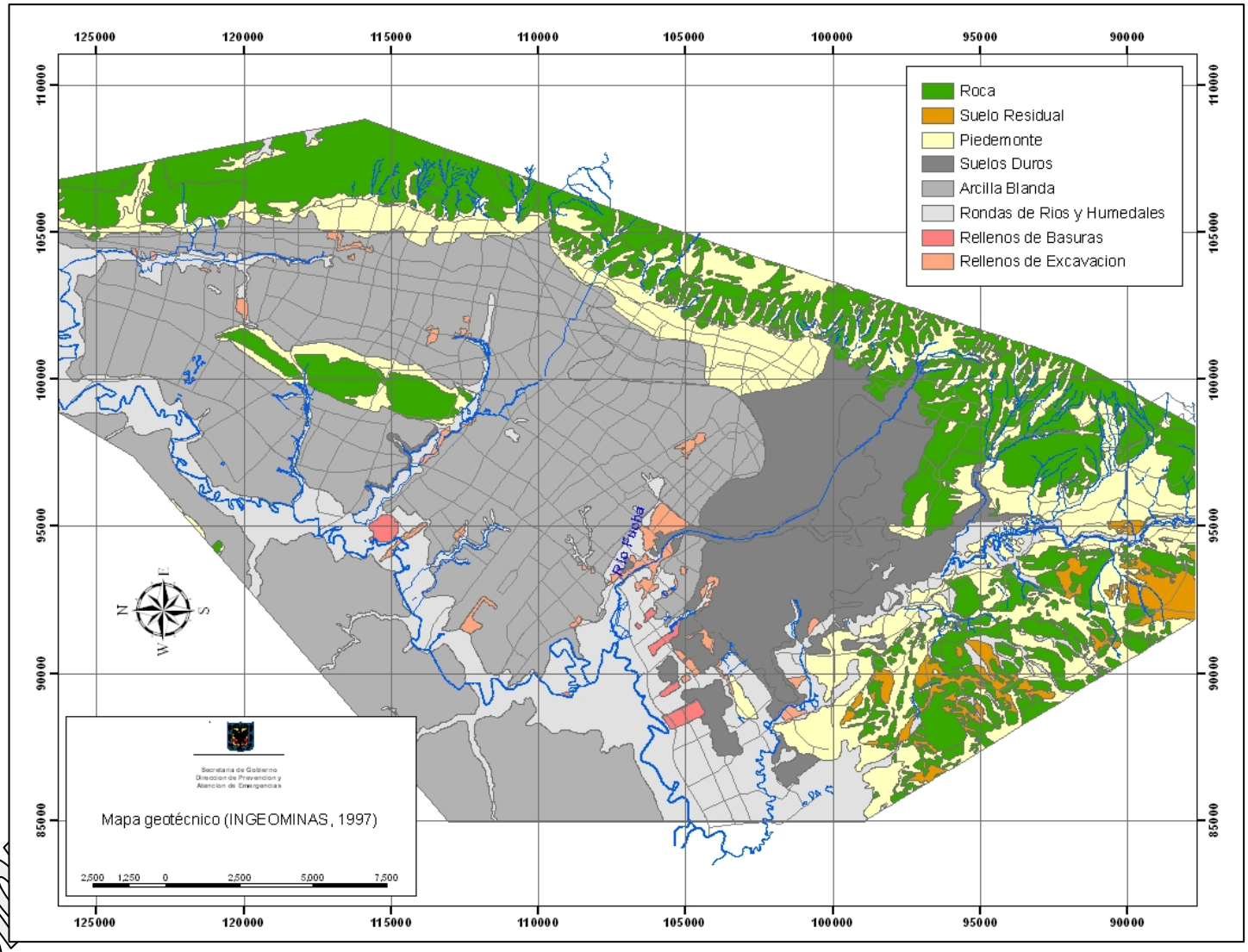


Figura 4.6. Mapa Geotécnico Ingeominas 1997

Versión

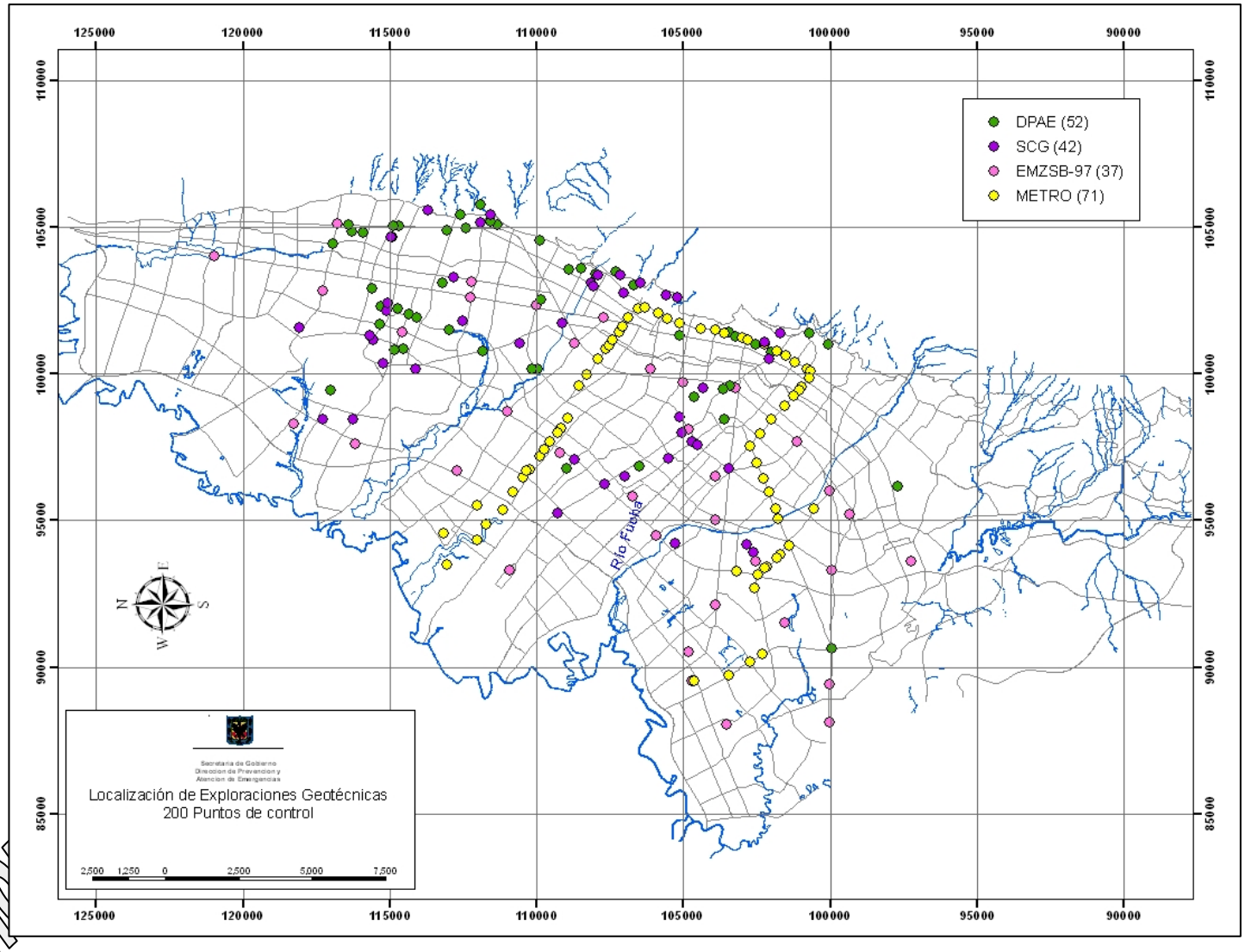


Figura 4.7. Localización de exploraciones geotécnicas

Versión

4.2.4 Variación espacial de la humedad natural y velocidad de onda cortante

Los análisis geo-estadísticos se emplearon para obtener la variación espacial de las propiedades geotécnicas usando procesos de interpolación que no tiene dependencia de la variable analizada, sino únicamente de la distancia que separa a cada una de las determinaciones de la variable. De este modo se puede apreciar un marco generalizado de la variación de las propiedades geotécnicas de cada una de las zonas.

El resultado de la variación de la humedad natural promedio de los 50 m superficiales se presenta en la **Figura 4.8**, donde se puede distinguir claramente que los valores más altos corresponden a la zona lacustre al norte de la ciudad, oscilando entre 110 y 170%, los valores más bajos se encuentran en las zonas de piedemonte y complejo de conos al sur de la ciudad, variando entre un 10 y 50%. Finalmente, se identifica una zona intermedia entre las dos anteriores con valores de humedad natural entre 50 y 110%, lo que se puede considerar para definir una zona de transición entre el material lacustre y el material aluvial.

Similar al análisis de la humedad natural, se presenta en la **Figura 4.9** la variación de la velocidad de onda cortante promedio de los 50 m superficiales, donde se obtiene para la zona lacustre, valores entre 110 y 130 m/s, en la zona aluvial valores entre 200 y 300 m/s, en el piedemonte entre 250 y 350 m/s y en la zona de transición lacustre - aluvial variaciones entre 130 y 170 m/s.

Es importante anotar que los intervalos de variación presentados son aproximados, así mismo la distribución espacial de los mismos, puesto que el proceso de interpolación y análisis no se tiene un control total en las condiciones de frontera y la precisión dependerá de la cantidad y calidad de los puntos de control, por lo tanto esta información no debe tomarse como valores absolutos, sino únicamente definen como tendencias generales muy útiles para zonificar.

4.2.4.1 Perfiles típicos

Una manera de sintetizar la información del subsuelo para visualizarla en planta es por medio de la identificación de perfiles típicos, lo que consiste en resumir en una secuencia simplificada de clasificaciones de suelos la estratigrafía de una exploración, por ejemplo un perfil conformado por la intercalación de arcillas arenosas que suprayacen a arcillas blandas de alta plasticidad, se podría representar como CL, CH. Para efectos de zonificar es conveniente emplear una simbología adecuada para los perfiles típicos, este caso consistió en seleccionar un color para el tipo de material predominante en la exploración y dibujar la dimensión del símbolo acorde con el tamaño de la partícula del suelo, símbolos pequeños para suelos finos como arcillosos y grandes para suelos gruesos como gravas. El resultado de este análisis se ilustra en la **Figura 4.10**.

A partir de los perfiles típicos se identifica que en la zona de piedemonte predominan los materiales granulares gruesos, hacia la parte plana se identifican tres perfiles, el de la zona lacustre con suelos arcillosos de alta plasticidad, el de la zona aluvial con suelos arenosos de baja plasticidad y los de la zona de transición entre las dos anteriores con intercalaciones de suelos arcillosos y arenosos. Esto se correlaciona adecuadamente con los mapas de humedad natural y velocidad de onda de corte promedio.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

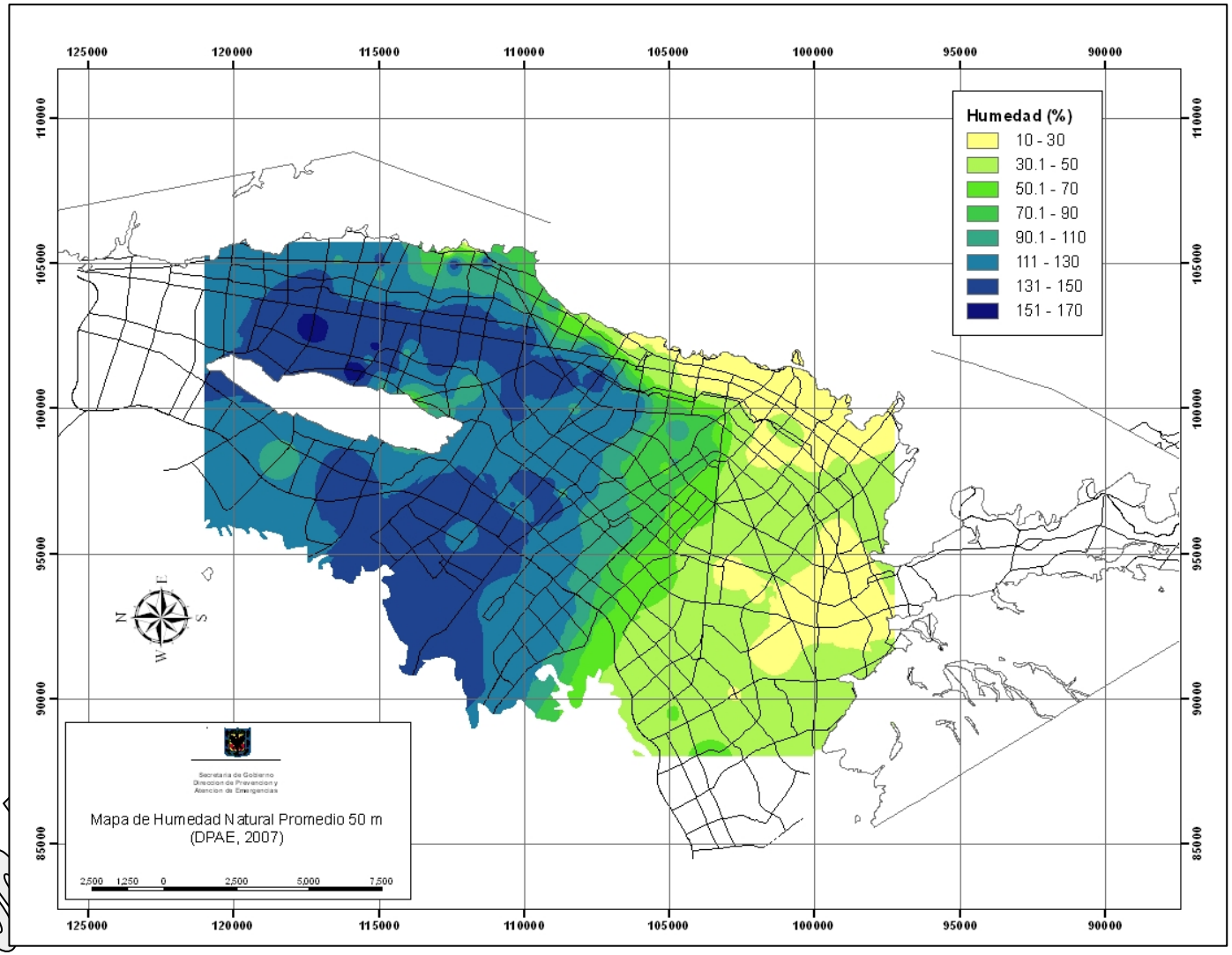


Figura 4.8. Variación de la humedad natural promedio hasta 50 m de profundidad

Versión

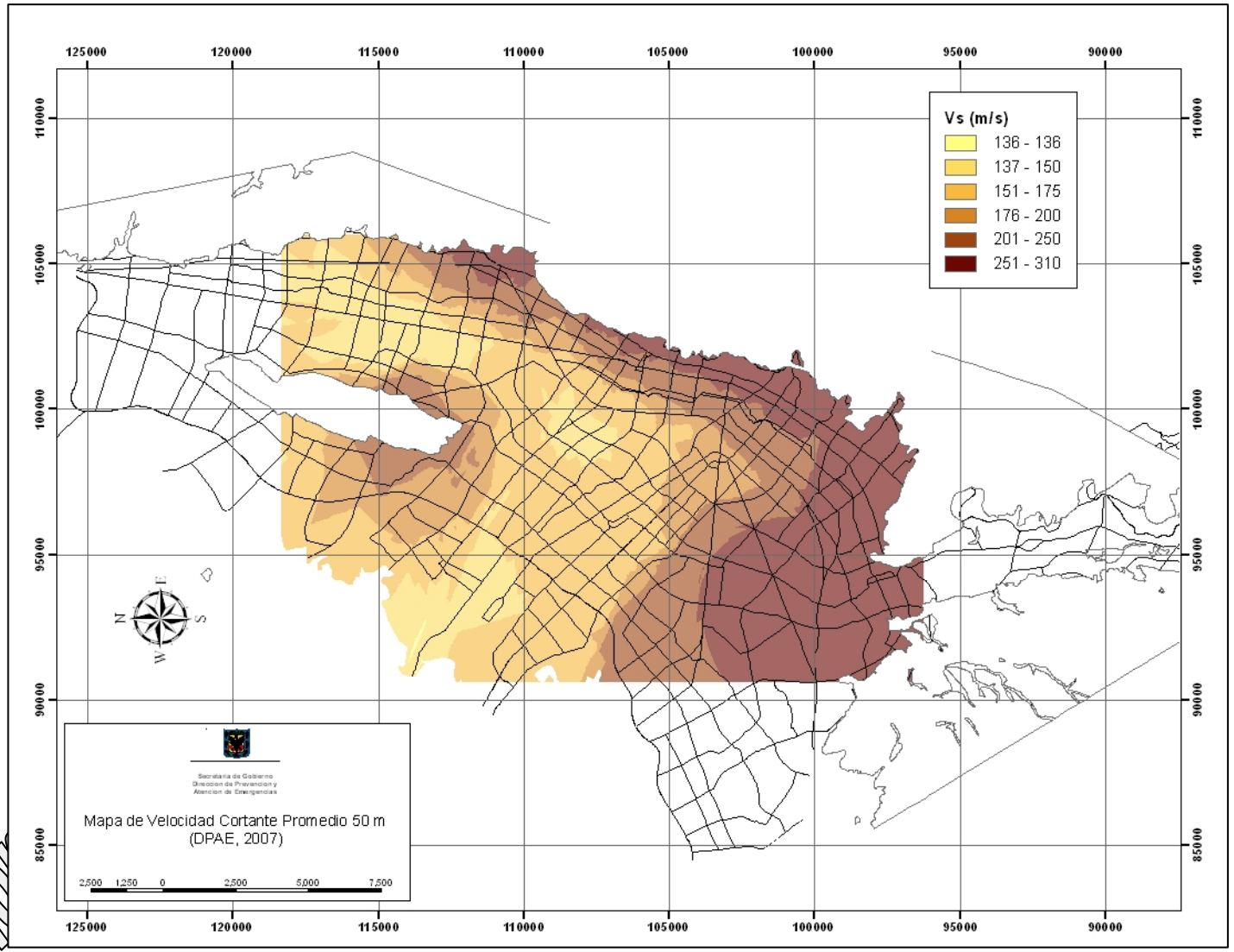


Figura 4.9. Variación de la velocidad de onda de corte promedio hasta 50 m de profundidad

Versión

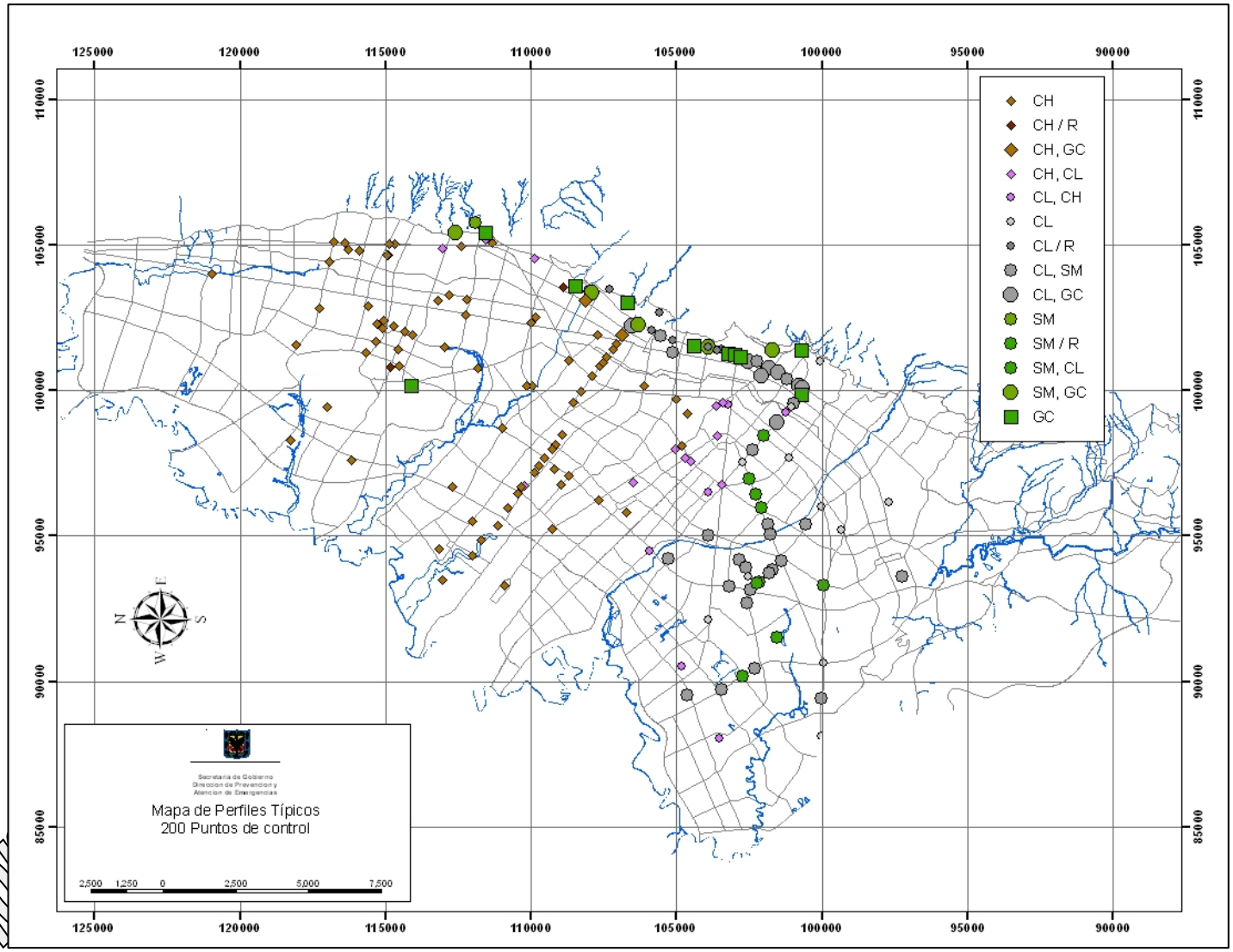


Figura 4.10. Mapa de perfiles típicos superficiales

Versión

4.2.5 Información sísmica

Como parte de los análisis de información sísmica se catalogaron los registros de vibración ambiental o microtrepidaciones que fueron realizados en el estudio de MZSB. Teniendo en cuenta las limitaciones de estas pruebas en depósitos de gran espesor y suelos duros, son útiles estos datos para correlacionar y caracterizar las zonas de comportamiento geotécnico a nivel superficial. Como se observa en la **Figura 4.11** los periodos de vibración oscilan entre 0.2 y 0.7 segundos, es decir, que son bajos para este tipo de depósito, puesto que corresponden posiblemente a un modo secundario de vibración del suelo, y por lo tanto probablemente se identifica el periodo de vibración de los metros mas superficiales, con ello se pueden fortalecer de manera importante la identificación de zonas. Se puede destacar de esta gráfica la correlación presente entre la zona lacustre con periodos entre 0.4 y 0.7 s y la zona aluvial y piedemonte con los periodos entre 0.2 a 0.4 s.

Versión Enero 2018

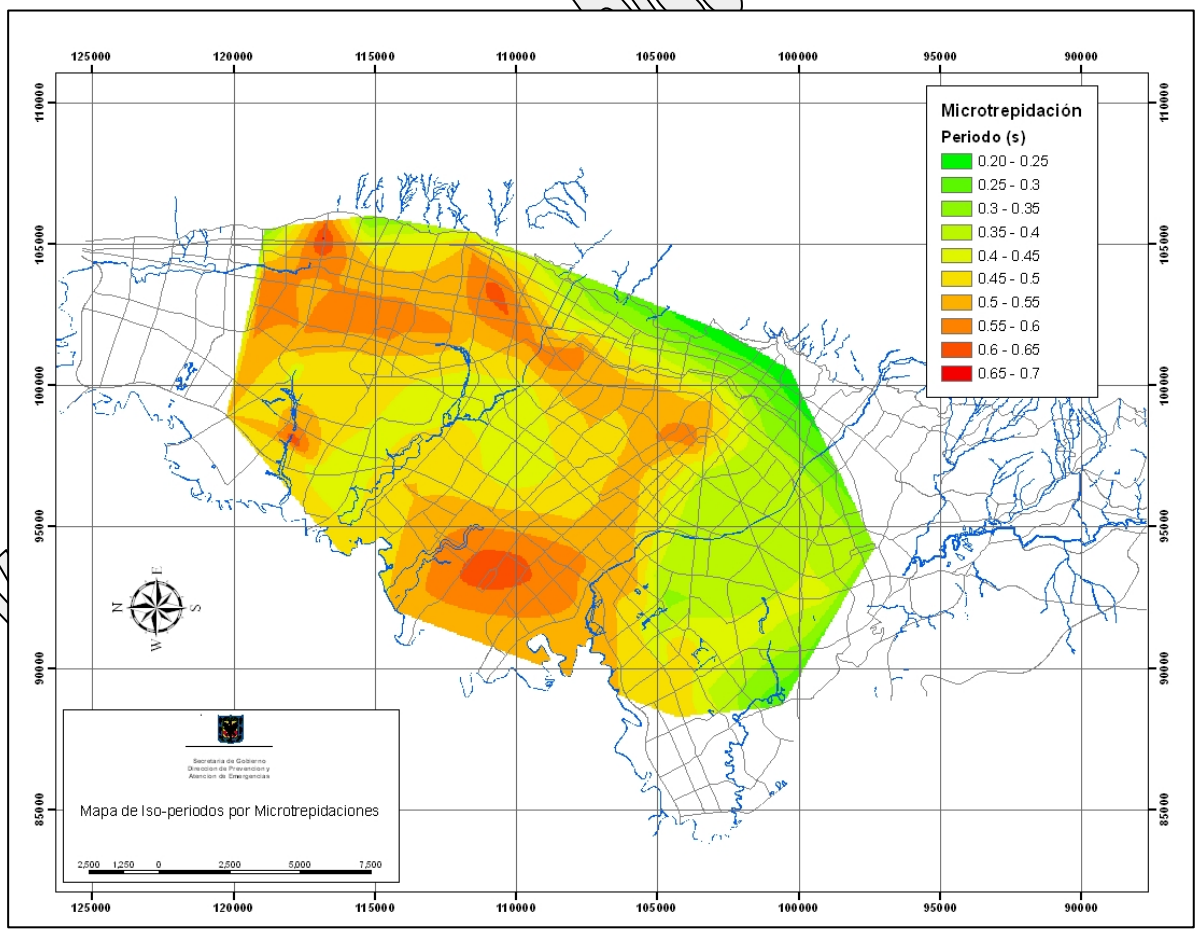


Figura 4.11. Mapa de isoperiodos por microtrepidaciones (UNIANDES, 2006)

Los resultados de la figura anterior fueron calculados por UNIANDES, teniendo en cuenta los datos medidos en el estudio de MZSB y en las estaciones de la Red de Acelerógrafos de Bogotá, RAB.

4.2.6 Cruces temáticos y análisis superficial

Para definir las zonas geotécnicas se tuvieron en cuenta las coberturas de información descritas anteriormente. Mediante herramientas del sistema de información geográfica se fueron definiendo las zonas geotécnicas de tal manera que fuesen consistentes con la información disponible. En la **Figura 4.12** se presenta un ejemplo de la superposición de algunas coberturas a nivel superficial.

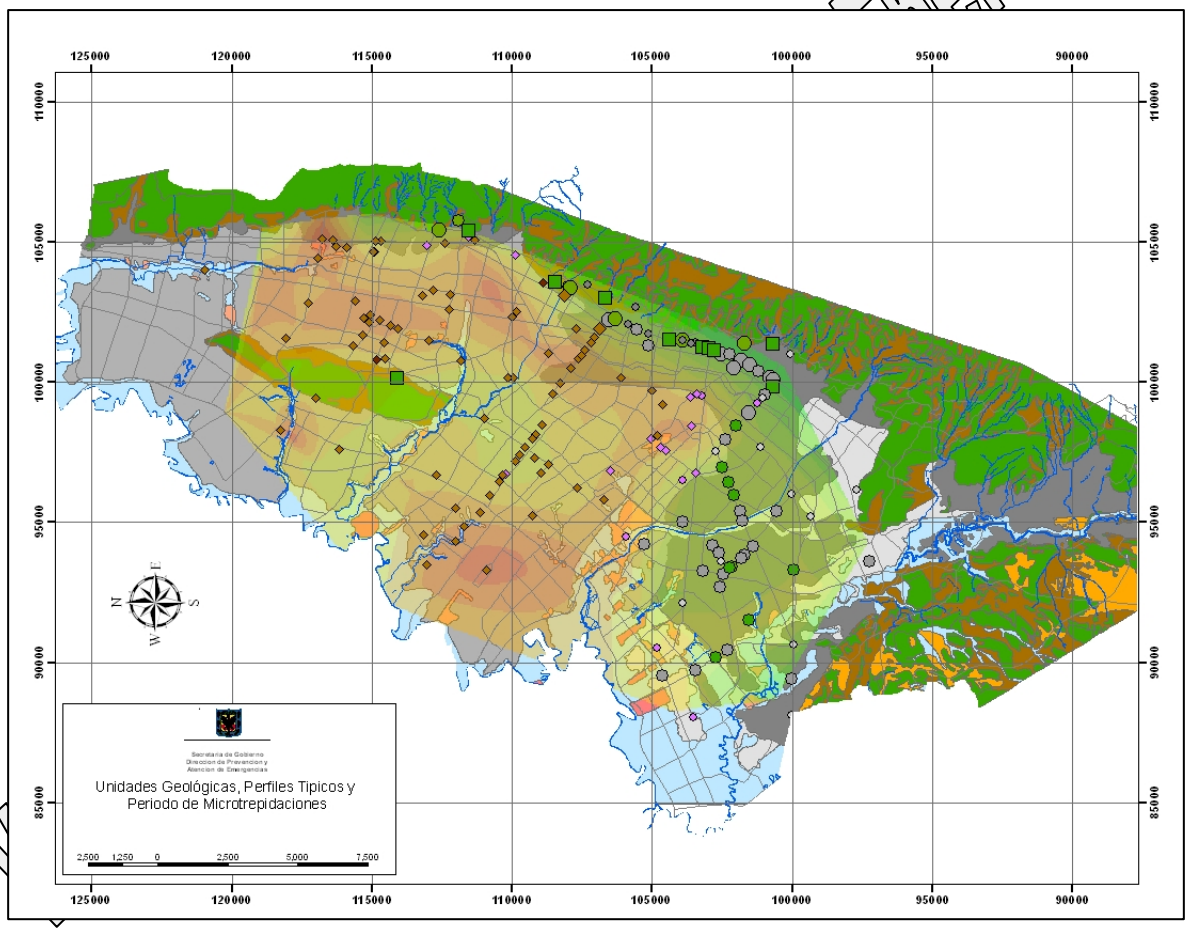


Figura 4.12. Cruces temáticos – análisis superficial

Algunos de los criterios que se tuvieron en cuenta para la definición de las zonas se resumen a continuación:

- Las formaciones rocosas se agruparon de acuerdo con su tipo y competencia geomecánica, de modo tal que se dividieron en rocas de arenisca y rocas de arcillolita, donde son de mejor competencia las areniscas y con posibles problemas de estabilidad y menor competencia las arcillolitas.

- En las zonas de piedemonte, se agruparon parte de los complejos de conos y parte de los coluviones que se encontraban en las zonas próximas de los cerros, cuya geoforma y pendiente fuesen típicas de los depósitos de piedemonte, además se tuvo en cuenta los perfiles típicos con predominio de materiales granulares gruesos, lo cual ayudó considerablemente a afinar los límites de esta unidad. La manera final como

se interpretaron las unidades geológicas de abanicos aluviales desde el punto de vista geotécnico se presenta en la **Figura 4.13**, donde se ilustran las partes que componen el abanico, el tipo de suelos que predomina, la geoforma típica y la zona geotécnica.

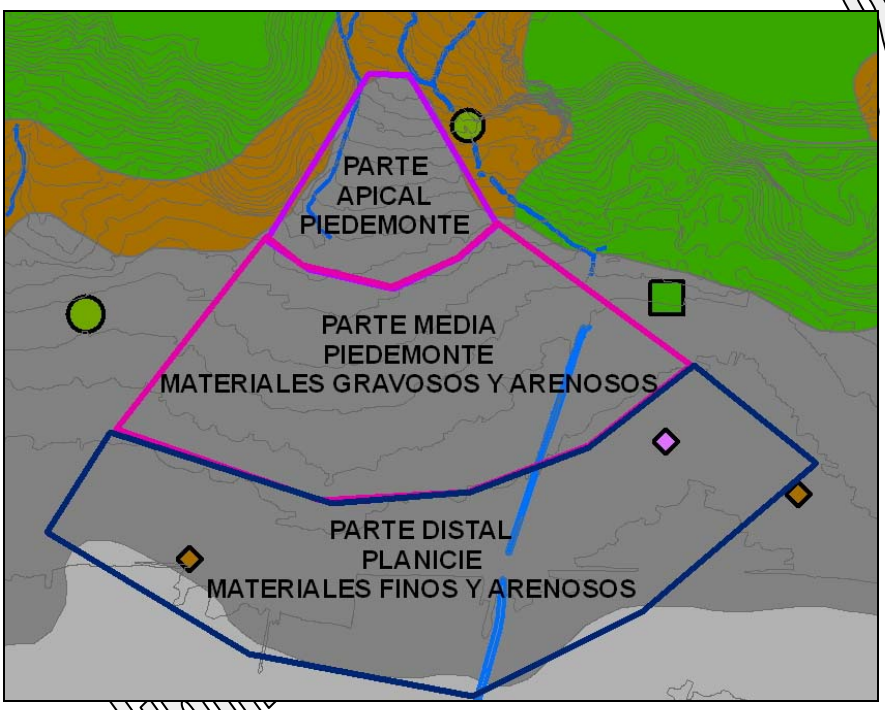


Figura 4.13. Interpretación geotécnica de unidades de abanicos aluviales

- A partir de las secciones bidimensionales modeladas por la SCG se analizó la variación superficial de la aceleración máxima, con lo que se pudo determinar los corredores de piedemonte e inferir hasta donde se presentan efectos topográficos debidos a la posición, profundidad y forma del basamento rocoso.

- La zona lacustre, aluvial y la de llanura de inundación, se definieron a partir de la geología, los mapas de variación de la humedad natural, la velocidad de onda y los perfiles típicos superficiales.

- En la zona lacustre (suelos blandos) se identificaron tres perfiles, de modo que se subdividió para tener en cuenta los sectores de transición e interdigitación con la zona aluvial (suelos duros).

- La zona aluvial (suelos duros) se dividió en dos partes con el fin de separar en los complejos de conos la parte media de la distal, de manera tal que se asoció la parte media a depósitos predominantemente arenosos y la parte distal a suelos limosos y arcillo arenosos (ver **Figura 4.13**).

- La llanura de inundación se dividió en dos sectores para diferenciar la parte que se interdigita con la zona lacustre, donde predominan las arcillas blandas, de la que hace contacto con la zona aluvial, con predominio de materiales limosos y arcillo arenosos.

Versión Preliminar 2018

4.2.7 Mapa de zonificación geotécnica

Con base en la información disponible y los criterios anteriormente mencionados se presenta el Mapa de Zonificación Geotécnica de Bogotá (**MAPA No 1**) que se ilustra en la **Figura 4.14** y cuya síntesis se presenta en la **Tabla 4.1**.

Como se puede apreciar se conservaron las mismas cinco unidades geotécnicas identificadas en las anteriores zonificaciones, sin embargo, los principales aportes de este mapa están en la delimitación más precisa de las zonas de piedemonte y en la subdivisión de las unidades de planicie (lacustre, aluvial y llanura de inundación) de acuerdo con la nueva información disponible y manteniendo una definición más de carácter geotécnico que geológico.

4.2.8 Secciones esquemáticas de los depósitos de la ciudad

Para complementar el modelo geotécnico es necesario visualizar, aunque sea de manera esquemática, cómo se relacionan las unidades geotécnicas entre sí y en general qué forma tiene la cuenca de sedimentación de la Sabana de Bogotá. Para esto, de la **Figura 4.15** a la **Figura 4.18** se presentan secciones esquemáticas del modelo tridimensional del depósito de Bogotá.

Para fines de ilustrar en los esquemas geotécnicos típicos, se interpretó desde el punto de vista geotécnico la Formación Sabana como arcillas de origen lacustre de consistencia blanda a muy blanda y la Formación Subachoque como arcillas arenosos de origen aluvial de consistencia firme a rígida, esta interpretación puede diferir un poco de la que se encuentra en los estudios geológicos, donde se definen las formaciones de acuerdo con su edad de formación sin tener en cuenta totalmente su composición geotécnica.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

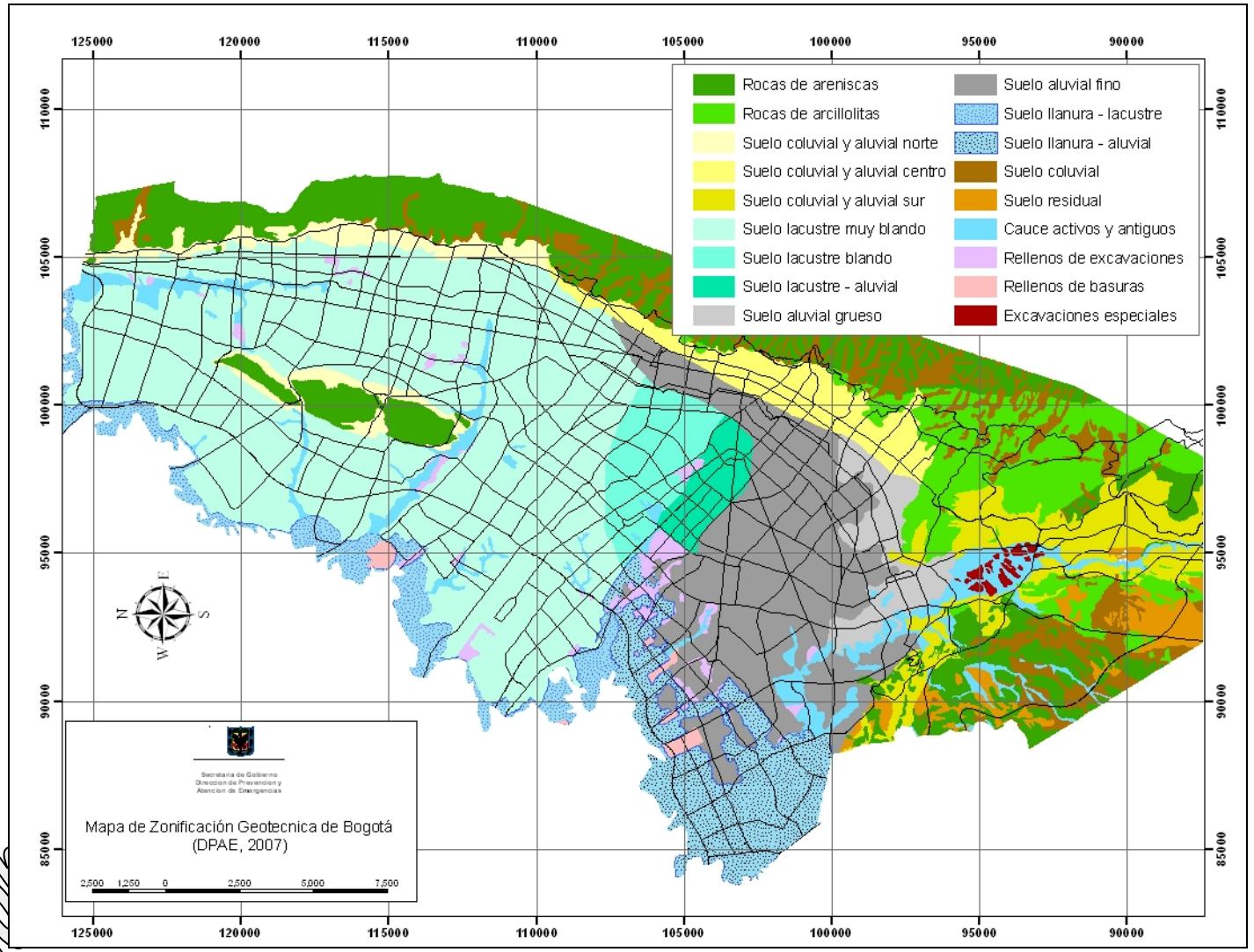


Figura 4.14. Mapa actualizado de zonificación geotécnica

Versión

Nombre	Geotecnia	Geología	Geomorfología	Composición principal	Comportamiento geotécnico	Espesor	ID
Cerros A	Roca de arenisca	Formaciones de Areniscas	Cerros de alta pendiente	Areniscas duras	Rocas competentes y resistentes a la meteorización, eventuales problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas o con intercalaciones de arcillolitas blandas		**I-A**
Cerros B	Roca de arcillolita	Formaciones de Arcillolitas	Cerros de moderada a alta pendiente	Arcillolitas blandas	Rocas de moderada competencia y susceptibles a la meteorización, problemas de estabilidad de taludes en excavaciones a cielo abierto, principalmente cuando estén fracturadas o con intercalaciones de arcillolitas blandas		**I-B**
Piedemonte A	Suelo coluvial y aluvial norte	Coluviones y Complejo de Conos Aluviales	Piedemonte	Gravas arcillo arenosas compactas	Suelos de alta capacidad portante pero pueden presentar problemas de inestabilidad en excavaciones abiertas	< 50 m	**II-A**
Piedemonte B	Suelo coluvial y aluvial centro			Gravas areno arcillosas compactas			**II-B**
Piedemonte C	Suelo coluvial y aluvial sur			Gravas areno arcillosas compactas			**II-C**
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	Terraza Alta - Lacustre	Planicie	Arcillas limosas muy blandas	Suelos de muy baja a baja capacidad portante y muy compresibles	20 - 500 m	**III-A**
Lacustre B	Suelo lacustre blando			Arcillas limosas blandas			**III-B**
Lacustre C	Suelo lacustre - aluvial			Arcillas arenosas firmes			**III-C**
Aluvial A	Suelo aluvial grueso	Terraza Baja - Aluvial y Complejo de Conos Aluviales	Planicie	Arenas arcillosas sueltas a compactas	Suelos de mediana a alta capacidad portante poco compresibles, susceptibles a licuación e inestables en excavaciones a cielo abierto	50 - 250 m	**IV-A**
Aluvial B	Suelo aluvial fino			Arcillas arenosas duras			**IV-B**
Llanura A	Suelo de llanura - lacustre	Llanura de Inundación	Llanura	Arenas sueltas y arcillas limosas blandas	Suelos de moderada capacidad portante y compresibles, susceptibles a licuación	200 - 500 m	**V-A**
Llanura B	Suelo de llanura - aluvial			Arenas sueltas y arcillas arenosas duras			**V-B**
Coluvión	Suelo coluvial	Coluvión	Cerros	Gravas areno arcillosas compactas	Suelos de mediana capacidad portante susceptibles a problemas de estabilidad de taludes	5 - 25 m	
Residual	Suelo residual	Suelo Residual	Cerros	Arcillas gravo arenosas firmes	Suelos de mediana a alta capacidad portante con posibles problemas de estabilidad de taludes en sectores de alta pendiente	5 - 10 m	
Cauce	Cauce activo o antiguo	Cauces Activos	Piedemonte y Planicie	Gravas arenosas sueltas a compactas	Suelos de baja capacidad, susceptibles a licuación e inundación		
Basura	Relleno de basura	Rellenos de Basuras	Piedemonte y Planicie	Basuras	Materiales heterogéneos, que acuerdo con su disposición pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad en taludes		
Relleno	Relleno de excavación	Rellenos de Excavación	Piedemonte y Planicie	Rellenos heterogéneos	Materiales heterogéneos, que acuerdo con su disposición pueden ser compresibles y susceptibles a problemas de estabilidad en taludes		
Excavación	Excavación especial	Excavaciones Especiales	Piedemonte	Gravas arenosas sueltas a compactas	Zonas de explotación de agregados en el Río Tunjuelo, susceptibles a problemas de estabilidad de taludes		

Versión Preliminar para Discusión Enero 2009

Tabla 4.1. Descripción de las zonas geotécnicas

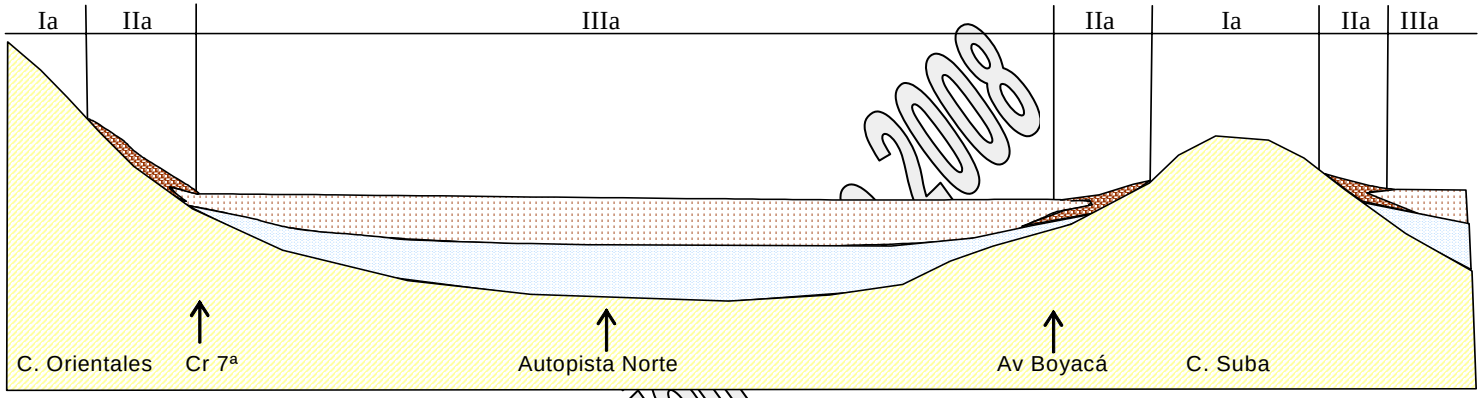


Figura 4.15. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 127 a Cl 200 aprox.

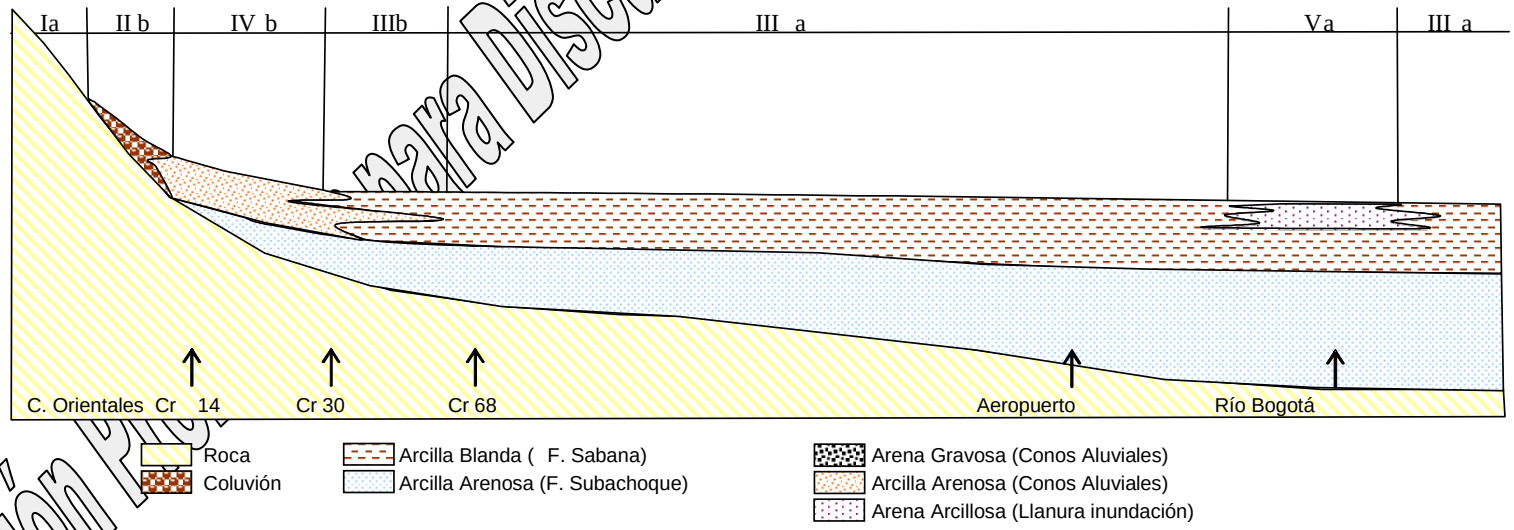


Figura 4.16. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 13 a Cl 127 aprox.

Versión Preliminar para Discusión - 2008

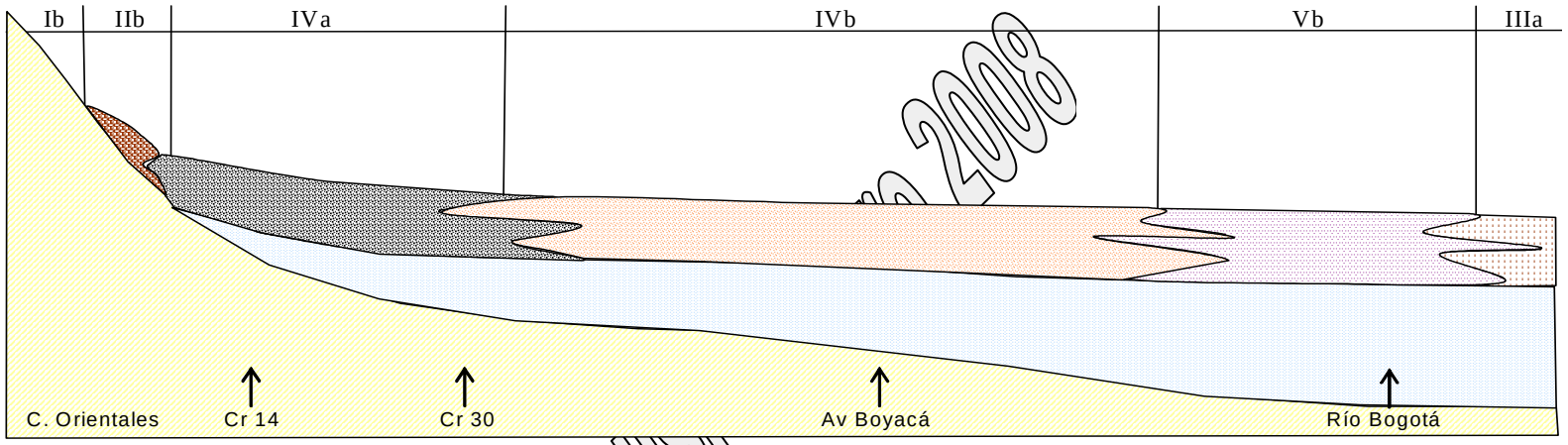


Figura 4.17. Esquema geotécnico típico de una sección este – oeste entre Cl 36 sur a Cl 13 aprox.

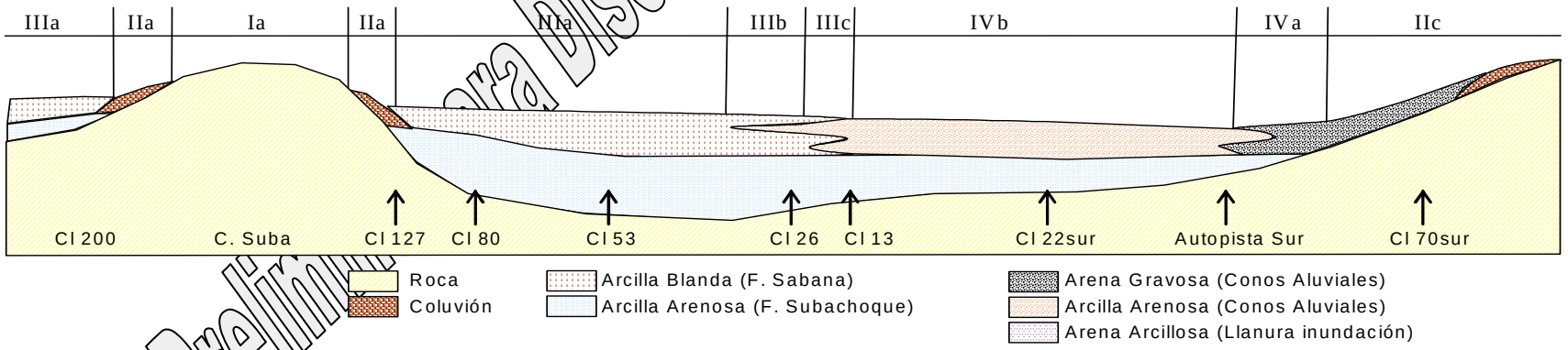


Figura 4.18. Esquema geotécnico típico de una sección norte – sur entre Cr 72 a Cl 86 aprox.

Versión Preliminar para Discusión 2008

4.3 ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA PARA RESPUESTA SÍSMICA

Es necesario para fines de evaluar la respuesta sísmica, contemplar además de las zonas geotécnicas anteriormente actualizadas la variación de la profundidad del depósito, dado que el espesor del sedimento modifica la respuesta dinámica cuando este varia considerablemente, como es el caso de la Sabana de Bogotá, que va desde unos pocos metros en la zonas de piedemonte hasta 600 metros aproximadamente en las zonas más profundas de la cuenca.

Para tener en cuenta este aspecto se revisaron varias coberturas de información que fuesen útiles para definir la posición del basamento rocoso, de este modo se subdividieron las zonas geotecnias según su espesor de sedimento. Los intervalos de espesores de suelo se definieron a partir de análisis preliminares realizados de las respuestas sísmicas de los depósitos, y se llego a la propuesta que se presenta al final de este capítulo.

A continuación se resumen las características generales de la información que se tuvo en cuenta para realizar la actualización de la zonificación geotécnica para respuesta sísmica de Bogotá y el tratamiento que se le dio para tal fin.

4.3.1 Profundidad del basamento rocoso

En el estudio de MZSB – Subproyecto 7 (Ingeominas & Uniandes, 1997), se realizaron un buen número de pruebas geofísicas, como geo-eléctrica, pruebas de gravimetría y análisis de líneas de refracción sísmica, que junto con la información geológica y geotécnica de ese entonces, sirvieron para realizar el modelo de profundidad de basamento rocoso. Dicho mapa se presenta en la **Figura 4.19**, en el cual se puede apreciar que la forma de la cuenca de sedimentación se profundiza en sentido oriente occidente, llegando hasta 500 m de espesor los depósitos hacia el sector del Aeropuerto.

Sin embargo, en este mapa que se ha detectado que los contactos con los afloramientos de las formaciones de roca y la profundidad del basamento en las zonas de menos de 50 m en varios sectores no es muy preciso, debido principalmente a la escala de detalle del mismo, por lo cual se le ha asociado una precisión de +/- 25 m.

Por lo anterior, se le dedicaron grandes esfuerzos a mejorar el mapa de basamento rocoso, trabajo desarrollado junto con la SCG, que realizó los análisis geo-estadísticos de nueva información disponible, en la que se tuvo en cuenta información de pozos profundos de agua, suministrados en los estudios del Geólogo Lobo Guerrero y las exploraciones geotécnicas que lograron detectar el contacto con las formaciones rocosas, principalmente en las zonas de piedemonte. Los resultados presentados por la SCG se calibraron y ajustaron para llegar al resultado que se ilustra en la **Figura 4.20**.

4.3.2 Periodo fundamental del suelo

A partir de los modelos de respuesta unidimensionales se pueden calcular sus respectivos periodos fundamentales de vibración, obteniendo así el mapa de iso-periodos fundamentales, este trabajo lo realizó y presentó UNIANDES (2006) y se ilustra en la **Figura 4.21**.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

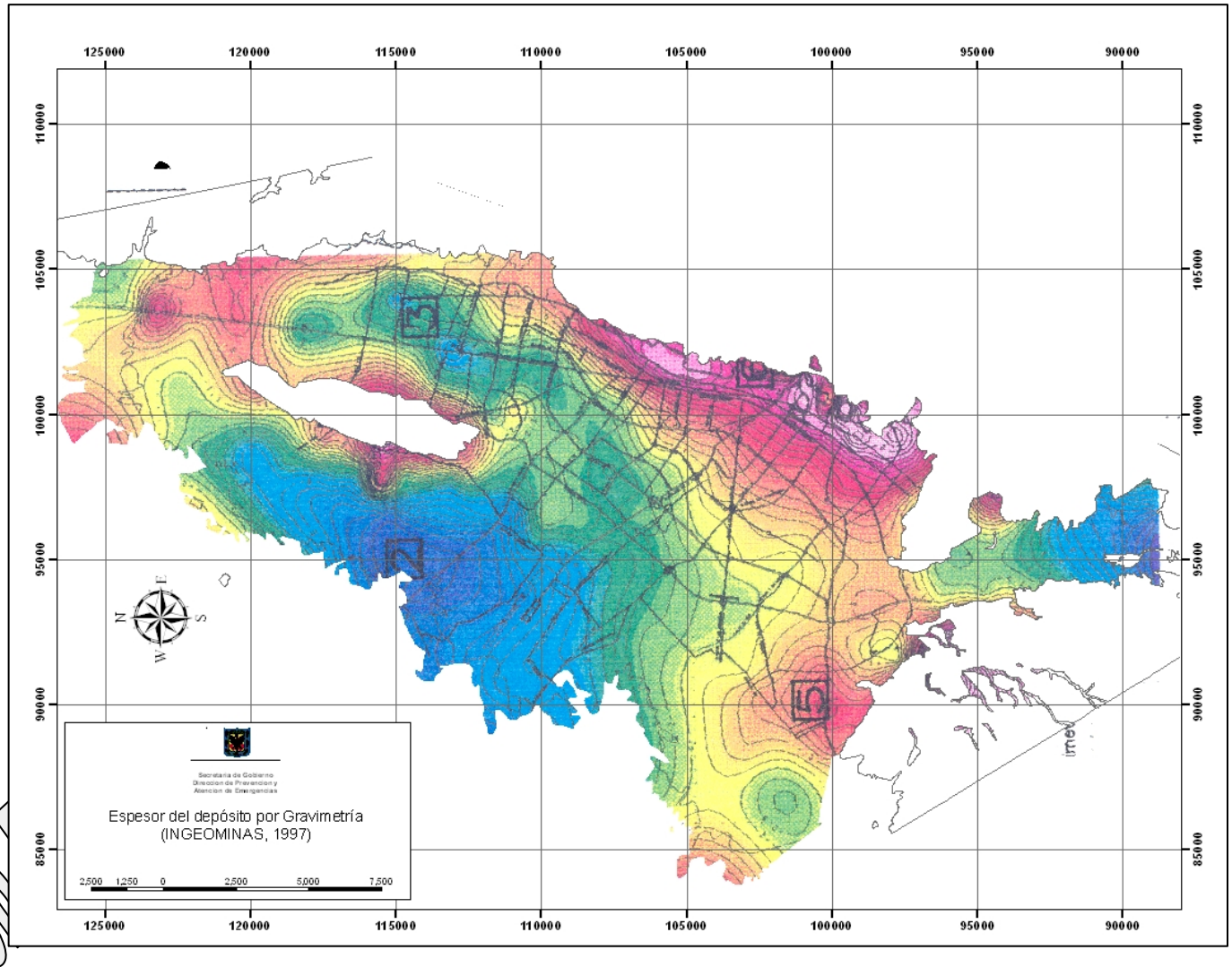


Figura 4.19. Modelo de basamento rocoso a partir de gravimetría (Ingeominas, 1997)

Versión

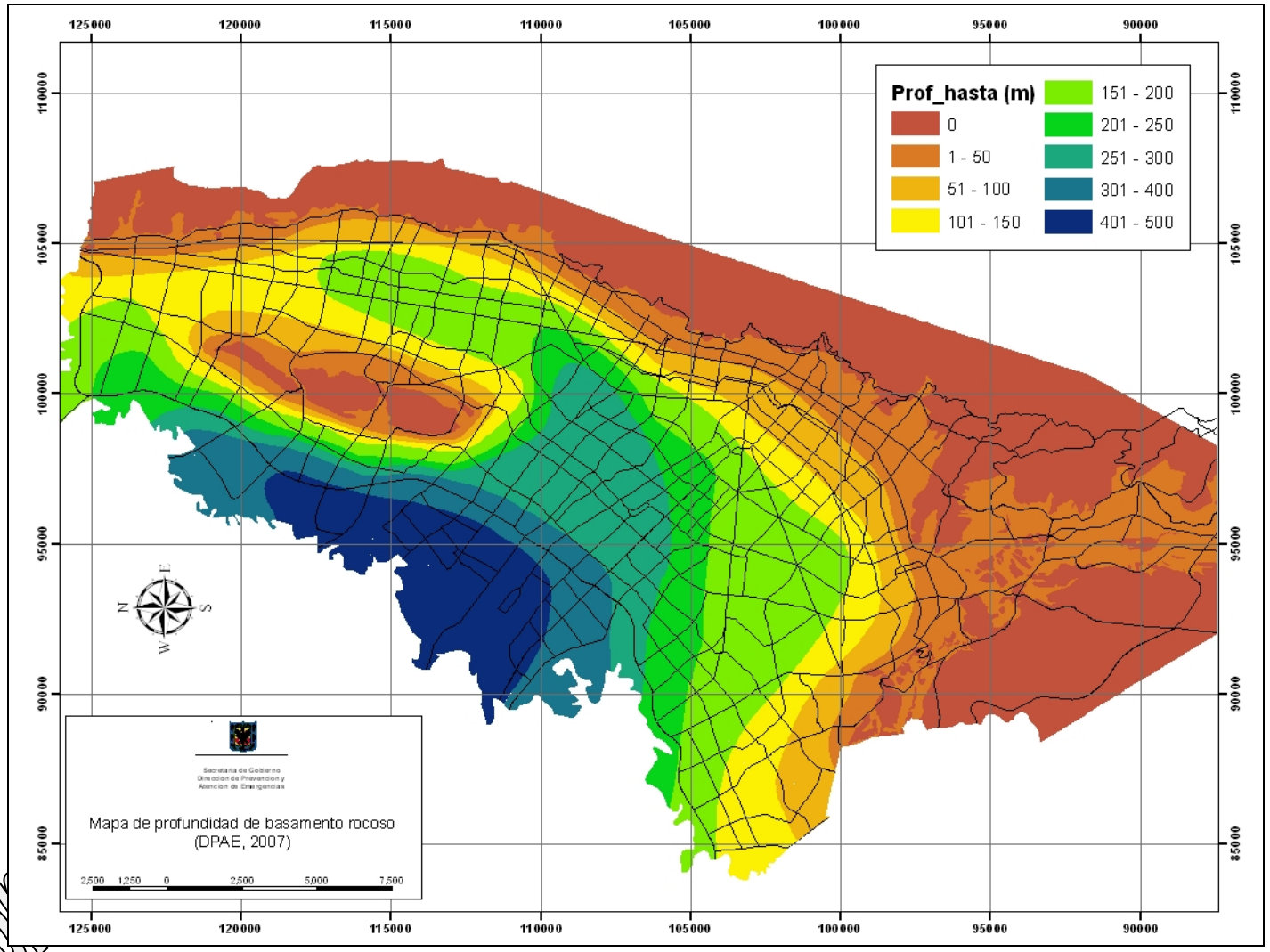


Figura 4.20. Modelo de basamento rocoso actualizado por SCG y DPAE

Versión

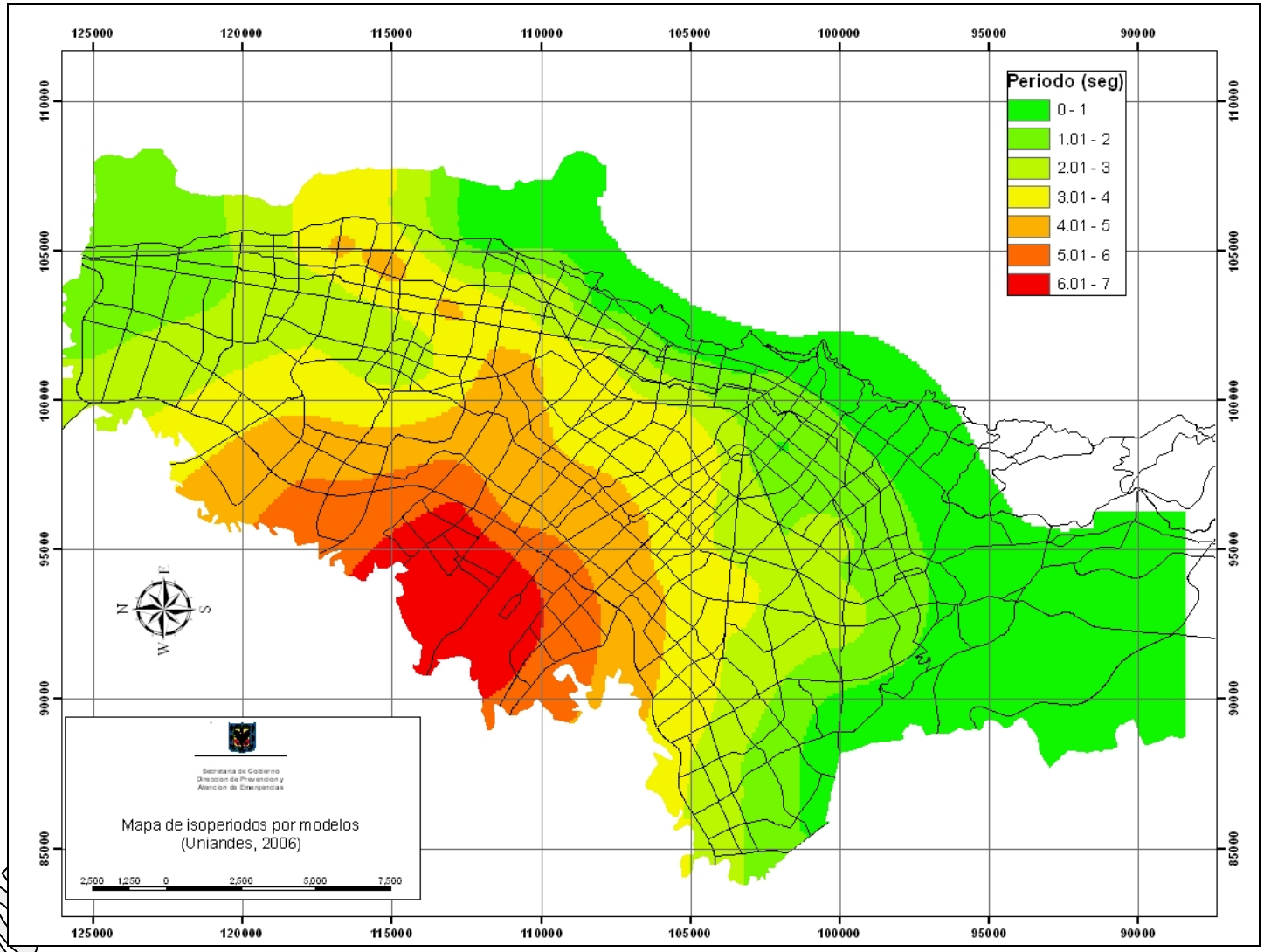


Figura 4.21. Mapa de isoperiodos de los modelos de respuesta unidimensionales (Uniandes, 2006)

Versión

En el mapa de isoperiodos fundamentales se observa que los periodos varían entre 0.2 a 7 s, lo que corresponde al periodo de vibración de toda la columna de suelo, presentándose los valores más altos en la zona lacustre profunda, los valores intermedios en la zona aluvial profunda y los periodos más bajos se encuentran en el piedemonte. Sin embargo, se aprecia que no hay un control total con los afloramientos de roca, por ejemplo en el sector del cerro de suba, por lo que se recomienda que sea actualizado y calibrado este mapa, dado que este sirve para identificar la posible resonancia entre el periodo de vibración de las estructuras con el periodo fundamental del suelo cuando llegan a coincidir.

4.3.3 Cruces temáticos y análisis en profundidad

Con la cobertura del modelo actualizado de basamento rocoso y el mapa de periodo fundamentales del depósito se logró refinar el modelo de profundidad. A manera de ejemplo se ilustra en la **Figura 4.22** dicho cruce de información.

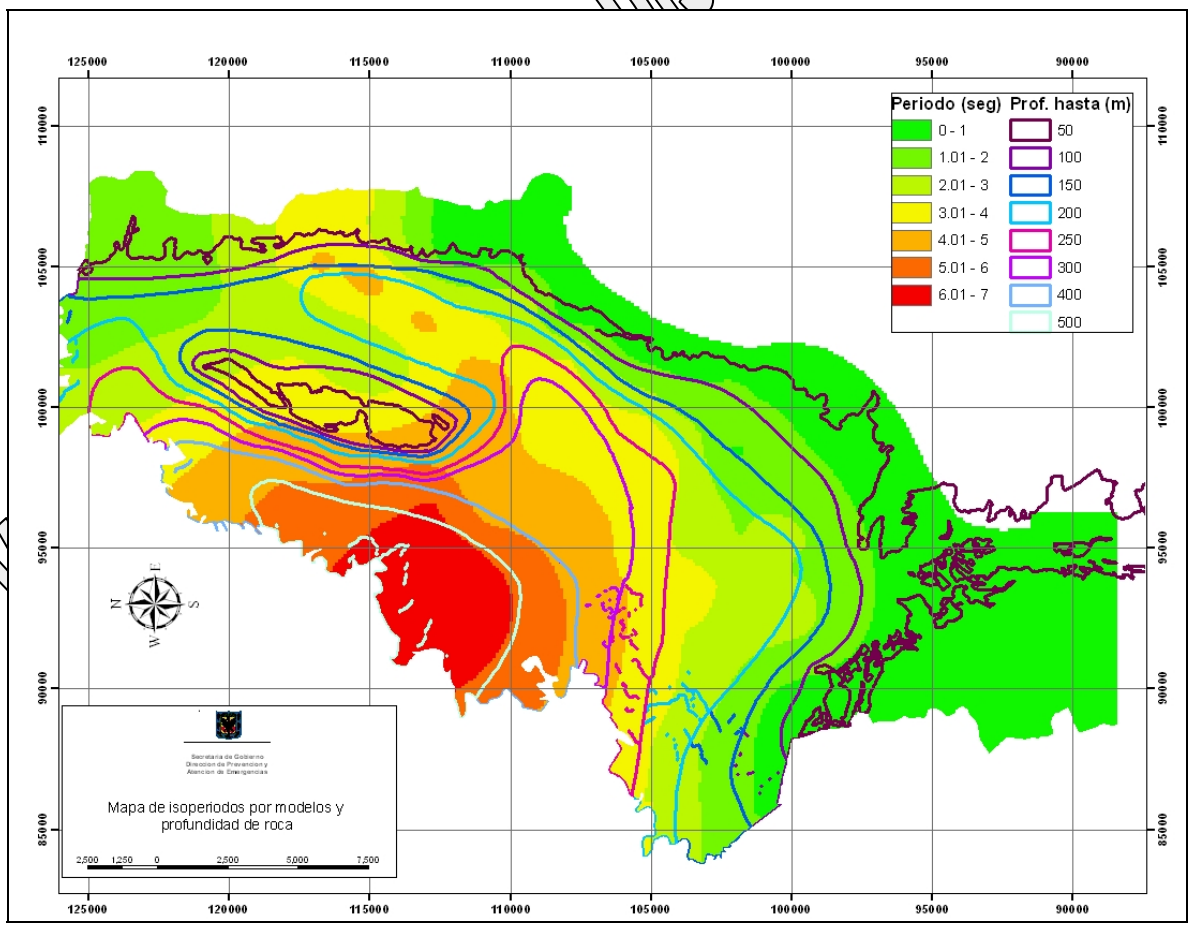


Figura 4.22. Cruces temáticos – análisis profundo

Como criterios adicionales que se consideraron para realizar la subdivisión de las unidades geotécnicas se tiene:

- Debido a la resolución de la información, se consideró que lo más conveniente era marcar cada 50 m la profundidad del basamento.

- La zona de piedemonte se conservó igual al del mapa geotécnico dado que el espesor de estos depósitos es predominantemente menor a 50 m.

- Con base en el análisis preliminar de las respuestas dinámicas de los modelos y teniendo en cuenta el efecto del confinamiento en las propiedades dinámicas, se establecieron los intervalos de variación para subdividir las unidades geotécnicas.

- La zona de llanura aluvial para efectos de la respuesta sísmica se une a la zona lacustre o aluvial próxima debido que la diferencia está en los últimos metros, por lo cual se espera que en términos generales su respuesta dinámica sea controlada por la zona subyacente. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en esta zona puede haber terrenos potencialmente licuables.

4.3.4 Mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica

El mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica es un resultado parcial antes de obtener el nuevo mapa de efectos locales, puesto que aún no se le ha asociado a cada zona su comportamiento sísmico o efectos de sitio (amplificación, licuación y efecto topográfico), temas que se abordaran en el próximo capítulo.

En la **Figura 4.23** se presenta el Mapa de Zonificación Geotécnica para Respuesta Sísmica y en la **Tabla 4.2** se resume la leyenda de éste con las características de cada zona. Se plantean cuatro grandes zonas: cerros, piedemonte, lacustre y aluvial, que al subdividirse de acuerdo con la subzona geotécnica y el espesor del depósito se obtienen en total 30 zonas de respuesta sísmica homogénea, lo que garantiza la gradual variación espacial en la respuesta de sitio y de esté modo se evitan cambios bruscos entre una unidad y la contigua, que se tienen en la zonificación actual.

Sin embargo, para fines prácticos y de normatividad son demasiadas zonas, por lo cual en el capítulo siguiente se muestra como se agruparon la zonas de acuerdo con los resultados de los modelos de respuesta, para reducir así el número de zonas y simplificar de la mejor forma este mapa.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

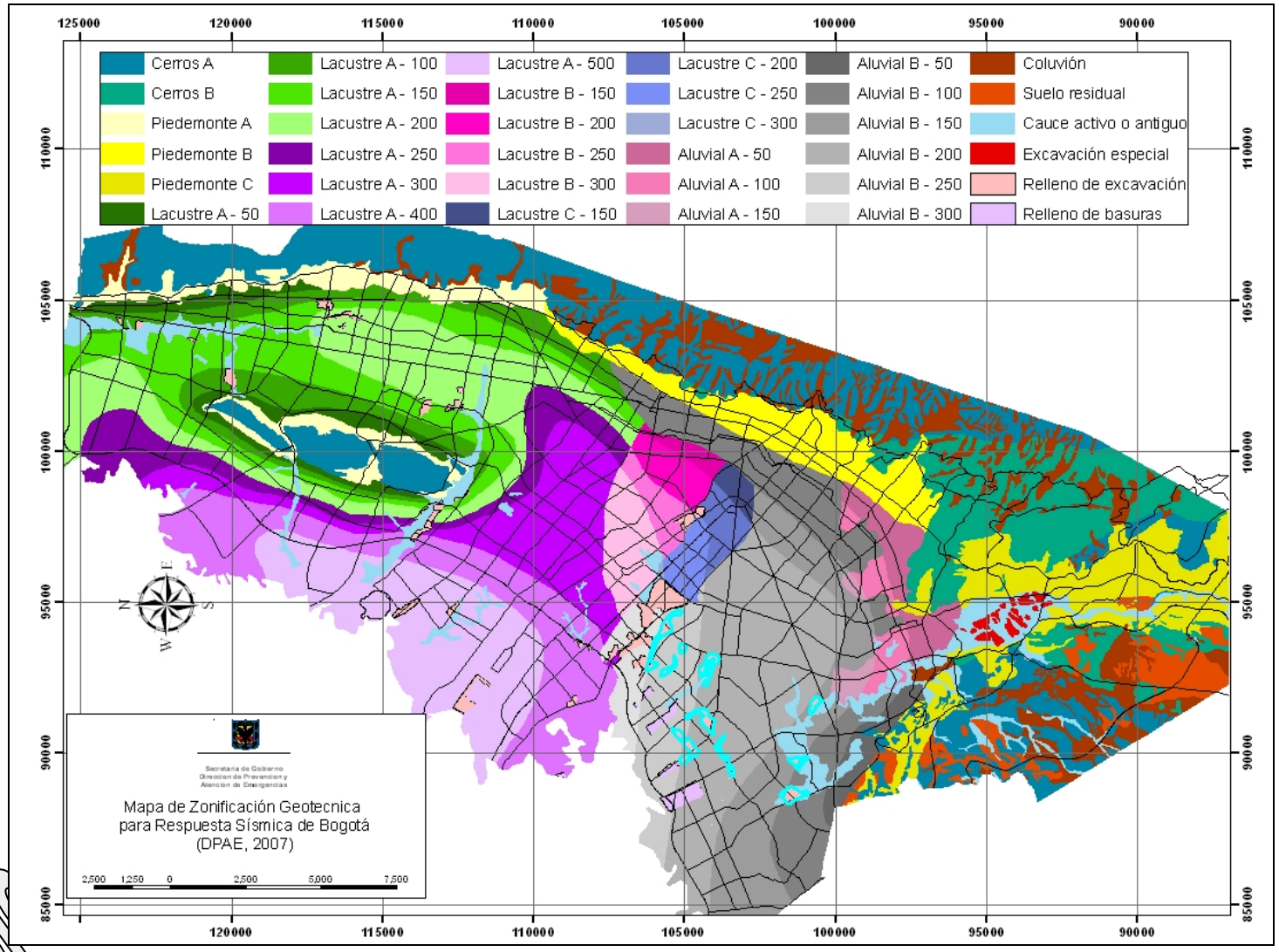


Figura 4.23. Mapa de zonificación geotécnica para respuesta sísmica

Versión

Nombre	Geotecnia	Espesor (m)	Periodo (s)	Geología	Geomorfología
Cerros A	Roca de arenisca		< 0.3	Formaciones de Areniscas	Cerros alta pendiente
Cerros B	Roca de arcillolita		< 0.3	Formaciones de Arcillolitas	Cerros moderada a alta pendiente
Piedemonte A	Suelo coluvial y aluvial norte	< 50	0.3-0.6	Coluviones y Complejo de Conos Aluviales	Piedemonte
Piedemonte B	Suelo coluvial y aluvial centro	< 50	0.3-0.6		
Piedemonte C	Suelo coluvial y aluvial sur	< 50	0.3-0.6		
Lacustre A	Suelo lacustre muy blando	< 50	1.0-1.5	Terraza Alta - Lacustre	Planicie
		50-100	1.5-2.5		
		100-150	2.5-3.0		
		150-200	3.0-3.5		
		200-250	3.5-4.0		
		250-300	4.0-4.5		
		300-400	4.5-5.5		
		400-500	5.5-6.5		
Lacustre B	Suelo lacustre blando	100-150	2.3-2.8		
		150-200	2.8-3.3		
		200-250	3.3-3.8		
		250-300	3.8-4.3		
Lacustre C	Suelo lacustre - aluvial	100-150	2.3-2.8		
		150-200	2.8-3.3		
		200-250	3.3-3.8		
		250-300	3.8-4.3		
Aluvial A	Suelo aluvial grueso	< 50	0.4-0.8	Terraza Baja - Aluvial y Complejo de Conos Aluviales	Planicie
		50-100	0.8-1.2		
		100-150	1.2-1.8		
Aluvial B	Suelo aluvial fino	< 50	0.4-0.8		
		50-100	0.8-1.2		
		100-150	1.2-1.8		
		150-200	1.8-2.5		
		200-250	2.5-3.2		
		250-300	3.2-4.0		

Tabla 4.2. Descripción de las zonas geotécnicas para respuesta sísmica

Versión Preliminar para Discusión Enero 2010

CAPITULO 5

5 RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO Y EFECTOS DE SITIO

En el presente capítulo se ilustraran los resultados obtenidos en las distintas modelaciones de respuesta realizadas en los convenios con UNIANDES, SCG y AIS, estos resultados se integraran tendiendo en cuenta los criterios acerca de las señales de diseño presentados en el capítulo 3 y las zonas geotécnicas para respuesta sísmica obtenidas en el capítulo 4.

Después de analizada integralmente toda la información se propondrán el mapa actualizado de efectos locales y los espectros de respuesta para el diseño sismorresistente propuestos para la actualización de la microzonificación sísmica de Bogotá.

5.1 RESULTADOS DE LOS MODELOS NUMÉRICOS

Para modelar la respuesta de sitio se contó con los resultados de los trabajos adelantados mediante los convenios con la Universidad de los Andes, la Sociedad Colombiana de Geotecnia y la Asociación de Ingeniería Sísmica; entidades de reconocida experiencia en el tema.

En total UNIANDES modeló la respuesta en 102 sitios, la SCG en 116 y la AIS en 169, para un total de 384 sitios analizados. A continuación se resumen algunos aspectos de los resultados de cada convenio.

5.1.1 Universidad de los Andes

La Universidad de los Andes realizó modelaciones de respuesta unidimensionales en 102 sitios distribuidos uniformemente por toda la ciudad. Como consideraciones generales de sus modelos se tiene:

- Emplearon las 16 señales sísmicas recomendadas sin escalarlas, por lo cual los resultados serán afectados por la desviación estándar de acuerdo con lo presentado en el numeral 3.2.2.

- Adicionalmente, se cuenta con los Espectros Uniformes de Amenaza EUA para cada uno de los sitios modelados, obtenidos a partir de la metodología probabilística (Uniandes, 2006)

En la **Tabla 5.1** se presentan los sitios modelados, su correspondiente coordenada donde se localiza, las zonas geológica y geotécnica y el espesor de suelo.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
1	N01	Calle 170 - F.F.N.N.	105112	116788	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
2	N02	Autopista Norte con Calle 200	104008	120975	Llanura de Inundacion	LACUSTRE A	150
3	N04	Cll. 138 Club SubOficiales	101422	114593	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
4	N05	Cll. 100 Autonorte	102311	110007	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
5	N9A	Autonorte - Calle 127	102601	112248	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
6	N09	Cll. 126 - Cra. 29	103114	112201	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
7	N13	Sondeo Clínica Corpas	98293	118284	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
8	N14	Av. Cundinamarca - Calle 139	97595	116193	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
9	N17	Barrio Bochica Norte - Av. Cundinamarca	96701	112698	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
10	N19	Barrio El Luján Av. Boyacá	97301	109209	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
11	N20	Cll. 68 Cra. 82	96734	110252	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
12	N21	Terminal de Transportes	95812	106714	Terraza Alta	LACUSTRE B	300
13	N22	Cll. 13 Av. Boyacá	94499	105917	Terraza Baja	ALUVIAL B	250
14	N23	Av. 68 Av. Americas	95009	103925	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
15	N24	Centro Comercial Plaza de las Americas	93611	102527	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
16	N25	Plazoleta Banderas Av. Americas	92122	103925	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
17	N26	Barrio Patio Bonito BOSA	89516	104721	Llanura de Inundacion	ALUVIAL B	200
18	N27	Parque Timiza	91509	101533	Llanura de Inundacion	ALUVIAL B	200
19	N28	Autopista Sur Av. 68	93310	99933	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
20	N29	Autopista Sur SOACHA	89412	100031	Llanura de Inundacion	ALUVIAL B	50
21	N30	Autopista Sur SOACHA	88132	100031		ALUVIAL B	50
22	N31	Barrio Bosa Holanda	88027	103536	Llanura de Inundacion	ALUVIAL B	200
23	N33	Monumento Los Heroes	101912	107714	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
24	N34	Escuela Militar Cll. 80	101017	106713	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
25	N36	Cll. 63 Cra. 30	100166	106130	Terraza Alta	LACUSTRE B	200
26	N37	Cll. 26 Cra. 50	98101	104819	Terraza Alta	LACUSTRE B	250
27	N38	Cra. 53 Cll. 13	96491	103924	Terraza Alta	LACUSTRE C	200
28	N39	CAD Av. Americas Cra. 30	99502	103225	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
29	N42	Cra. 30 - Clle. 6	97699	101128	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
30	N43	Av. 1ero de Mayo Cra. 30	96002	100031	Complejo de Conos	ALUVIAL B	150
31	N44	Cra. 27 - Clle. 44S	95198	99332	Terraza Baja	ALUVIAL A	150
32	N45	Tunal	93611	97241	Terraza Baja	ALUVIAL A	50
33	N48	Cll. 170 - Autonorte	102819	117290	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
34	N49	Calle 53 - Cra. 30	99691	105022	Terraza Alta	LACUSTRE B	200
35	N50	Cll. 80 - Av. Boyacá	98698	111006	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
36	N51	Av. El Dorado	93310	110908	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
37	PA1	Cll. 68 Cra. 110	94323	112020	Llanura de Inundacion	LACUSTRE A	500
38	PA5	Cll. 68 Cra. 91	95953	110787	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
39	PA7	Cll. 68 Cra. 82	96705	110330	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
40	PA9	Av. Cll 68 Cra. 74 A	97405	109741	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
41	PA10	Av Cll 68 Av Boyaca	97697	109542	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
42	PA11	Cll. 68 Cra. 66	98147	109178	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
43	PA13	Cll. 72 Av. 68	97983	109299	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
44	PA14	Cll 72 Cra 50	99601	108569	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
45	PA15	Cll. 72 Cra. 45 A	99984	108275	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
46	PA16	Cll 72 No 37-37	100485	107904	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
47	PA17	Cll. 72 Cra. 30	100827	107635	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
48	PA19	Cll. 72 Cra. 24	101159	107402	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
49	PA25	Cra. 7 Cll. 65	102044	105865	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
50	PA26	Cra 7 Cll 61	101872	105536	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
51	PA37	Cra. 10 Cll. 18	100401	101194	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
52	PA43	Cll. 13 Cra. 19	99234	101244	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
53	PA46	Cll 13 Av. Ciudad de Quito	98459	102001	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
54	PA49	Av. Ferrocarril Cll. 9	96957	102490	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
55	PA52	Av Ferrocarril Cll 2	95383	101850	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
56	PA55	Av. Ferrocarril Av. 1 Mayo	94135	101411	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
57	PA58	Av 1 Mayo Cra 65	93429	102153	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
58	PA61	Av. 1 Mayo Cra. 74	92692	102560	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
59	PA64	Diag 43 S Transv 81	95383	100561	Terraza Baja	ALUVIAL B	200
60	PA67	Diag. 43 S Cra. 86	90166	102745	Terraza Baja	ALUVIAL B	200

Tabla 5.1. Sitios modelados por UNIANDES

Versión Preliminar para Discusión

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
61	O01	Calle 95 con Carrera 59	100159	109979	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
62	O02	Carrera 1 este N° 13-51	101003	100050	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
63	O03	Cra 46A N° 135-95	102043	114349	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
64	O04	Cra 48F Nº 95-80	100146	110154	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
65	O05	Carrera 46 con calle 140A	102207	114747	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
66	O09	Calle 170 Nº 31-20	104429	116941	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
67	O10	Calle 134 con Cra 46A	101917	114065	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
68	O11	Carrera 9 Nº 151-52	105043	114701	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
69	O15	Carrera 68B N° 43B-20	96854	106499	Terraza Alta	LACUSTRE B	300
70	O17	Crr. 30 - calle 45	99222	104638	Terraza Alta	LACUSTRE B	150
71	O20	Carrera 52 con calle 147	101679	115352	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
72	O22	Trv. 5A # 127 - 00	105740	111924	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
73	O23	Cra 7 # 37 - 69	101278	103231	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
74	O27	Av 9, Calle 153 - 155	105044	114899	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
75	O28	Calle 152 con Carrera 28	104638	114924	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
76	O32	Av. Suba - Diag 117A	100761	111833	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
77	O33	Tranversal 21 Calle 98	102526	109856	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
78	O34	Calle 22 C No 40 - 99	98448	103586	Terraza Alta	LACUSTRE C	200
79	O37	Trv. 32 - Calle 131	103103	113223	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
80	O38	Crr. 9 - Calle 125	105178	111574	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
81	O39	Crr. 47 con Calle 129	101498	112955	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
82	O40	Diagonal 152 Transversal 43	102882	115603	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
83	O41	Calle 136 entre Carrera 13 y Avenida 9	104901	113060	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
84	O43	Carrera 27 con calle 163A	104803	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
85	O44	Calle 26 A con Carrera 13	100729	101999	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
86	O46	Diagonal 165 A N° 28	104886	116279	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
87	AutosurB	Autosur con Av Boyacá	92445	99768	Terraza Baja	ALUVIAL A	150
88	BelAir	Cll 88 con Cr 7	103208	108062	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
89	CAD	Cr 30 con Americas	99639	103258	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
90	CAMPIN	Cr 30 con Cl 57	99991	105629	Terraza Alta	LACUSTRE B	200
91	CITEC	Cr 65 con Cl 17A	96995	106293	Terraza Alta	LACUSTRE B	300
92	Cl114Cr7	Cr 7 con Cl 114	104873	110605	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
93	Cl134Cr9	Cr 9 con Cl 134	104983	112817	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
94	COLGAS	Cr 8 con Cl 37	101100	102975	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
95	ESSO	Cr 7 con Cl 39	101433	103528	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
96	Matatigres	NQS con Autosur	94276	99768	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
97	Megabanco	Cr 13 con Cl 100	103541	109499	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
98	Mudela		103800	125367	Llanura de Inundacion	LACUSTRE A	150
99	Plazatoros	Cr 9 con Cl 26	101211	101759	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
100	PteCl170	Autonorte con Cl 170	103541	117240	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
101	SaludTotal	Autonorte con Cl 100	102210	110052	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
102	SurOuro		94220	94239	Complejo de Conos	PIEDEMONTE C	25

Tabla 5.1. Sitios modelados por UNIANDES (Continuación)

5.1.2 Sociedad Colombiana de Geotecnia

La Sociedad Colombiana de Geotecnia realizó modelaciones de respuesta bidimensionales en 4 secciones. La primera se localizó en el norte, entre los Cerros Orientales y el Cerro de Suba; la segunda a lo largo de la Calle 72 entre los Cerros Orientales y el Río Bogotá; la tercera se ubicó por la Calle 34 desde el Parque Nacional hasta el barrio Quinta Paredes; y la cuarta se realizó en el sur de la ciudad, por el Corredor Férreo desde el barrio el Perdomo hasta el barrio Carvajal.

Como consideraciones generales de los resultados de modelos de la SCG se tiene:

- Emplearon 12 de las señales sísmicas recomendadas sin escalarlas, por lo cual los resultados serán afectados por la desviación estándar de acuerdo con lo presentado en el numeral 3.2.2.

- En los resultados finales presentados se elimino el sismo de Yerbabuena y New Port, y el escenario lejano está modelado con las señales del sismo de México (Ciudad Universitaria), cuyo contenido frecuencial a los 2 segundos es posiblemente

Versión Preliminar para Discusión

demasiado alto, por lo cual los resultados pueden llegar a sobrevalorar, para estos periodos, la demanda sísmica.

- Se presentó para cada sección analizada la variación superficial de la aceleración máxima, con lo que se pudo afinar las zonas de piedemonte e inferir hasta dónde se presentan efectos topográficos debidos a la posición y forma del basamento rocoso.

- Se presentó un análisis aproximado de los registros medidos en algunas de las estaciones de la Red de Acelerógrafos de Bogotá, logrando determinar de manera aproximada el espectro de diseño para cada zona.

En la **Tabla 5.2** se presentan los sitios modelados, su correspondiente coordenada donde se localiza, la zona geológica y geotécnica y el espesor de suelo.

5.1.3 Asociación de Ingeniería Sísmica

La Asociación de Ingeniería Sísmica realizó modelaciones de respuesta unidimensionales en 169 sitios distribuidos por toda la ciudad, como consideraciones generales de sus modelos se tiene:

- Emplearon las 16 señales sísmicas recomendadas, escalando estas a los niveles dados en el estudio de MZSB, por lo cual se trabajó con el promedio de los resultados de acuerdo con lo presentado en el numeral 3.2.1.

- Se obtuvo la respuesta en cada sitio a partir de la modelación de 30 perfiles, con el fin de tener en cuenta la variación de las propiedades dinámicas y de la señal de diseño, esto se realizó para cada escenario sísmico de manera tal que en cada sitio se contaba con 90 modelaciones diferentes, para un total de 15210 corridas.

En la **Tabla 5.3** se presentan los sitios modelados, su correspondiente coordenada donde se localiza, la zona geológica y geotécnica y el espesor de suelo.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
1	ND-145	Sección 1 Cll 150	100348	115004	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
2	ND-375	Sección 1 Cll 150	100405	115004	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
3	ND-800	Sección 1 Cll 150	100502	115004	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
4	ND-1565	Sección 1 Cll 150	100759	115004	Terraza Alta	LACUSTRE A	50
5	ND-2067	Sección 1 Cll 150	100914	115004	Terraza Alta	LACUSTRE A	50
6	ND-2873	Sección 1 Cll 150	101790	115003	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
7	ND-3121	Sección 1 Cll 150	101939	115003	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
8	ND-3687	Sección 1 Cll 150	102141	115003	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
9	ND-4012	Sección 1 Cll 150	102358	115003	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
10	ND-4125	Sección 1 Cll 150	102444	115003	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
11	ND-4475	Sección 1 Cll 150	102872	115002	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
12	ND-4685	Sección 1 Cll 150	103128	115002	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
13	ND-5035	Sección 1 Cll 150	103584	115002	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
14	ND-5385	Sección 1 Cll 150	104040	115002	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
15	ND-5665	Sección 1 Cll 150	104404	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
16	ND-5945	Sección 1 Cll 150	104704	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
17	ND-6145	Sección 1 Cll 150	104782	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
18	ND-6467	Sección 1 Cll 150	104849	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
19	ND-6750	Sección 1 Cll 150	105015	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
20	ND-6978	Sección 1 Cll 150	105162	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
21	ND-7344	Sección 1 Cll 150	105302	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
22	ND-7616	Sección 1 Cll 150	105438	115001	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
23	ND-7926	Sección 1 Cll 150	105528	115001	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
24	ND-8103	Sección 1 Cll 150	105617	115001	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
25	ND-8540	Sección 1 Cll 150	105749	115000	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
26	ND-8752	Sección 1 Cll 150	105886	115000	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
27	ND-9114	Sección 1 Cll 150	105920	115000	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
28	ND-9212	Sección 1 Cll 150	105953	115000	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
29	ND-9401	Sección 1 Cll 150	106013	115000	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
30	ND-9513	Sección 1 Cll 150	106048	115000	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
31	ND-9662	Sección 1 Cll 150	106077	115000	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
32	ND-9746	Sección 1 Cll 150	106099	115000	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
33	ND-217	Sección 2 Cll 72	93447	112948	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
34	ND-505	Sección 2 Cll 72	94270	112356	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
35	ND-707	Sección 2 Cll 72	94718	112035	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
36	ND-1010	Sección 2 Cll 72	95274	111636	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
37	ND-1212	Sección 2 Cll 72	95556	111433	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
38	ND-1313	Sección 2 Cll 72	95873	111206	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
39	ND-1515	Sección 2 Cll 72	96405	110824	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
40	ND-1818	Sección 2 Cll 72	96811	110532	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
41	ND-2020	Sección 2 Cll 72	97348	110147	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
42	ND-2323	Sección 2 Cll 72	97712	109886	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
43	ND-2626	Sección 2 Cll 72	98162	109562	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
44	ND-2828	Sección 2 Cll 72	98479	109334	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
45	ND-3434	Sección 2 Cll 72	99584	108541	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
46	ND-3939	Sección 2 Cll 72	100531	107862	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
47	ND-4141	Sección 2 Cll 72	100723	107723	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
48	ND-4343	Sección 2 Cll 72	100818	107655	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
49	ND-4747	Sección 2 Cll 72	101146	107420	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
50	ND-4930	Sección 2 Cll 72	101307	107304	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
51	ND-5498	Sección 2 Cll 72	101424	107220	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
52	ND-5981	Sección 2 Cll 72	101509	107159	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
53	ND-6360	Sección 2 Cll 72	101603	107092	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
54	ND-6983	Sección 2 Cll 72	101699	107023	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
55	ND-7154	Sección 2 Cll 72	101805	106947	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
56	ND-7770	Sección 2 Cll 72	101883	106891	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
57	ND-7825	Sección 2 Cll 72	101895	106882	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
58	ND-7999	Sección 2 Cll 72	101995	106810	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
59	ND-8087	Sección 2 Cll 72	102210	106656	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
60	ND-8175	Sección 2 Cll 72	102424	106502	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100

Tabla 5.2. Sitios modelados por SCG

Versión Preliminar para Discusión

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
61	ND-8219	Sección 2 Cll 72	102531	106425	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
62	ND-8263	Sección 2 Cll 72	102639	106348	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
63	ND-8336	Sección 2 Cll 72	102734	106279	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
64	ND-8420	Sección 2 Cll 72	102762	106259	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
65	ND-8628	Sección 2 Cll 72	102786	106242	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
66	ND-8868	Sección 2 Cll 72	102817	106220	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
67	ND-8986	Sección 2 Cll 72	102832	106209	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
68	ND-9315	Sección 2 Cll 72	102920	106146	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
69	ND-9651	Sección 2 Cll 72	103038	106061	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
70	ND-9795	Sección 2 Cll 72	103078	106032	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
71	ND-9819	Sección 2 Cll 72	103090	106024	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
72	ND-9924	Sección 2 Cll 72	103155	105977	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
73	ND-200	Sección 3 Cl 34	98754	103204	Terraza Alta	LACUSTRE C	150
74	ND-480	Sección 3 Cl 35	99171	103137	Terraza Alta	LACUSTRE C	150
75	ND-900	Sección 3 Cl 36	99577	103072	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
76	ND-1122	Sección 3 Cl 37	99743	103046	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
77	ND-1404	Sección 3 Cl 38	100055	102996	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
78	ND-1620	Sección 3 Cl 39	100294	102957	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
79	ND-2247	Sección 3 Cl 40	100555	102916	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
80	ND-2578	Sección 3 Cl 41	100647	102901	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
81	ND-3277	Sección 3 Cl 42	100760	102883	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
82	ND-3816	Sección 3 Cl 43	100867	102866	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
83	ND-4075	Sección 3 Cl 44	100939	102854	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
84	ND-4615	Sección 3 Cl 45	101082	102831	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
85	ND-5021	Sección 3 Cl 46	101169	102817	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
86	ND-5176	Sección 3 Cl 47	101246	102805	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
87	ND-5410	Sección 3 Cl 48	101324	102793	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
88	ND-5985	Sección 3 Cl 49	101376	102784	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
89	ND-6435	Sección 3 Cl 50	101419	102778	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
90	ND-6669	Sección 3 Cl 51	101454	102772	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
91	ND-6997	Sección 3 Cl 52	101499	102765	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
92	ND-7236	Sección 3 Cl 53	101585	102751	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
93	ND-7800	Sección 3 Cl 54	101822	102713	Formacion Bogota	CERROS B	0
94	ND-8027	Sección 3 Cl 56	101919	102698	Formacion Cacho	CERROS A	0
95	ND-8346	Sección 3 Cl 56	102082	102671	Formacion Guaduas	CERROS A	0
96	ND-1628	Sección 4 Av Ferrocaril	90520	99917	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
97	ND-979	Sección 4 Av Ferrocaril	89812	99631	Complejo de Conos	ALUVIAL B	50
98	ND-2718	Sección 4 Av Ferrocaril	91891	100469	Complejo de Conos	ALUVIAL B	150
99	ND-738	Sección 4 Av Ferrocaril	89540	99522	Llanura de Inundacion	ALUVIAL B	50
100	ND-365	Sección 4 Av Ferrocaril	89158	99368	Complejo de Conos	ALUVIAL B	50
101	ND-256	Sección 4 Av Ferrocaril	88924	99274	Suelo Residual	PIEDEMONTE C	25
102	ND-327	Sección 4 Av Ferrocaril	89073	99334	Complejo de Conos	ALUVIAL B	50
103	ND-3316	Sección 4 Av Ferrocaril	92730	100806	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
104	ND-1986	Sección 4 Av Ferrocaril	90790	100025	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
105	ND-37	Sección 4 Av Ferrocaril	88471	99091		CERROS A	0
106	ND-853	Sección 4 Av Ferrocaril	89676	99577	Llanura de Inundacion	ALUVIAL B	50
107	ND-4900	Sección 4 Av Ferrocaril	94937	101695	Terraza Baja	ALUVIAL B	200
108	ND-574	Sección 4 Av Ferrocaril	89409	99469	Complejo de Conos	ALUVIAL B	50
109	ND-1367	Sección 4 Av Ferrocaril	90217	99794	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
110	ND-4002	Sección 4 Av Ferrocaril	93695	101195	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
111	ND-2295	Sección 4 Av Ferrocaril	91218	100198	Complejo de Conos	ALUVIAL B	150
112	ND-1144	Sección 4 Av Ferrocaril	89964	99692	Complejo de Conos	ALUVIAL B	50
113	ND-458	Sección 4 Av Ferrocaril	89286	99420	Complejo de Conos	ALUVIAL B	50

Tabla 5.2. Sitios modelados por SCG (Continuación)

VERSIÓN PRELIMINAR PARA DISCUSIÓN DPAE – COORDINACIÓN DE ESTUDIOS TÉCNICOS

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
1	Z1-01	Carrera 3 con Calle 76	103012	106687	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
2	Z1-02	Calle 32S con Calle 15C	96147	97679	Terraza Baja	ALUVIAL A	50
3	Z1-03	Carrera 7 con Calle 45	101494	103882	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
4	Z1-04	Calle 132 con Calle 59-80	100328	114358	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
5	Z2-01	Carrera 9 con Calle 93	103584	108492	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
6	Z2-02a	Calle 64 con Carrera 7	105974	114284	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
7	Z2-02b	Calle 64 con Carrera 7	105974	114284	Formacion Labor-Tierna	CERROS A	0
8	Z2-03	Carrera 30 con Calle 13	98425	101996	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
9	Z2-04	Carrera 13ª entre Calles 31 y	100986	102521	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
10	Z2-05	Carrera 8 con Calle 86	103316	107830	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
11	Z2-06	Carrera 7 con Av 39	101291	103301	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
12	Z2-07a	Calle 138 con Carrera 60A - 6	100379	114980	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
13	Z2-07b	Calle 138 con Carrera 60A - 6	100379	114980	Coluvion	PIEDEMONTE A	25
14	Z2-08	Av Caracas con Calle 53	101266	104873	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
15	Z2-09	Calle 27 con Carrera 13	100710	102117	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
16	Z2-10	Calle 26a con Carrera 13	100733	101997	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
17	Z2-11	Calle 67 con Carrera 9	101979	106139	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
18	Z2-12	Carrera 9 con Calle 71	102230	106513	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
19	Z2-13	Carrera 9 con Calle 71	102230	106513	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
20	Z2-14	Calle 68 con Carrera 6	102411	106146	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
21	Z2-15	Calle 40 con Carrera 7	101388	103890	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
22	Z2-16	Carrera 13 con Calle 31	100986	102521	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
23	Z2-17	Carrera 7 con Calle 37	101268	103154	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
24	Z2-18	Carrera 7 con Calle 45	101494	103882	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
25	Z2-19	Carrera 6 con Calle 40	101438	103400	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
26	Z2-20	Calle 77 con Carrera 3	103057	106830	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
27	Z2-21	Calle 87 con Carrera 8	103402	107985	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
28	Z2-22	Calle 26A con Carrera 13	100733	101997	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
29	Z2-25	Carrera 7 con Calle 61	101876	105535	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
30	Z2-26	Carrera 7 con Calle 65	102048	105865	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
31	Z2-29	Carrera 10 con Calle 18	100405	101192	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
32	Z2-31	Calle 55 con Carrera 6	101738	104958	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
33	Z2-32	Calle 62 con Carrera 7	100774	101805	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
34	Z2-33	Carrera 7 con Calle 34	101151	102784	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
35	Z2-34	Carrera 7 con Calle 36	101244	103000	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
36	Z2-37	Carrera 8 con Calle 49	101439	104164	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
37	Z2-38	Calle 67 con Carrera	102167	106028	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
38	Z2-39	Carrera 8 con Calle 48	101459	104285	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
39	Z2-40	Carrera 8 con Calle 46	101421	104048	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
40	Z2-41	Carrera 5 con Calle 26	101120	101753	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
41	Z2-42	Carrera 7 con Calle 72	102466	106478	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
42	Z2-43	Carrera 6 con Calle 55	101738	104958	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
43	Z2-44	Carrera 7 con Calle 32	101033	102436	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
44	Z2-45	Calle 47 con Carrera 7	101517	104148	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
45	Z2-46	Calle 72 con Carrera 7	102457	106473	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
46	Z2-47	Carrera 7 con Calle 70	102340	106249	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
47	Z2-48	Carrera 6 con Calle 27	101047	102136	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
48	Z2-49	Carrera 7 con Calle 66	102099	105947	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
49	Z2-50	Carrera 7 con Calle 64	102009	105777	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
50	Z1_Z2-01	Calle 19A con Carrera 1E	103298	107155	Coluvion	PIEDEMONTE B	50
51	Z2_Z3-01	Calle 72 con Carrera 15	101771	106953	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
52	Z1_Z2-02	Carrera 7 con Calle 127	105428	111606	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
53	Z2_Z3-02	Avenida 9 con calle 147	105021	114290	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
54	Z1_Z2-03a	Carrera 7 con Calle 132	105377	112611	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
55	Z2_Z3-03	Calle 130 con Carrera 10	105141	112248	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
56	Z1_Z2-03b	Carrera 7 con Calle 132	105377	112611	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
57	Z2_Z3-04	Calle 122 con Carrera 9A	105007	111354	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
58	Z1_Z2-06	Carrera 1 este con 13	101007	100047	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
59	Z2_Z3-06	Calle 73 con Carrera 13	101993	106993	Complejo de Conos	ALUVIAL B	50
60	Z1_Z2-07	Transversal 5A con 127	105745	111926	Coluvion	PIEDEMONTE A	25

Tabla 5.3. Sitios modelados por AIS

Versión Preliminar para Discusión

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
61	Z2_Z3-07	Calle 72 con Carrera 11	102085	106732	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
62	Z2_Z3-08	Av 9 con Calle 114	104628	110620	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
63	Z2_Z3-09	Av 9 con Calle 125	104965	111623	Complejo de Conos	PIEDEMONTE A	25
64	Z2_Z3-10	Av caracas con Calle 55	101268	105130	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
65	Z2_Z3-11	Calle 72 con Carrera 17	101593	107089	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
66	Z2_Z3-12	Calle 72 con Carrera 13	101900	106867	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
67	Z2_Z3-13	Calle 106 con Carrera 8B	104560	109889	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
68	Z2_Z3-14	Carrera 92 con Calle 153	99453	117066	Formacion Guaduas	CERROS A	0
69	Z2_Z3-15	Carrera 30 con Calle 45	99222	104638	Terraza Alta	LACUSTRE B	150
70	Z2_Z3-16	Calle 94 con Carrera 10	103544	108916	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
71	Z2_Z3-17	Carrera 27 con Calle 163A	104841	116026	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
72	Z2_Z3-18	Calle 138 con Carrera 57	100798	114829	Terraza Alta	LACUSTRE A	50
73	Z2_Z5-01	Calle 13 con Carrera 17	99443	101057	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
74	Z2_Z5-02	Calle 13 con Carrera 16	99541	100971	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
75	Z2_Z5-03	Carrera 13 con Calle 13	99840	100716	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
76	Z2_Z5-04	Carrera 10 con Calle 13	100083	100650	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
77	Z2_Z5-05	Carrera 10 con Calle 15	100167	100780	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
78	Z2_Z5-06	Calle 13 con Carrera 19	100167	100780	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
79	Z2_Z5-07	Calle 13 con Carrera 19	99802	100762	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
80	Z2_Z5-08	Calle 13 con Carrera 30	98396	101092	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
81	Z2_Z5-09	Calle 13 con Carrera 30	98396	101092	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
82	Z2_Z5-10	Calle 13 con Carrera 16	99541	100971	Complejo de Conos	PIEDEMONTE B	50
83	Z3-01	Calle 43A con Carrera 68A Bis	96492	105180	Llanura de Inundacion	LACUSTRE B	300
84	Z3-02	Calle 145 con Carrera 47	101981	115298	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
85	Z3-03	Calle 175 con Carrera 39	102870	117615	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
86	Z3-04	Calle 135 Av Boyaca	100780	114488	Terraza Alta	LACUSTRE A	50
87	Z3-05	Diagonal 22 B con Carrera 63	96976	105328	Terraza Alta	LACUSTRE B	250
88	Z3-06	Carrera 30 con Callle 26	99604	103436	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
89	Z3-07	Calle 138 con Carrera 54	101303	114686	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
90	Z3-08	Calle 144 con Carreras 99BA	98466	116348	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
91	Z3-09	Calle 143B con Carrera 48	101867	114960	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
92	Z3-10	Calle 191 con Carrera 34	105148	119004	Terraza Alta	LACUSTRE A	50
93	Z3-11	Carrera 43A con Calle 145	102411	115060	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
94	Z3-12	Calle 153 con Carrera 98	98910	117260	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
95	Z3-13	Carrera 63 con Diagonal 22A	97384	104521	Terraza Alta	LACUSTRE C	250
96	Z3-14	Carrera 45 con calle 64	99322	107449	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
97	Z3-15	Diagonal 183 con 91	103919	118056	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
98	Z3-16	Carrera 46A con Calle 135	101948	114167	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
99	Z3-17	Carrera 28 con Calle 165	104870	116266	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
100	Z3-18	Carrera 94 con Calle 170	101477	117579	Terraza Alta	LACUSTRE A	100
101	Z3-19	Diagonal 22a con 68d	96345	106424	Terraza Alta	LACUSTRE B	300
102	Z3-20	Calle 81 con Autopista	101908	108009	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
103	Z3-21	Calle 80 con Escuela Militar	101021	108714	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
104	Z3-22	Calle 63 con Carrera 30	100184	106131	Terraza Alta	LACUSTRE B	200
105	Z3-23	Calle 26 con Carrera 50	98107	104816	Terraza Alta	LACUSTRE B	250
106	Z3-24	Carrera 53 con calle 13	96527	103596	Terraza Alta	LACUSTRE C	200
107	Z3-25	Calle 170 con Autopista Norte	103440	117172	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
108	Z3-26	Calle 13 con Avenida Boyaca	94564	105865	Terraza Baja	ALUVIAL B	250
109	Z3-27	Carrera 46 con Calle 140A	102210	114750	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
110	Z3-28	Avenida NQS con Calle 26	99586	103393	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
111	Z3-29	Calle 170 con Carrera 31	104433	116945	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
112	Z3-30	Calle 134 con Carrera 46A	101920	114068	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
113	Z3-31	Carrera 68B con Calle 43B	96856	106498	Terraza Alta	LACUSTRE B	300
114	Z3-32	Carrera 52 con Calle 147	101682	115355	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
115	Z3-33	Calle 152 con Carrera 28	104461	115014	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
116	Z3-34	Diagonal 152 con Transversal	102886	115607	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
117	Z3-35	Carrera 30 con Calle 6	97702	101125	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
118	Z3-36	Transversal 32 con Calle 131	103107	113226	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
119	Z3-37	Calle 22C con Carrera 40	98500	103539	Terraza Alta	LACUSTRE C	200
120	Z3-38	Calle 43A con Carrera 68a Bis	99452	103645	Terraza Alta	LACUSTRE C	150

Tabla 5.3. Sitios modelados por AIS (Continuación)

VERSIÓN PRELIMINAR PARA DISCUSIÓN

No	ID	LOCALIZACIÓN	X	Y	UNIDAD GEOLÓGICA	ZONA GEOTÉCNICA	ESPESOR (M)
121	Z3-39	Calle 72 con Carrera 28	100971	107526	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
122	Z3-40	Calle 72 con Carrera 30	100831	107635	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
123	Z3-41	Calle 72 con Carrera 37	100488	107904	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
124	Z3-42	Calle 72 con Carrera 45A	99932	108317	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
125	Z3-43	Calle 72 con Carrera 50	99604	108569	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
126	Z3-44	Calle 72 con Carrera 20	101433	107200	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
127	Z3-45	Calle 72 con Carrera 24	101163	107402	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
128	Z3-46	Calle 13 con Carrera 39	97536	102744	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
129	Z3-47	Calle 13 con Carrera 35	97966	102369	Complejo de Conos	ALUVIAL B	150
130	Z3-48	Carrera 89C con Calle 42	94786	109065	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
131	Z3-49	Avenida Chile con Carrera 24	101172	107380	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
132	Z3-50	Avenida Chile con NQS	100464	107913	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
133	Z3-51	Avenida Chile con Carrera 31	100733	107700	Terraza Alta	LACUSTRE A	250
134	Z3-52	Calle 53 con Carrera 30	99837	105135	Terraza Alta	LACUSTRE B	200
135	Z3_Z4-01	Transversal 32 con Calles 131	103107	113226	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
136	Z3_Z4-02	Calle 95 con Carrera 59	99775	110485	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
137	Z3_Z4-03	Calle 116 con Avenida Suba	100748	111885	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
138	Z3_Z4-04	Av Suba con Diag 117A	100763	111829	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
139	Z3_Z4-05	Calle 68 con Carrera 66	98149	109178	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
140	Z3_Z4-06	Calle 127 con Carrera 29	96756	108864	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
141	Z3_Z4-07	Transversal 21 con Calle 98	102530	109857	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
142	Z3_Z4-08	Calle 72 con Avenida 68	98447	109706	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
143	Z3_Z4-09	Calle 68 con Carrera 61	98494	108948	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
144	Z4-01	Calle 59ª con Carrera 74	96858	108872	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
145	Z4-02	Carrera 48F con Calle 95	100294	110262	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
146	Z4-03	Avenida Calle 100 con Carrera	103176	109877	Terraza Alta	LACUSTRE A	150
147	Z4-04	Calle 127 con Autopista Norte	102605	112250	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
148	Z4-05	Calle 91 con Carreras 17	102576	108801	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
149	Z4-06	Calle 100 con Autopista Norte	103315	110008	Terraza Alta	LACUSTRE A	200
150	Z4-07	Calle 68 con Carrera 82	97008	110910	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
151	Z4-08	Calle 68 con Carrera 86	96483	110460	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
152	Z4-09	Calle 68 con Carrera 91	96027	110739	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
153	Z4-10	Carrera 98 con Calle 68	95853	111131	Terraza Alta	LACUSTRE A	400
154	Z4-11	Calle 68 con Carrera 102	95494	112053	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
155	Z4-12	Calle 68 con Diagonal 105F	94863	111722	Llanura de Inundacion	LACUSTRE A	500
156	Z4-13	Calle 68 con Carrera 110	94324	112021	Llanura de Inundacion	LACUSTRE A	500
157	Z4-14	Calle 68 con Carrera 74A	97407	109742	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
158	Z4-15	Calle 68 con Carrera 76	97194	109900	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
159	Z4-16	Calle 68 con Carrera 82	97003	110910	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
160	Z4-17	Carrera 111 con Calle 157	98294	118288	Terraza Alta	LACUSTRE A	300
161	Z4-18	Carrera 117 con Calle 68	93505	113072	Terraza Alta	LACUSTRE A	500
162	Z5-01	Carrera 92 con Calle 6	91668	104961	Terraza Baja	ALUVIAL B	250
163	Z5-02	Calle 3 sur con Carrera 70	94043	102608	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
164	Z5-03	Avenida 68 con Calle 30 sur	94171	101199	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
165	Z5-04	Transversal 72A con Calle 12A	93893	105508	Complejo de Conos	ALUVIAL B	250
166	Z5-05	Carrera 27 con Calle 44S	94494	98561	Complejo de Conos	ALUVIAL B	100
167	Z5-06	Diagonal 43S con Carrera 86	90166	102742	Terraza Baja	ALUVIAL B	200
168	Z5-07	Diagonal 43S con Carrera 81	90461	102272	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200
169	Z5-08	Diagonal 42S con Carrera 84	90576	102720	Complejo de Conos	ALUVIAL B	200

Versión Preliminar para Discusión

Tabla 5.3. Sitios modelados por AIS (Continuación)

En la **Figura 5.1** se presenta la ubicación de los sitios de análisis, donde es importante mencionar que cada sitio fue revisado cuidadosamente, debido a que había algunas inconsistencias en las coordenadas.

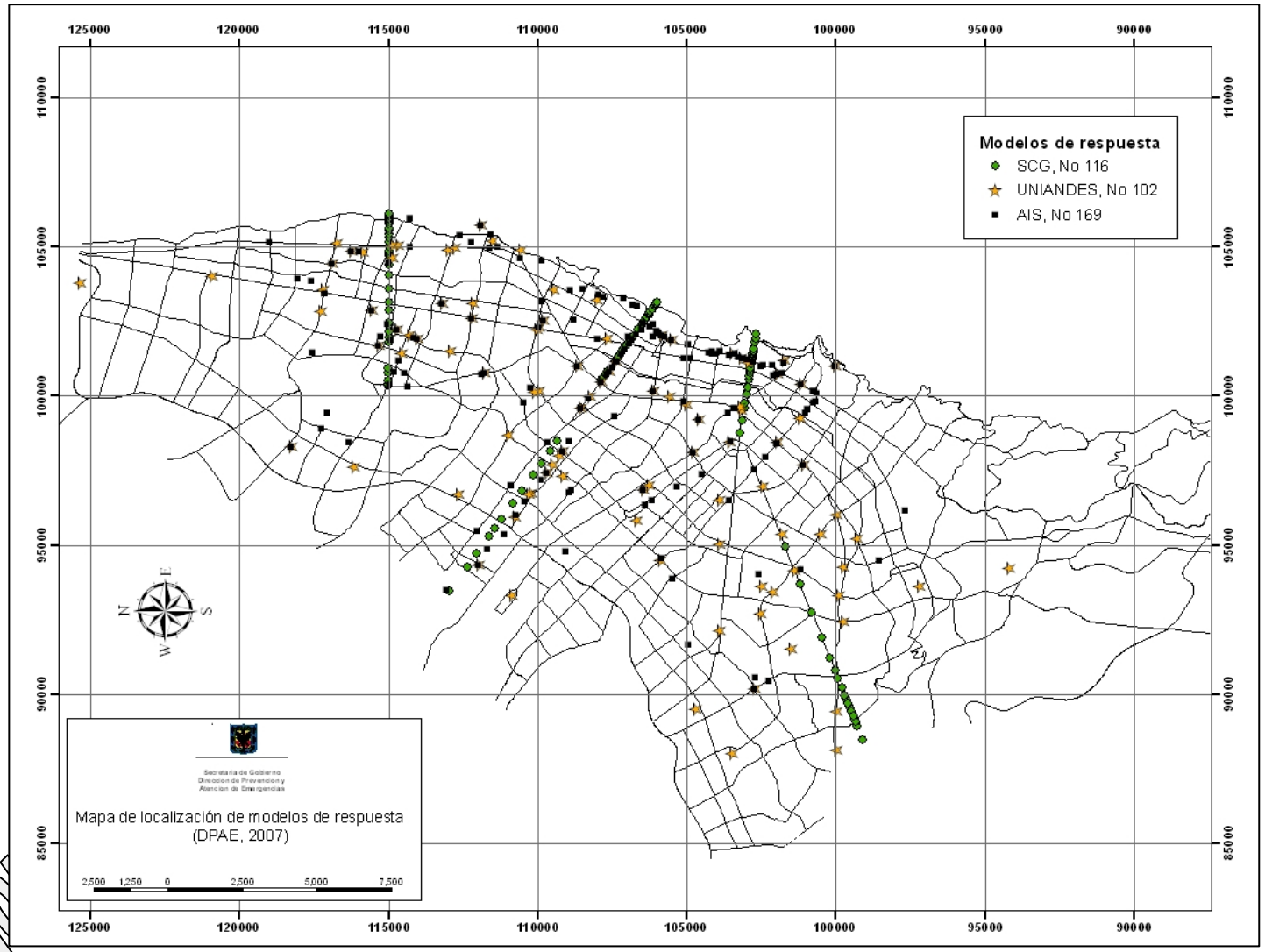


Figura 5.1. Localización de los modelos de respuesta

Versión

5.2 AGRUPACIÓN DE LOS MODELOS DE RESPUESTA

Con el fin de lograr caracterizar el comportamiento dinámico de cada una de las zonas geotécnicas de respuesta sísmica, se agruparon los resultados anteriores de acuerdo con su localización. En la **Tabla 5.4** y en la **Figura 5.2** se presenta la distribución de los modelos realizados por cada convenio en cada una de las zonas.

ZONA	TOTAL	SCG	UNIANDES	AIS
CERROS A	10	7	0	3
CERROS B	1	1	0	0
PIEDEMONTE A	24	9	5	10
PIEDEMONTE B	82	26	9	47
PIEDEMONTE C	2	1	1	0
LACUSTRE A	162	42	50	70
LACUSTRE B	16	0	8	8
LACUSTRE C	8	2	2	4
ALUVIAL A	4	0	3	1
ALUVIAL B	75	25	24	26
TOTAL	384	113	102	169

Tabla 5.4. Número de modelos por zona geotécnica de respuesta sísmica

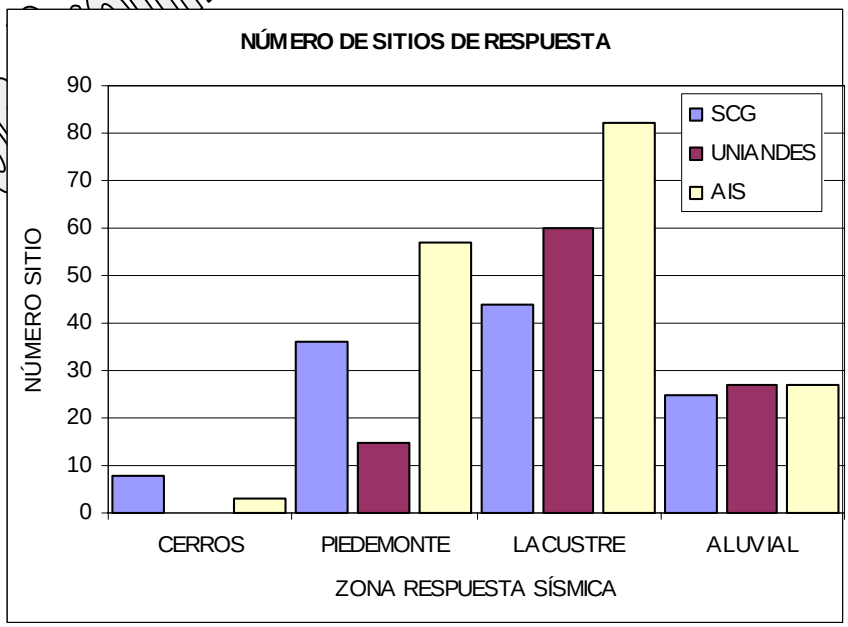


Figura 5.2. Distribución de los modelos de respuesta en cada zona

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

5.3 ZONIFICACIÓN DE EFECTOS LOCALES

A medida que se iban realizando los análisis de los resultados se logró agrupar algunas de las zonas de respuesta sísmica, es así como de las 30 zonas de respuesta sísmica presentadas en el numeral 4.3.4 se llegó a simplificar para efectos de diseño a 14 zonas. En general, se agruparon las subdivisiones geotécnicas (i.e. A, B y C), pero se conservaron las subdivisiones por la profundidad del depósito (i.e. 50 m, 100m, etc.).

Se ilustra en la **Tabla 5.5** el identificador de cada zona, nombre, descripción geotécnica, espesor del depósito, intervalo de periodo fundamental del suelo y posibles efectos de sitio relacionados. Finalmente, se presenta el Mapa de Zonificación de Efectos Locales de Bogotá (**MAPA No 2**) a continuación en la **Figura 5.3**.

Versión Preliminar Para Discusión Enero 2008

No	Identificador	Nombre	Descipción Geotécnica	Espesor del depósito (m)	Periodo fundamental del suelo (s)	Efectos de sitio relacionados
1	Cerro	Cerros	Roca sedimentaria		<0.3	Topográfico y inestabilidad de taludes
2	Piedemonte	Piedemonte	Suelo coluvial y aluvial	< 50	0.3-0.6	Topográfico y inestabilidad de taludes
3	Lacustre-50	Lacustre	Suelo lacustre blando	< 50	1.0-1.5	Amplificación
4	Lacustre-100			50-100	1.5-2.5	Amplificación
5	Lacustre-150			100-150	2.3-3.0	Amplificación
6	Lacustre-200			150-200	2.8-3.5	Amplificación
7	Lacustre-250			200-250	3.3-4.0	Amplificación
8	Lacustre-300			250-300	3.8-4.5	Amplificación
9	Lacustre-500			300-500	4.3-6.5	Amplificación
10	Aluvial-50	Aluvial	Suelo aluvial duro	< 50	0.4-0.8	Amplificación, licuación
11	Aluvial-100			50-100	0.8-1.2	Amplificación, licuación
12	Aluvial-150			100-150	1.2-1.8	Amplificación, licuación
13	Aluvial-200			150-200	1.8-2.5	Amplificación, licuación
14	Aluvial-250			200-250	2.5-3.2	Amplificación, licuación

Tabla 5.5. Descripción de las zonas de efectos locales

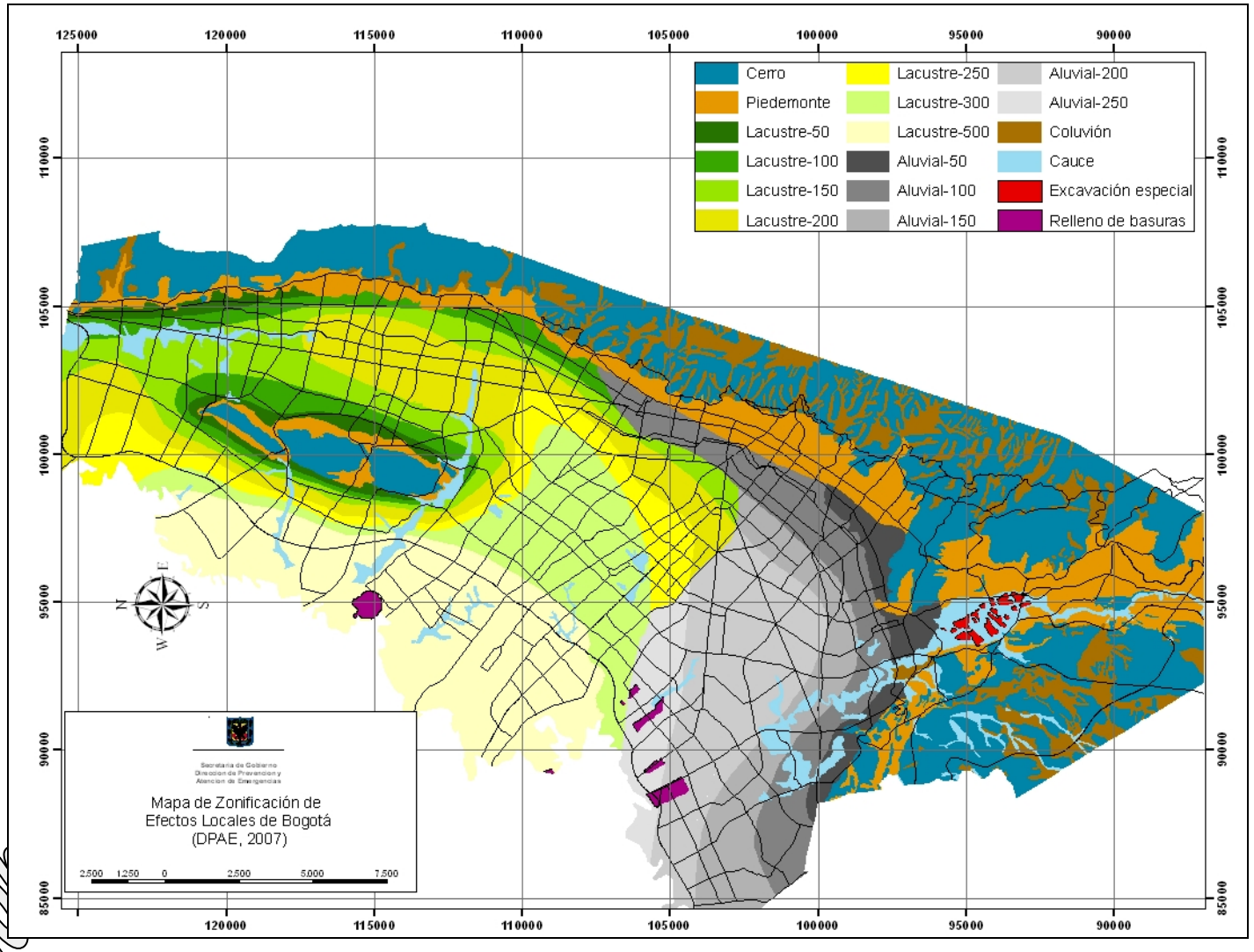


Figura 5.3. Mapa de efectos locales de la ciudad de Bogotá

Versión

5.4 CÁLCULO DE ESPECTROS SUAVIZADOS

Una vez agrupados los resultados de los modelos en cada una de las 14 zonas finalmente establecidas se procedió a calcular los espectros suavizados y de diseño. La forma del espectro suavizado o de diseño tiene la configuración mostrada en la **Figura 5.4** en términos de la aceleración espectral. Esta forma espectral se compone de cuatro segmentos, los dos primeros corresponde a la parte donde se controla las aceleraciones, el siguiente corresponde al control de velocidades y el último limita los desplazamientos espectrales. Con esta forma espectral se logra tener control en cada una de las componentes espectrales de la respuesta, aceleración, velocidad y desplazamiento, lo cual constituye un avance importante frente a los espectros de diseño vigentes que están controlados básicamente por la aceleración espectral.

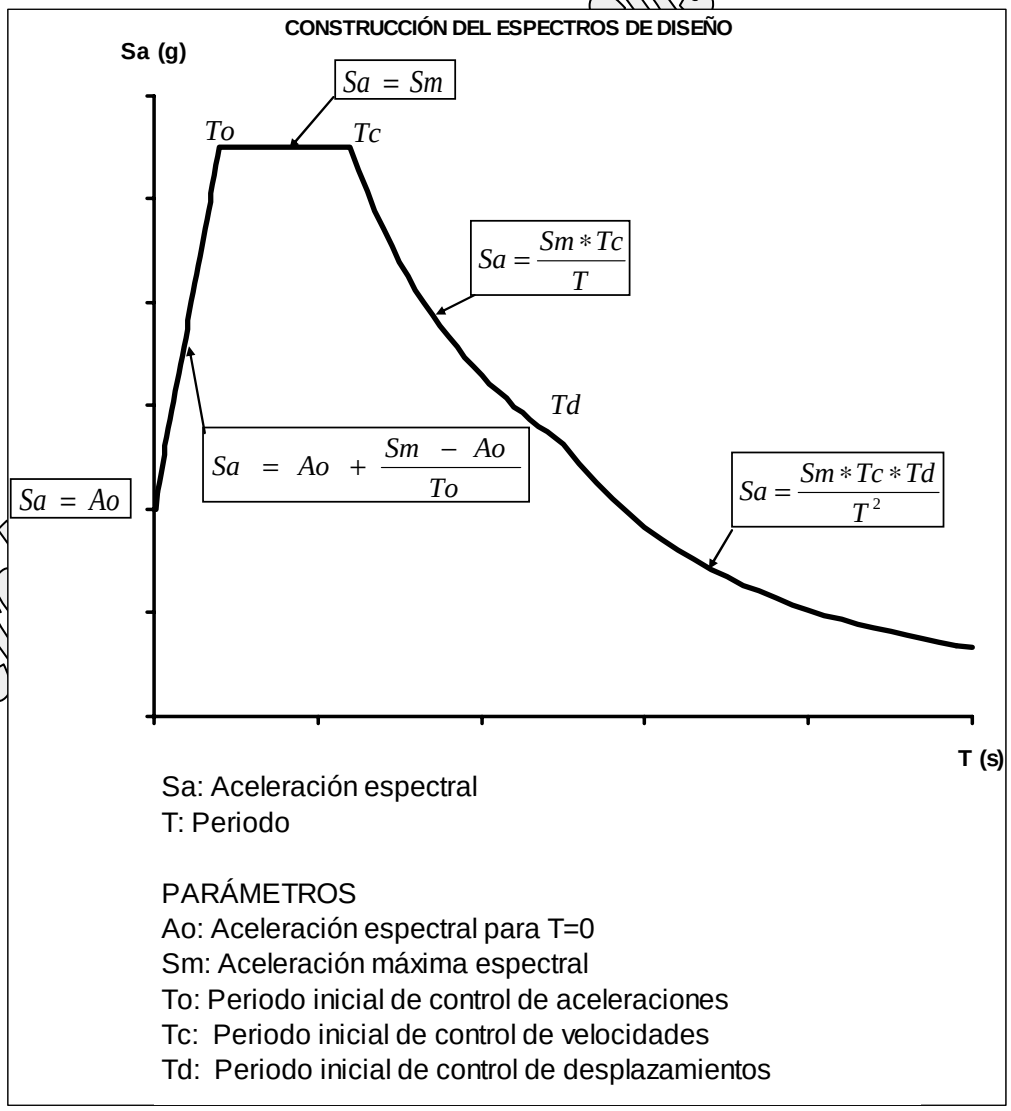


Figura 5.4. Construcción del espectro suavizado

Versión Enero 2018

A continuación se resumen los criterios generales tenidos en cuenta para definir los espectros suavizados y de diseño de cada zona.

- Dadas las características particulares de cada escenario sísmico analizado y puesto que es improbable que se presente un sismo que envuelva todas las condiciones al mismo tiempo, se agruparon las respuestas espectrales en dos tipos: cercana o de vibración forzada que tiene en cuenta las señales de la fuente local y regional; y lejana o de vibración libre que contempla la fuente de subducción. De modo que no se presenta un espectro único de diseño sino dos espectros para cada una de las zonas, los cuales de deben emplear como dos hipótesis diferentes de carga en el diseño sismo-resistente.

- Las aceleraciones espectrales puntuales son omitidas, es decir, aceleraciones espectrales con picos pronunciados de menos de 0.1 segundos de amplitud aproximadamente. Esto se debe a que el contenido de energía es menor en estos picos y en la mayoría de los casos son causados por efectos propios de la señal de entrada al modelo.

- Como se analizó en el Capítulo 3, las señales de Yerbabuena y de México fueron cuidadosamente analizadas, por ello los espectros suavizados o de diseño en varios casos parecen hacer caso omiso de las amplificaciones debidas por estas señales.

- Se tuvo en cuenta de manera cualitativa el efecto de la frecuencia de aplicación de las cargas en el amortiguamiento, lo cual ha sido estudiado por Hashash & Park (2002), los análisis han concluido que el amortiguamiento a bajas deformaciones está asociado al efecto viscoso del suelo y es función de la frecuencia, tal como se ilustra **Figura 5.5**. Este amortiguamiento se denomina de Rayleigh y está compuesto básicamente de una componente proporcional a la masa y otra proporcional a la rigidez. Como se puede observar para frecuencias de vibración inferiores a 0.1 s y mayores a 1 s los amortiguamientos viscosos son superiores a los que usualmente se asumen constantes en los modelos de respuesta. Esto en gran medida explica algunas amplificaciones excesivas en estos intervalos, especialmente en periodos superiores a 2 segundos, que son muy poco probables de producirse en la realidad.

Además de los anteriores criterios para cada zona se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos que se resumen a continuación.

5.4.1 Cerros

Se presentan dos campos dominantes, el cercano que incluye las señales locales y regionales y el lejano que corresponde a los sismos de subducción. Sin embargo para efectos prácticos el espectro cercano puede contener al lejano.

En esta zona se tuvieron en cuenta predominantemente los resultados de la modelación bidimensional, puesto que esta incluye los efectos topográficos. Además, se evaluó la amplificación teórica debida a los accidentes topográficos (1.5 veces).

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

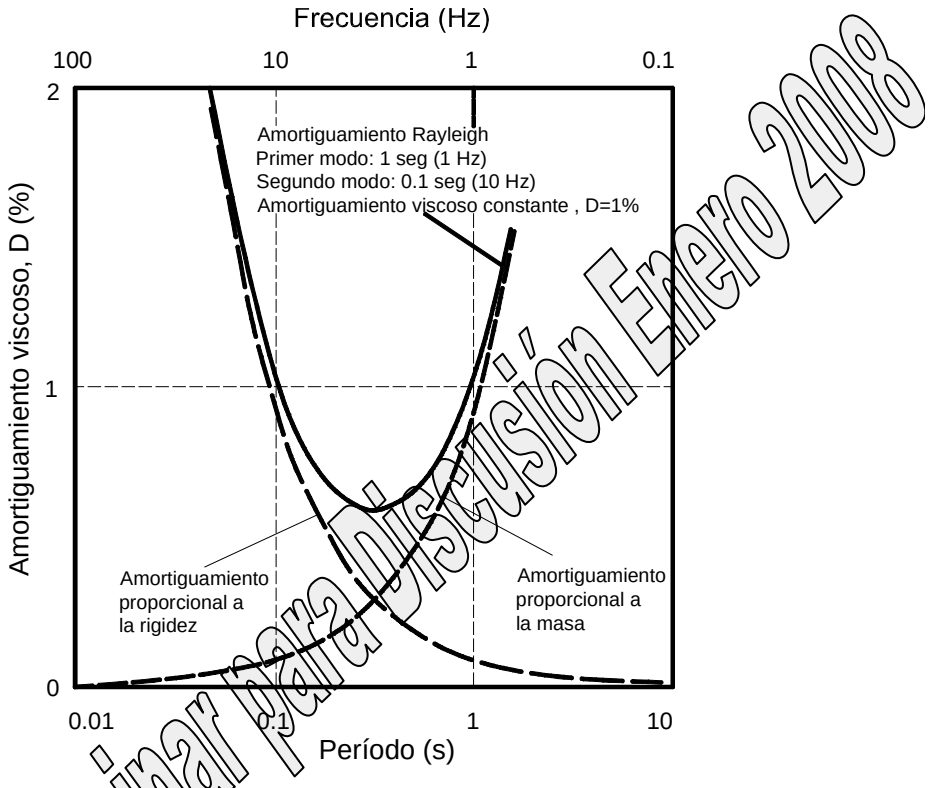


Figura 5.5. Variación del amortiguamiento viscoso en función de la frecuencia empleando la formulación del amortiguamiento de Rayleigh (Hashash et al., 2002)

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

5.4.2 Piedemonte

Se presentan dos campos dominantes, el cercano que incluye las señales locales y regionales y el lejano que corresponde a los sismos de subducción. Sin embargo para efectos prácticos el espectro cercano puede contener al lejano.

Igualmente que en el caso anterior, se consideraron en esta zona prioritariamente los resultados de los modelos bidimensionales que tienen en cuenta el efecto topográfico, sin embargo, los otros resultados ayudaron a definir la amplificación entre la roca y la superficie.

5.4.3 Lacustre

Se presentan dos campos dominantes, el cercano que incluye las señales locales y regionales y el lejano que corresponde a los sismos de subducción. En este caso el espectro cercano no alcanza a envolver al lejano, por lo cual se presenta una forma compuesta.

Se tuvieron en cuenta los resultados de los tres convenios, a excepción de los resultados del escenario lejano de la SCG, puesto que únicamente se analizó la señal de México (Ciudad Universitaria) que tiene un contenido frecuencial demasiado alto a los 2 segundos.

Los resultados de UNIANDES localizados en las zonas de más de 300 m son muy similares a los de las zonas de menos de 300 m de espesor, no se observa que

disminuyan las respuestas espectrales con la profundidad, de manera inversa a los resultados de los EUA que sí muestran esta tendencia, por lo cual se tuvieron que obviar estos resultados en los análisis de las zonas de más de 300 m de profundidad.

5.4.4 Aluvial

Se presentan dos campos dominantes, el cercano que incluye las señales locales y regionales y el lejano que corresponde a los sismos de subducción. En este caso el espectro cercano alcanza a envolver al lejano.

Se tuvieron en cuenta los resultados de los tres convenios, a excepción de los resultados del escenario lejano de la SCG, puesto que únicamente se analizó la señal de México (Ciudad Universitaria) que como se indicó tiene un contenido frecuencial demasiado alto a los 2 segundos.

Los resultados de AIS localizados en las zonas de más de 200 m profundidad son demasiado bajos en comparación con los otros modelos, al revisar detalladamente estos resultados se apreció que las curvas de degradación de los materiales, predominantemente arenosos, no tuvieron en cuenta el efecto del confinamiento en las propiedades dinámicas, lo que ocasiona que se amortigüe y degrade demasiado el perfil de suelo analizado.

5.4.5 Resultados

De la **Figura 5.6** a la **Figura 5.19** se presentan los cálculos realizados y formas espectrales propuestas para cada zona. En cada figura se tiene en la parte superior izquierda los promedios de las señales de AIS y el promedio más desviaciones estándar de las señales de la SCG y UNIANDES en escala semi-logarítmica para analizar los periodos menores a un segundo; en la parte inferior izquierda está la anterior gráfica pero en escala normal para analizar los periodos mayores a un segundo; en al parte derecha superior están los espectros de cada escenario y la posible envolvente de los resultados y en la parte inferior derecha se comparan los resultados con los de la zona que más se parece de las propuestas por la AIS, SCG, UNIANDES y MZSB. Sin embargo, esta comparación no es estrictamente valida puesto que las zonas espacialmente son diferentes.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

ZONA CERROS (Incluye efecto topográfico, Suelos Residuales y Coluviones con menos de 6 m de espesor)

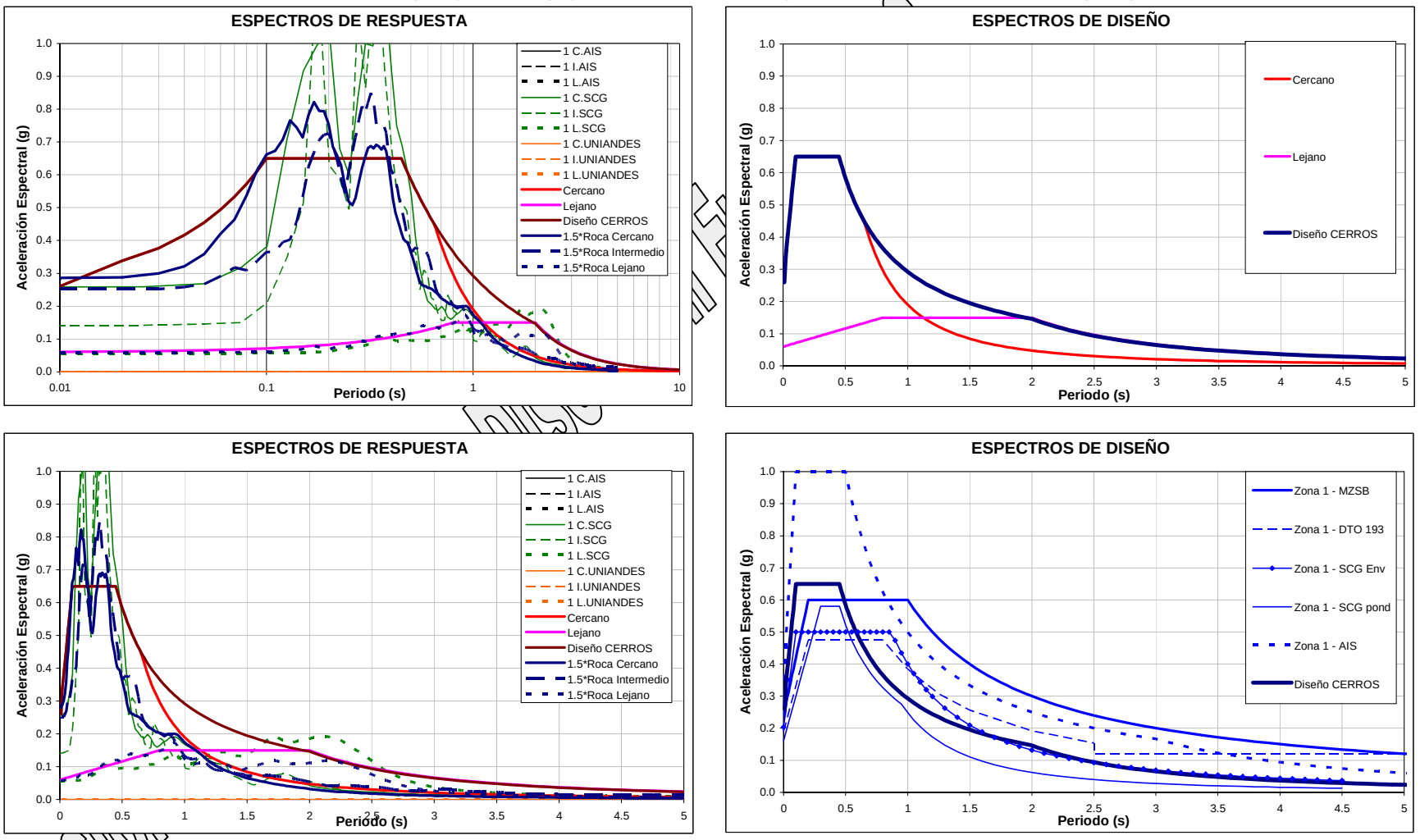


Figura 5.6. Cálculo del espectro de diseño para la Zona de Cerros

Versión

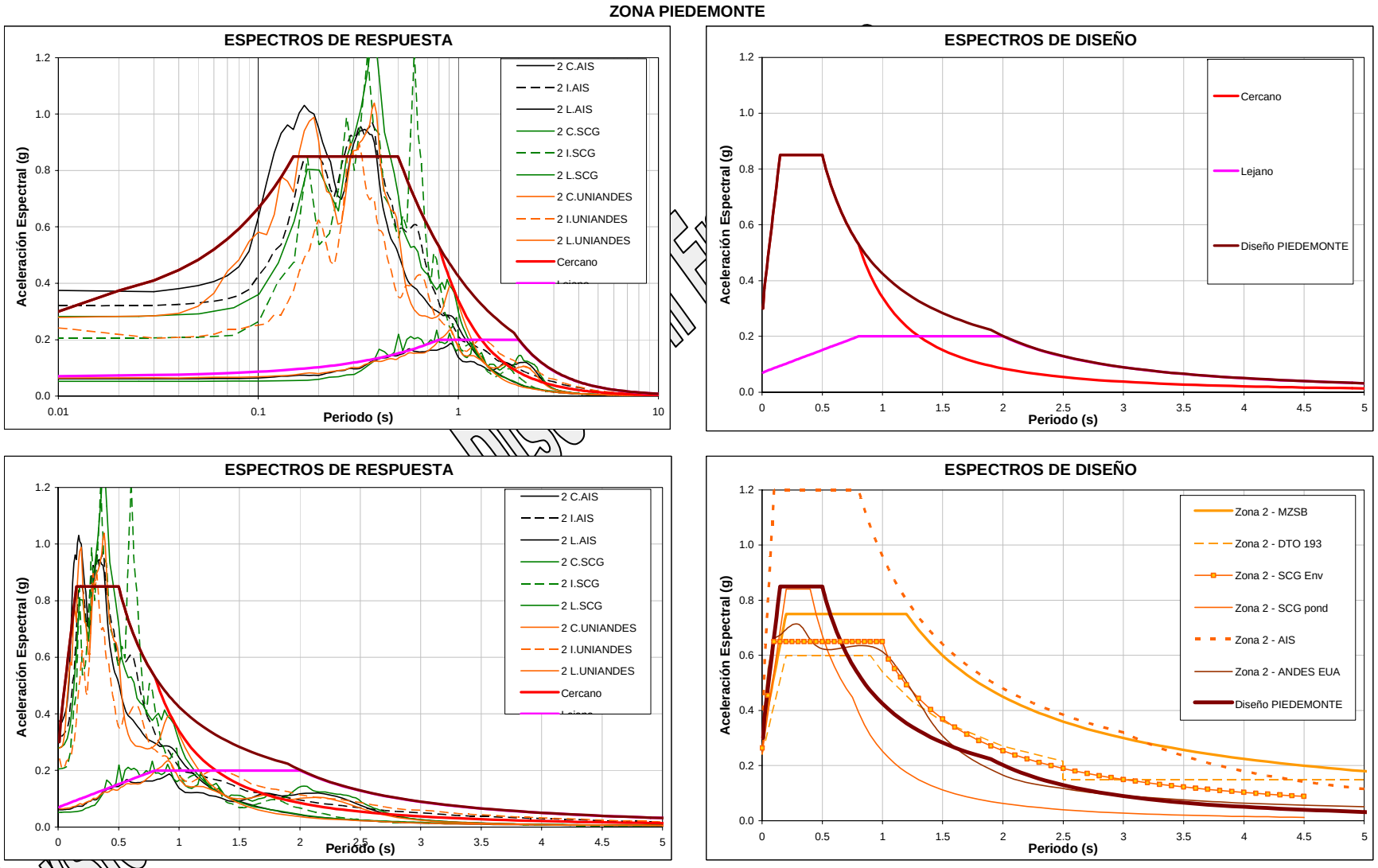


Figura 5.7. Cálculo del espectro de diseño para la Zona de Piedemonte

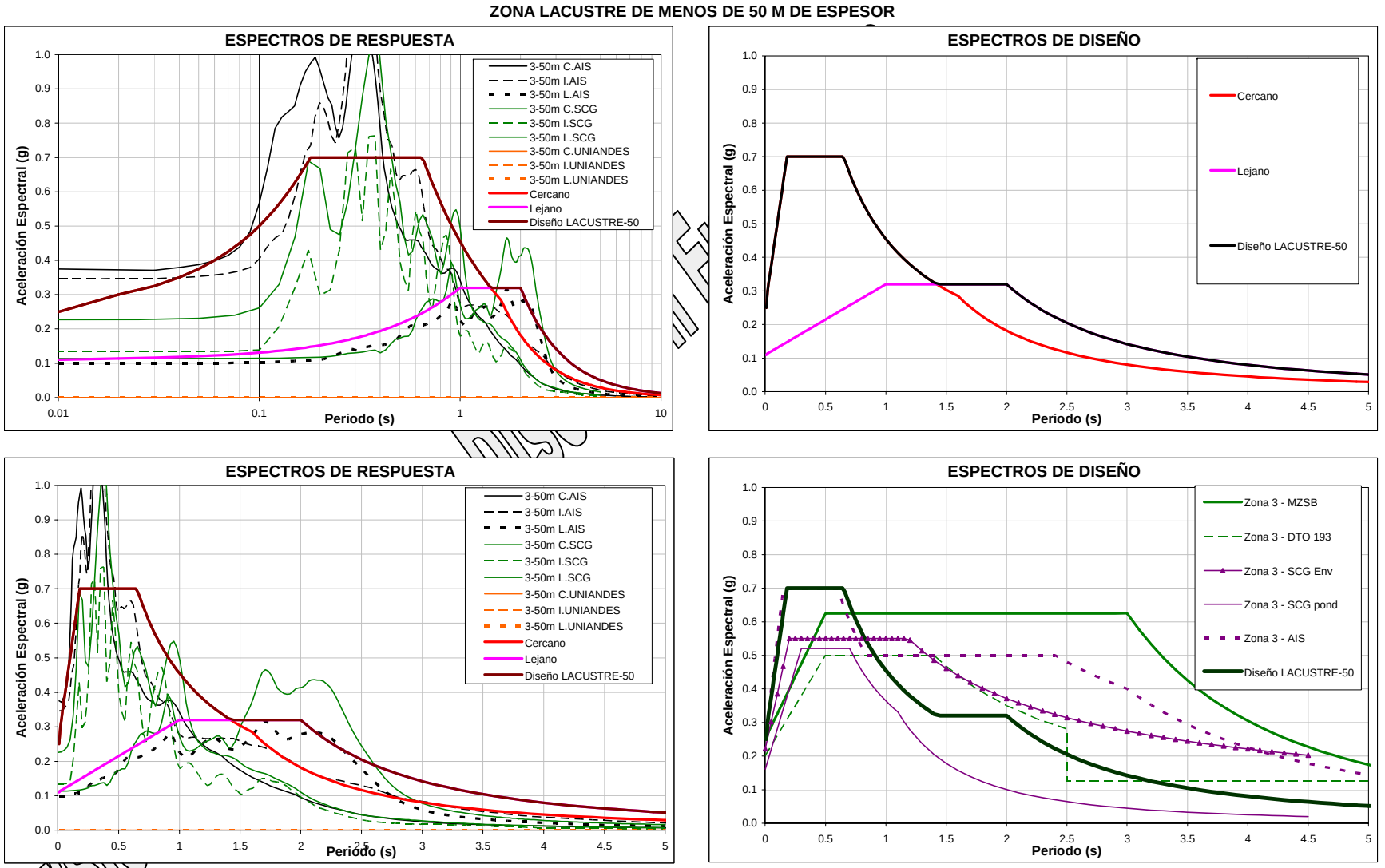


Figura 5.8. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-50

Versión

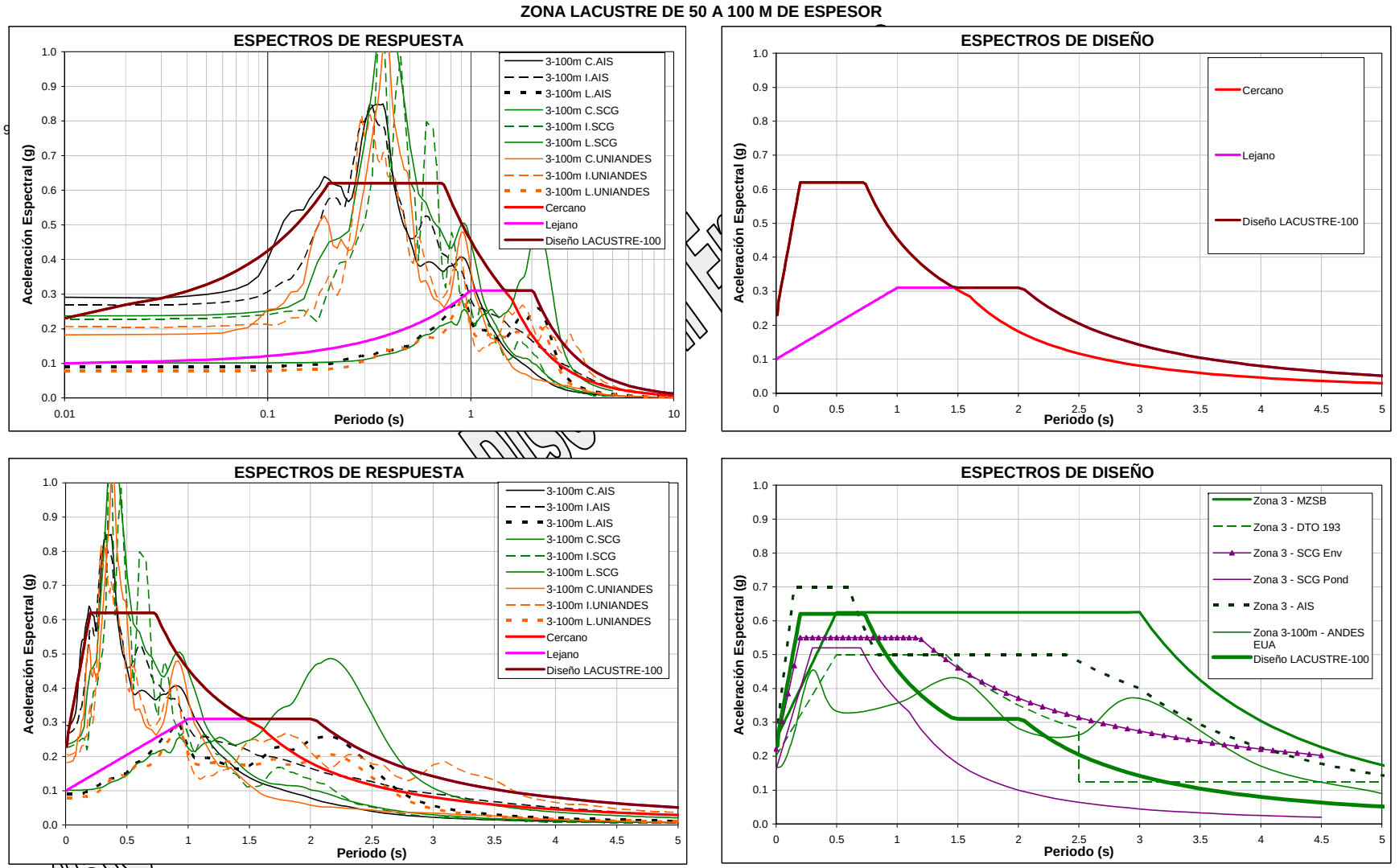


Figura 5.9. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-100

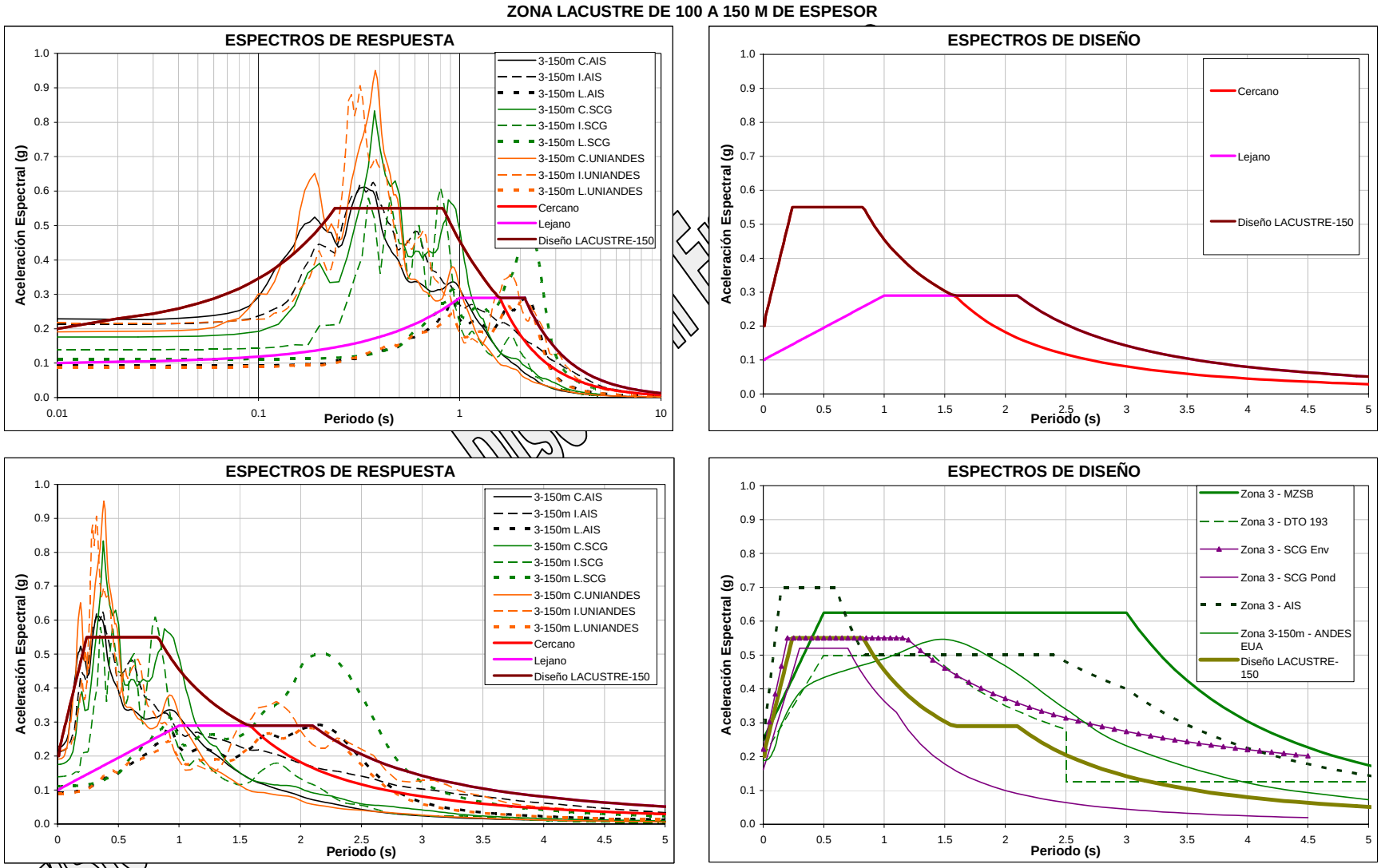


Figura 5.10. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-150

Versión

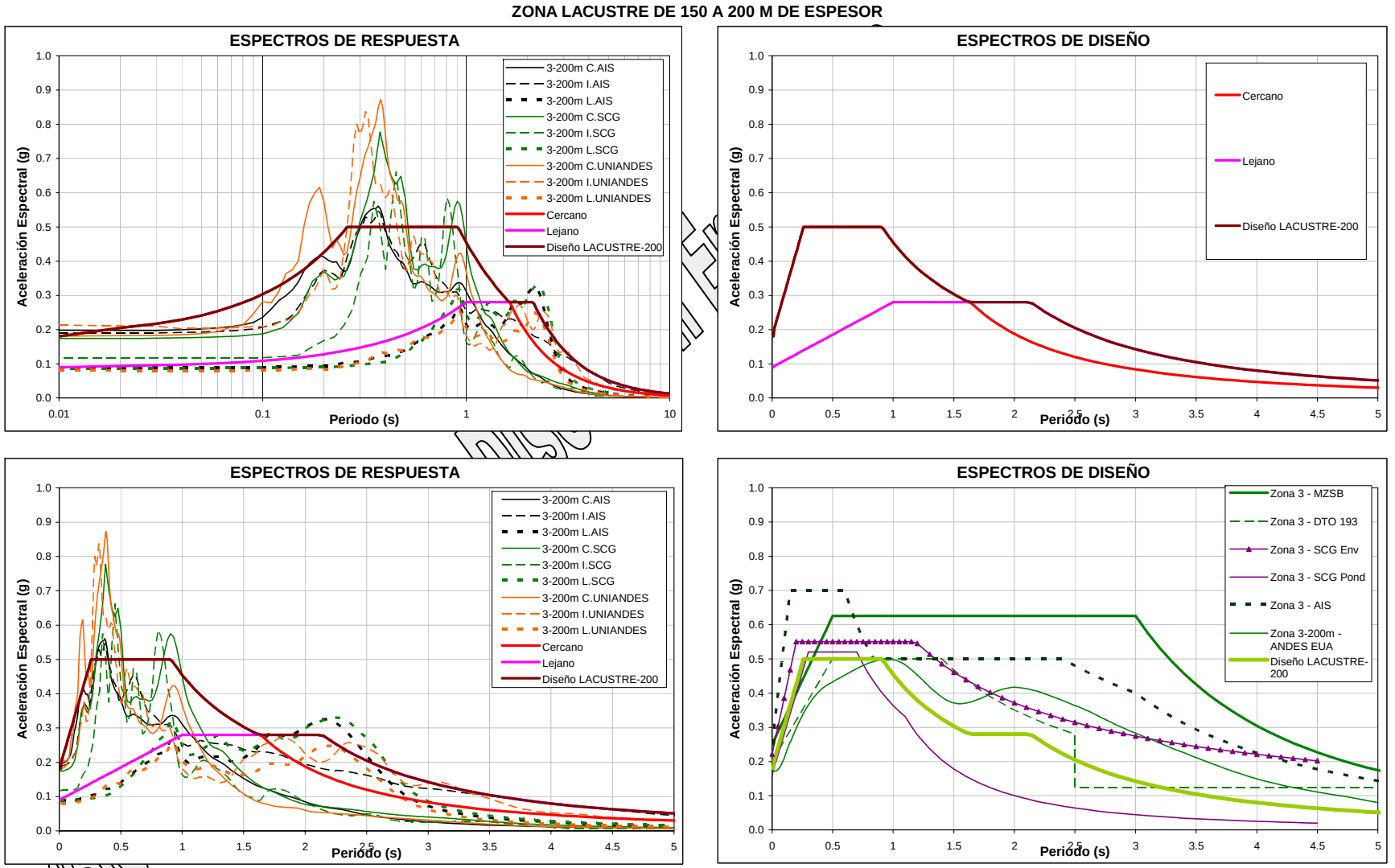


Figura 5.11. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-200

Versión

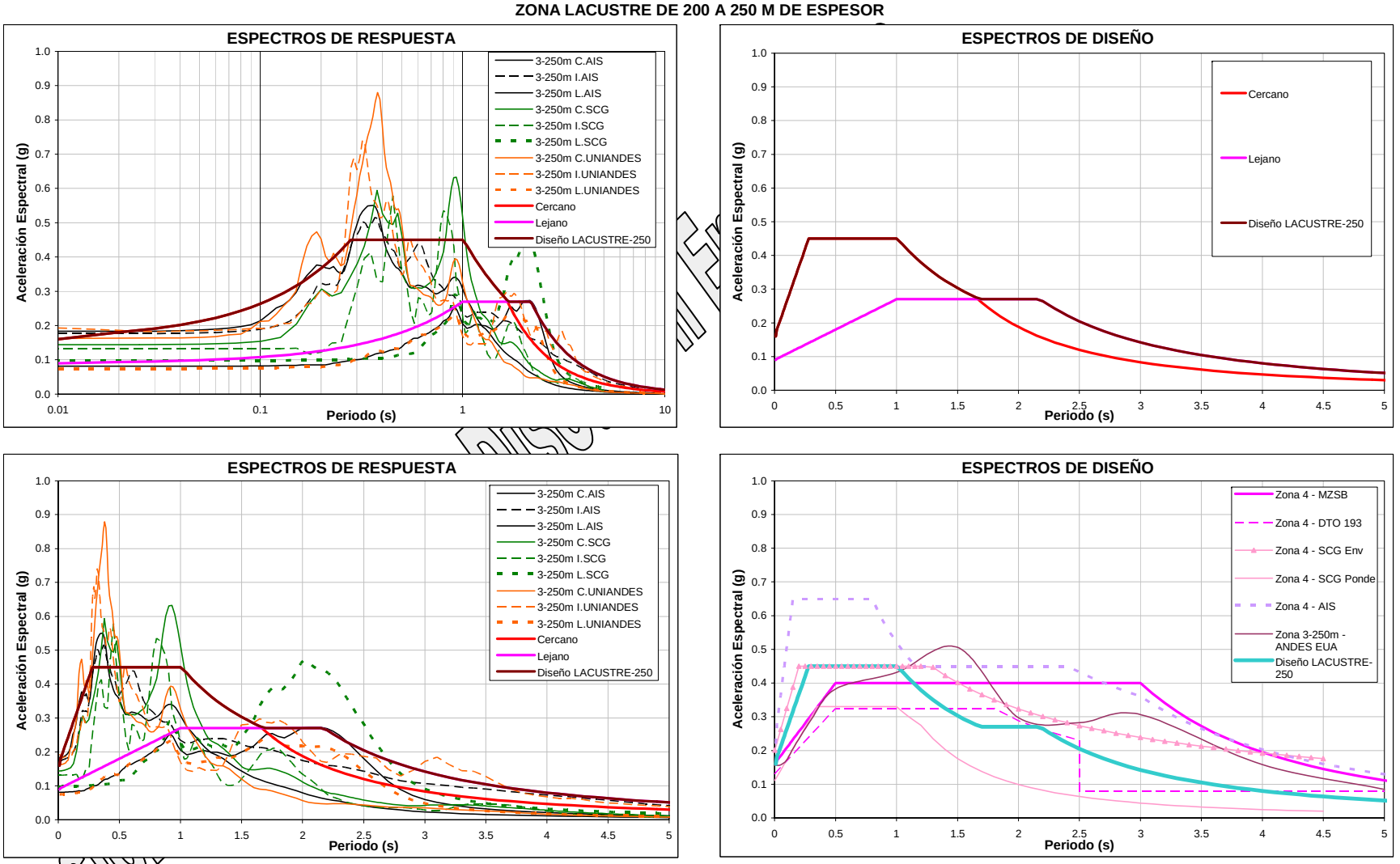


Figura 5.12. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-250

Versión

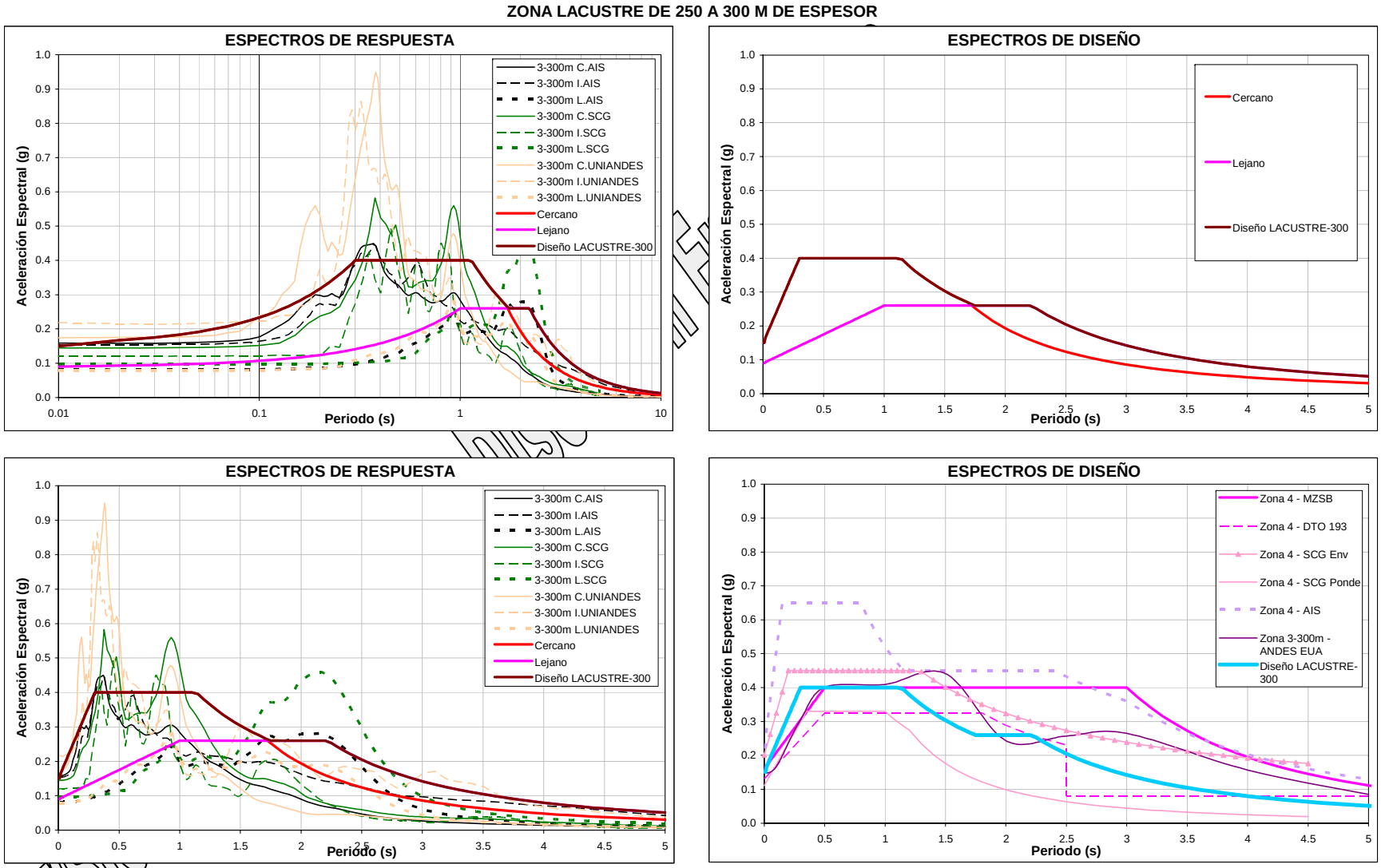


Figura 5.13. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-300

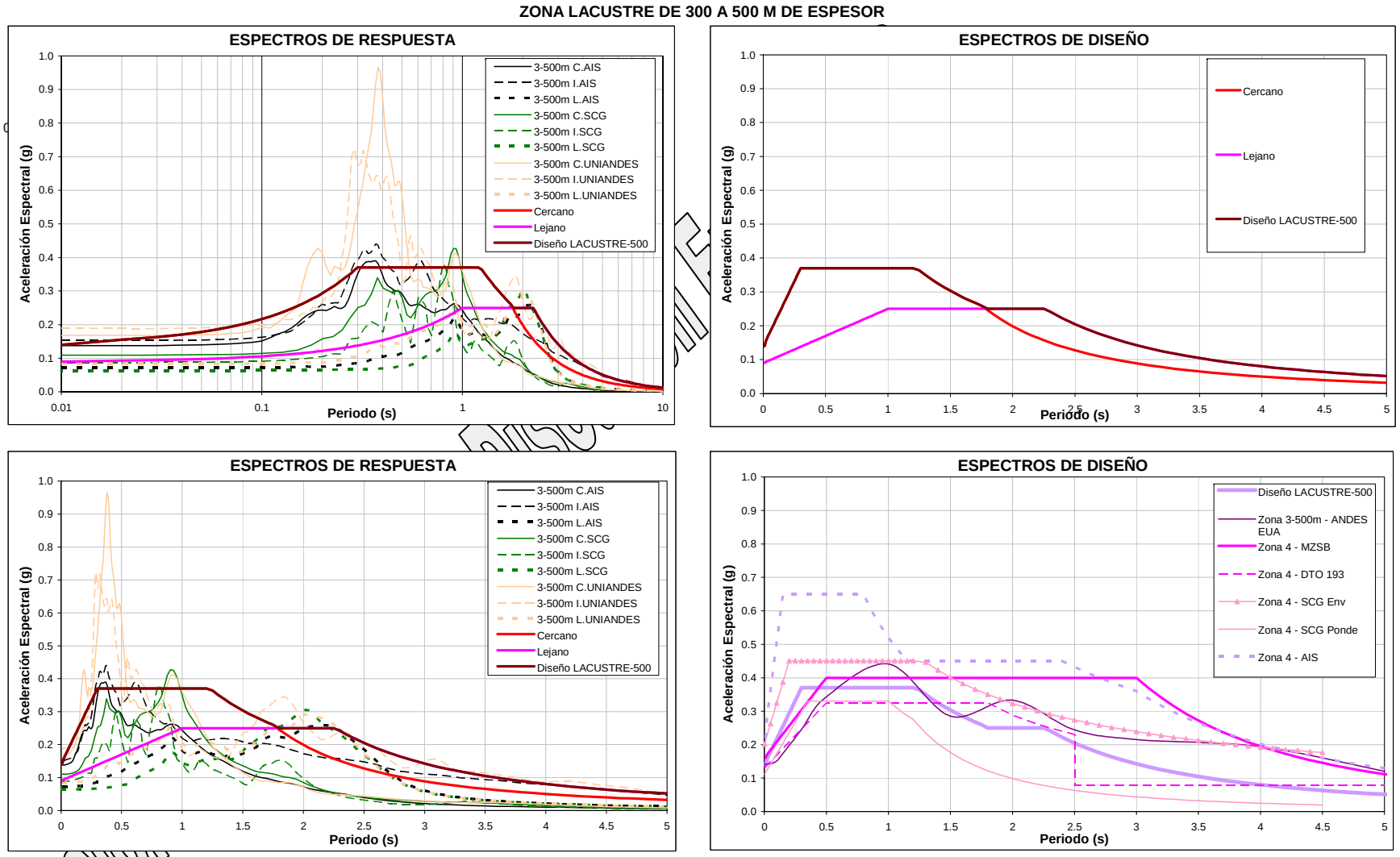


Figura 5.14. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Lacustre-500

Versión

ZONA ALUVIAL DE MENOS DE 50 M DE ESPESOR

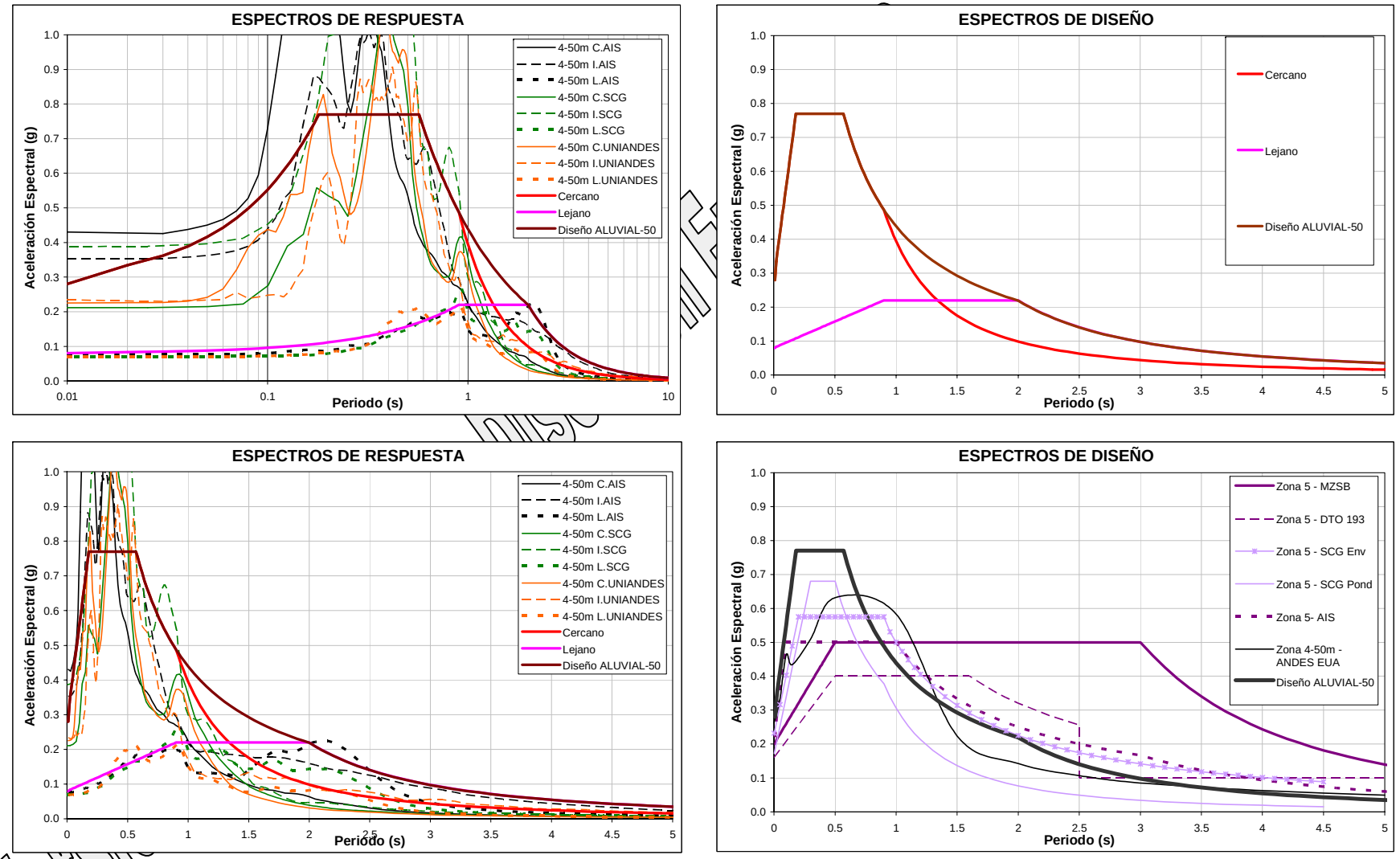


Figura 5.15. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Aluvial-50

Versión

ZONA ALUVIAL DE 50 A 100 M DE ESPESOR

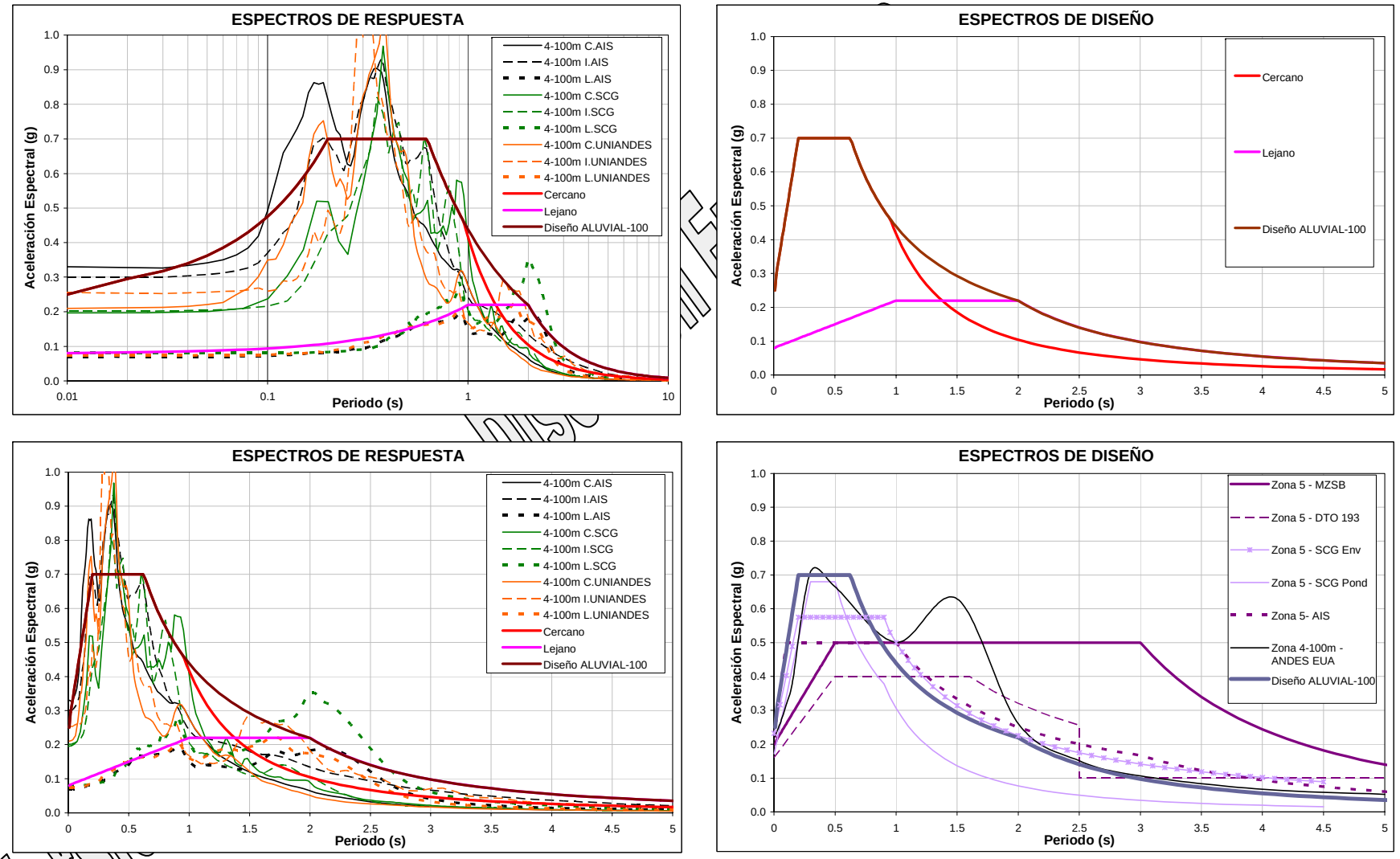


Figura 5.16. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Aluvial-100

Versión

ZONA ALUVIAL DE 100 A 150 M DE ESPESOR

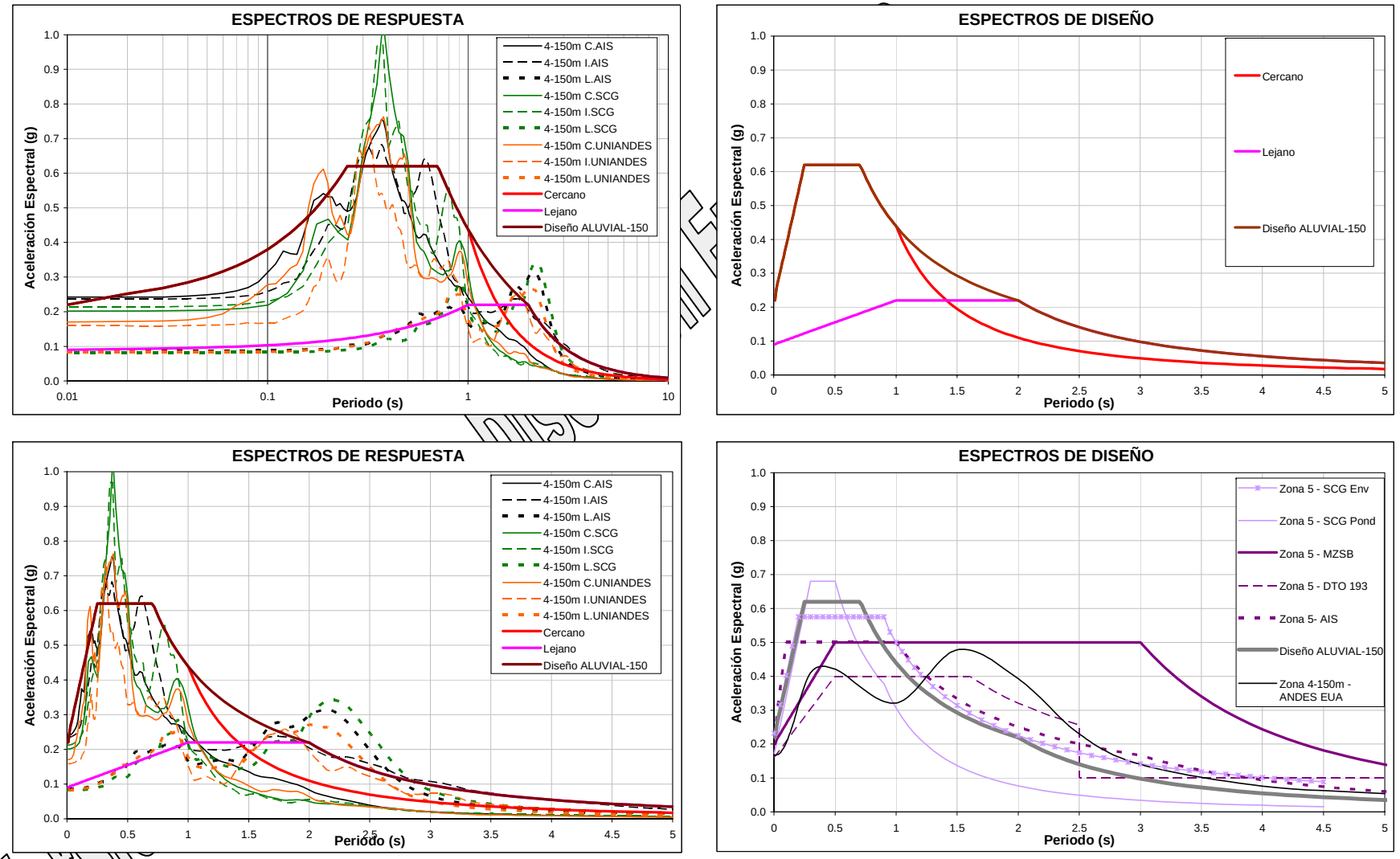


Figura 5.17. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Aluvial-150

Versión

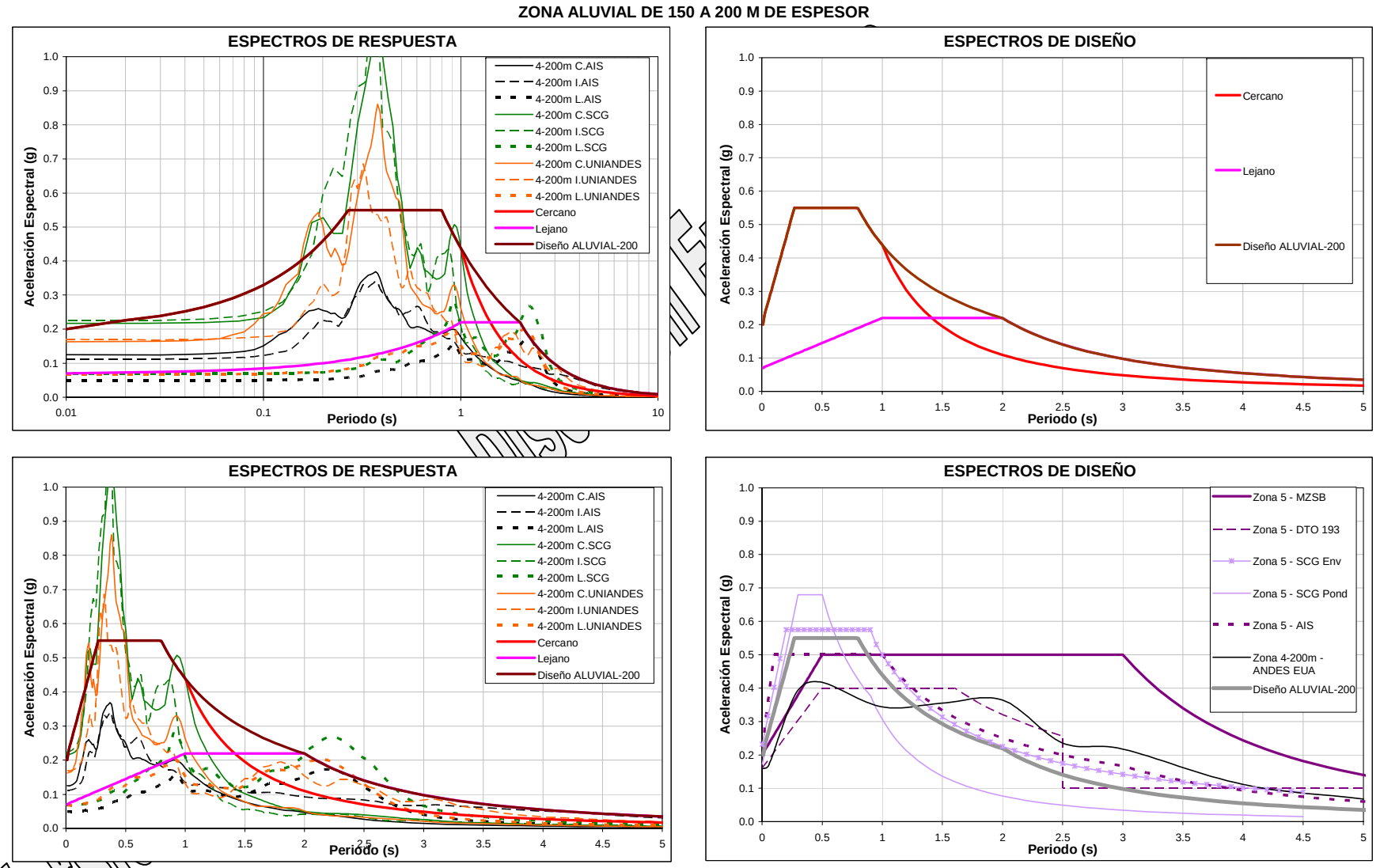


Figura 5.18. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Aluvial-200

Versión

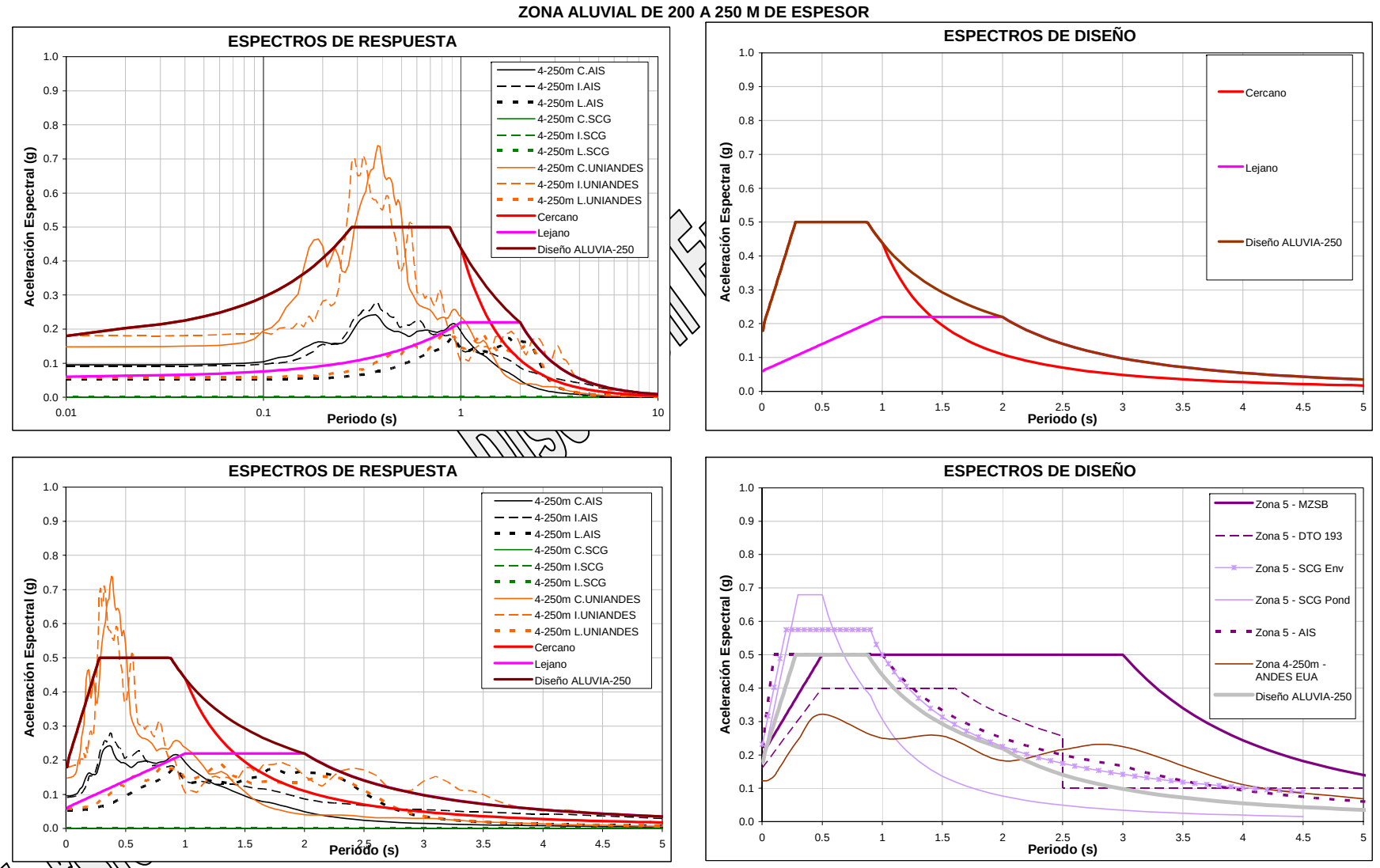


Figura 5.19. Cálculo del espectro de diseño para la Zona Aluvial-250

5.5 PARÁMETROS DE DISEÑO

En resumen se proponen 14 zonas de respuesta sísmica homogénea, cada una con dos respuestas espectrales, acordes con las respuestas dinámicas posibles, cercana y lejana. En la **Tabla 5.6** se resumen los parámetros espectrales para la construcción de los espectros como se muestran en la **Figura 5.20**.

ZONA	CAMPO	PARÁMETOS ESPECTRALES				
		Ao	Sm	To	Tc	Td
Cerros	Cercano	0.26	0.65	0.10	0.45	2.00
	Lejano	0.06	0.15	0.80	2.00	2.00
Piedemonte	Cercano	0.30	0.85	0.15	0.50	2.00
	Lejano	0.07	0.20	0.80	2.00	2.00
Lacustre-50	Cercano	0.25	0.70	0.18	0.65	1.60
	Lejano	0.11	0.32	1.00	2.00	2.00
Lacustre-100	Cercano	0.23	0.62	0.20	0.73	1.60
	Lejano	0.10	0.31	1.00	2.03	2.03
Lacustre-150	Cercano	0.20	0.55	0.24	0.83	1.60
	Lejano	0.10	0.29	1.00	2.10	2.10
Lacustre-200	Cercano	0.18	0.50	0.26	0.91	1.65
	Lejano	0.09	0.28	1.00	2.14	2.14
Lacustre-250	Cercano	0.16	0.45	0.28	1.01	1.65
	Lejano	0.09	0.27	1.00	2.18	2.18
Lacustre-300	Cercano	0.15	0.40	0.30	1.14	1.70
	Lejano	0.09	0.26	1.00	2.22	2.22
Lacustre-500	Cercano	0.14	0.37	0.30	1.23	1.75
	Lejano	0.09	0.25	1.00	2.26	2.26
Aluvial-50	Cercano	0.28	0.77	0.18	0.57	2.00
	Lejano	0.08	0.22	0.90	2.00	2.00
Aluvial-100	Cercano	0.25	0.70	0.20	0.63	2.00
	Lejano	0.08	0.22	1.00	2.00	2.00
Aluvial-150	Cercano	0.22	0.62	0.25	0.71	2.00
	Lejano	0.09	0.22	1.00	2.00	2.00
Aluvial-200	Cercano	0.20	0.55	0.27	0.80	2.00
	Lejano	0.07	0.22	1.00	2.00	2.00
Aluvial-250	Cercano	0.18	0.50	0.28	0.88	2.00
	Lejano	0.06	0.22	1.00	2.00	2.00

Tabla 5.6. Parámetros espectrales propuestos

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

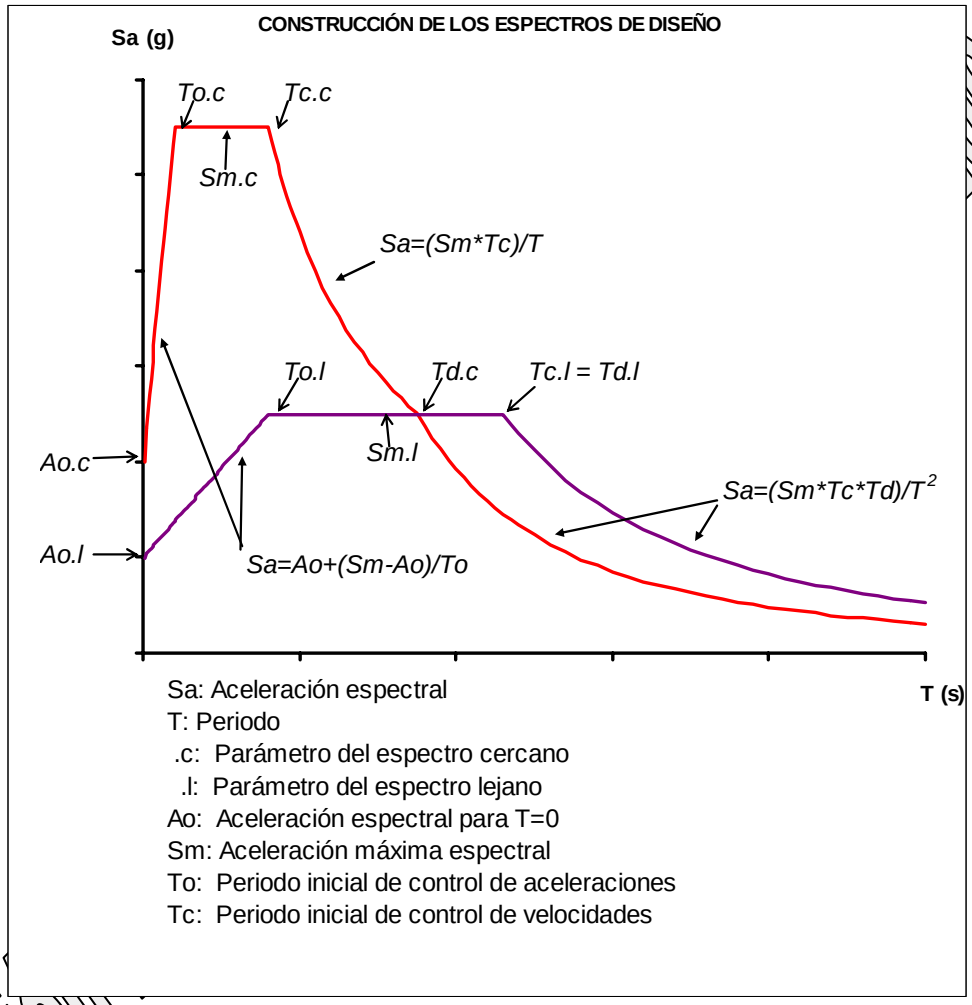


Figura 5.20. Construcción de los espectros de diseño de campos cercano y lejano

El consolidado de los espectros envolventes de diseño se aprecia en la **Figura 5.21** en términos de aceleración, velocidad y desplazamiento espectral.

Versión 2018

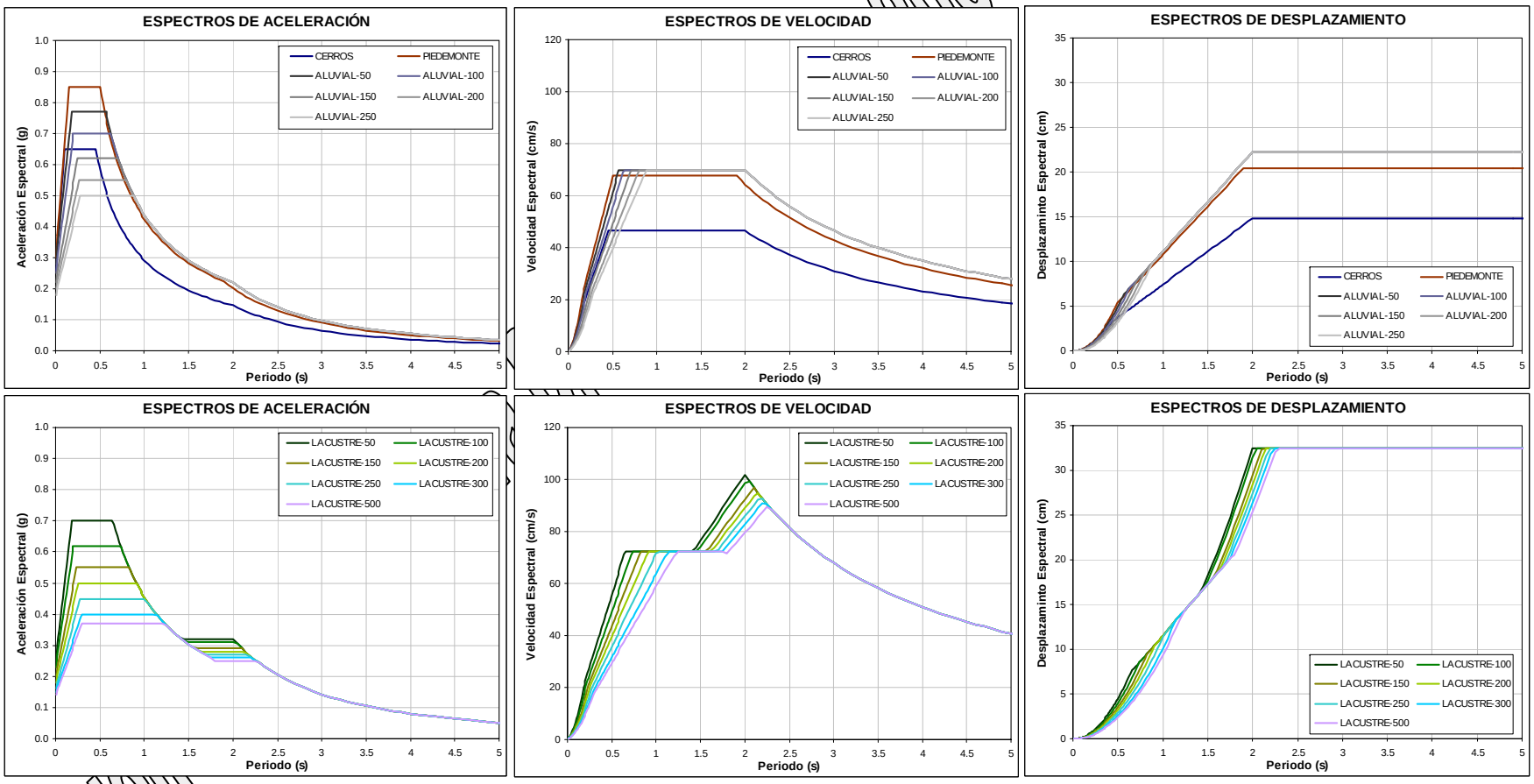


Figura 5.21. Espectros envolventes de aceleración, velocidad y desplazamiento espectral

2018
Versión

5.6 CONSIDERACIONES ESPECIALES

A continuación se listan las consideraciones especiales que se deben tener en cuenta para el uso del mapa de zonificación de efectos locales de la ciudad de Bogotá.

- Para otros efectos del diseño de estructuras sismo resistentes, Bogotá se encuentra en zona de amenaza sísmica intermedia con Am=0.2 g.

- Los espectros de diseño corresponden a campo libre y con un amortiguamiento del 5%.

- Entre las zonas de piedemonte, lacustre y aluvial se definen zonas de transición de 100 m a cada lado de los límites establecidos, donde se toma como aceleración espectral de diseño la resultante del promedio de las zonas.

- En las zonas de cerros y piedemonte se debe consultar el mapa de amenaza por remoción en masa y dar cumplimiento a la normatividad vigente.

- En las zonas geotécnicas de conos aluviales (IV) y llanura de inundación (V) se debe revisar el potencial de licuación y dar cumplimiento a la normatividad vigente.

- En las zonas donde se identifiquen rellenos antrópicos con espesores superiores a 3 m, y el nivel de cimentación esté sobre estos rellenos, se debe tomar como solicitación sísmica la resultante de mayorar un 20 % el espectro de diseño de la zona.

- Se podrá reclasificar el sitio de estudio únicamente si se comprueba mediante un estudio geotécnico que el perfil estratigráfico y la profundidad del basamento rocoso corresponden a la de otra zona, esta reclasificación es solamente válida para las zonas de transición o contiguas al sitio de interés.

- En la zona de piedemonte si se comprueba que el espesor de depósito es inferior a 6 m, penetrando mínimo 5 m en el estrato rocoso, se puede emplear el espectro de diseño de la zona cerros. Se debe tomar el mayor espesor presente bajo el área de la cimentación de la estructura.

- En los depósitos de coluvión se debe diseñar con el espectro de la zona de piedemonte, a menos que se compruebe que el espesor es menor a 12 m, penetrando mínimo 5 m en el estrato rocoso, se puede tomar el espectro de diseño promedio entre la zona de cerros y piedemonte. Se debe tomar el mayor espesor presente bajo el área de la cimentación de la estructura.

- Para edificaciones con sótanos o con sótanos y cimentación profunda se pueden realizar análisis de interacción suelo – estructura, para ajustar la solicitación sísmica acorde con el nivel y la configuración de fundación de la estructura. Sin embargo, la acción sísmica resultante no puede ser inferior al 80% de la definida para la zona.

- En el caso de que el periodo fundamental de la edificación coincida con el periodo fundamental del depósito calculado para el sitio del proyecto +/- 10%, se debe diseñar la estructura y cimentación de modo que resistan adecuadamente las solicitaciones

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

sísmicas amplificadas por efecto de la posible resonancia de la estructura con el periodo fundamental del suelo. El periodo fundamental del suelo calculado debe estar dentro del intervalo presentado en la **Tabla 5.5** para cada zona de efectos locales.

- Para periodos estructurales de vibración con base rígida mayores a 2.5 segundos se deben realizar estudios locales de respuesta, en los cuales se involucre la estructura de cimentación.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2006

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS Y NORMATIVIDAD

En el presente capítulo se compara con la norma actual los resultados de la nueva propuesta de zonificación de efectos locales y espectros de diseño. Luego se resumen las recomendaciones para la aplicación de los resultados de manera oficial, como aspectos que deben ser cambiados en el decreto actual que la reglamenta.

6.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LA NORMA ACTUAL

Con el fin de evaluar el cambio en las solicitaciones sísmicas con la nueva propuesta, se realizó una serie de evaluaciones y cruces de información en el sistema de información geográfico.

A manera de comparación con la norma actual se presentan las envolventes de los espectros de diseño de la **Figura 6.1** a la **Figura 6.5**.

En estas gráficas es importante mencionar que las zonas que se comparan estrictamente no son idénticas espacialmente, pues su distribución ha cambiado considerablemente, pero para efectos de enfocar los análisis se presentan las diferencias entre: la zona de cerros y la zona 1, la zona de piedemonte con la zona 2, las zonas lacustre hasta 200m de espesor y la zona 3, las zonas lacustre de mas de 200 m de espesor y la zona 4, las zonas aluviales y la zona 5.

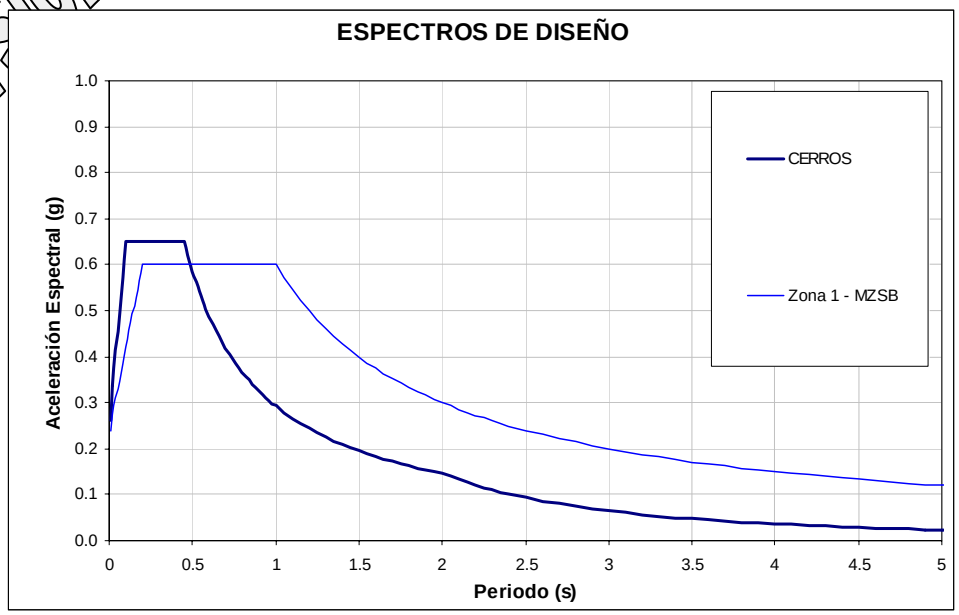


Figura 6.1. Espectro envolvente propuesto zona de Cerros

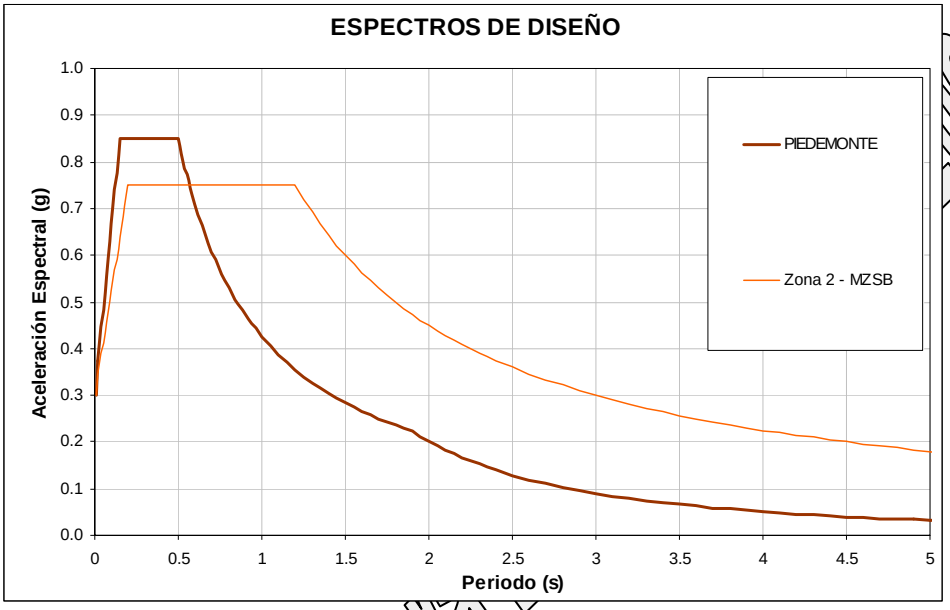


Figura 6.2. Espectro envolvente propuesto zona de Piedemonte

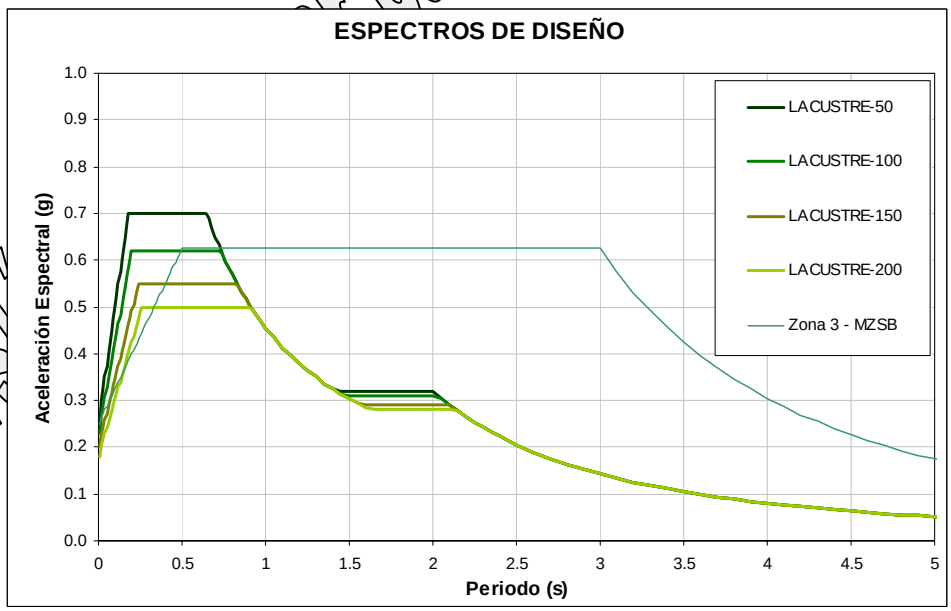


Figura 6.3. Espectros envolventes propuestos zonas Lacustre de menos de 200 m

En la **Figura 6.6**, se presenta en términos de aceleración espectral, la diferencia entre la propuesta y la norma actual para cada una de las zonas.

En general se observa que para periodos bajos entre 0.5 y 0.7 s las solicitaciones aumentan entre 0.05 y 0.2 g, para periodos superiores a valores entre 0.5 y 0.7 s en la mayoría de las zonas disminuye considerablemente la solicitación sísmica en un orden de 0.1 a 0.3 g.

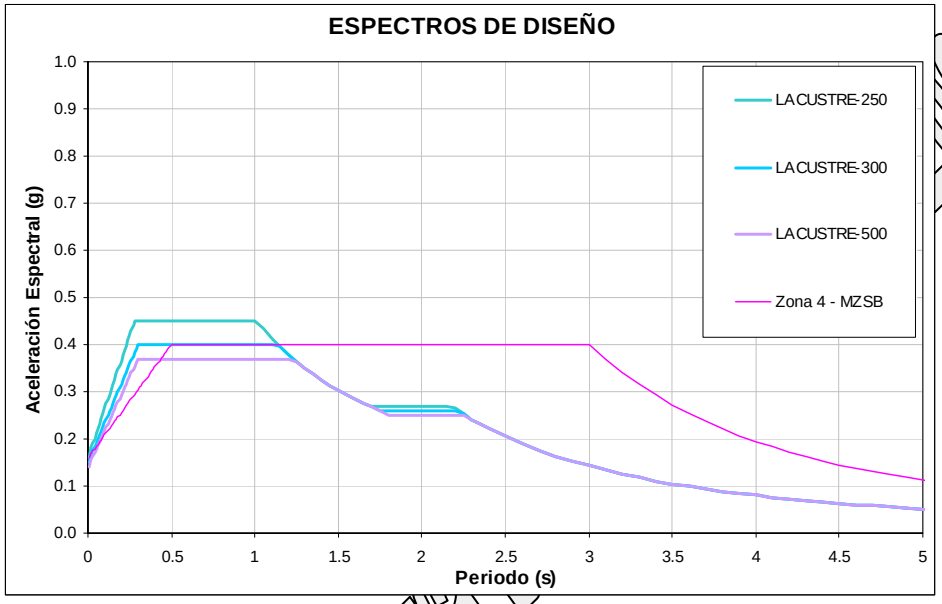


Figura 6.4. Espectros envolventes propuestos zonas Lacustre de más de 200 m

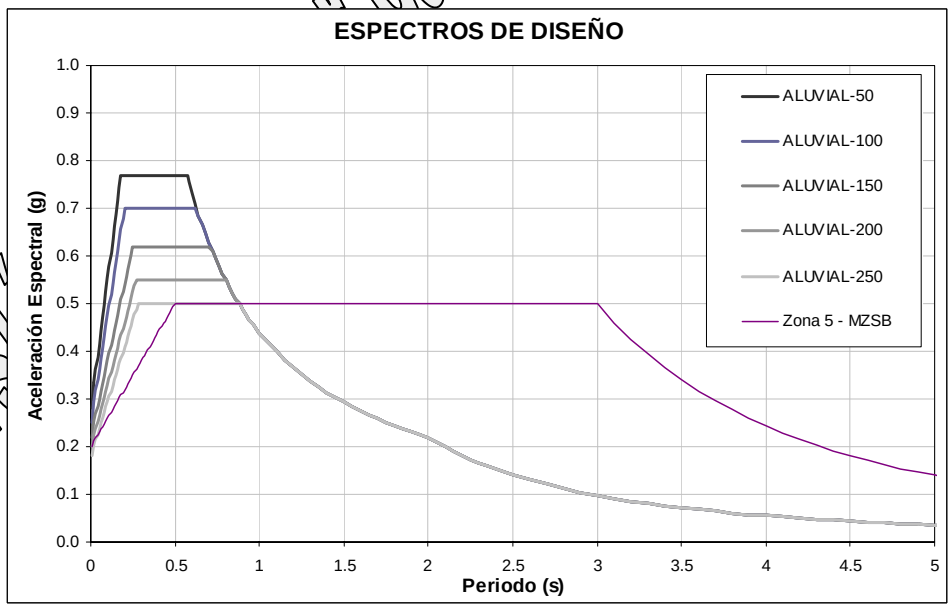


Figura 6.5. Espectros envolventes propuestos Zonas Aluviales

La distribución espacial de la aceleración espectral máxima, Sm, de la norma actual se ilustra en la **Figura 6.7**. En la **Figura 6.8** y la **Figura 6.9** aparece la variación de la aceleración espectral para un periodo de 0.5 y 1.0 s respectivamente. Finalmente, en la **Figura 6.10** y la **Figura 6.11** se presenta la diferencia de la aceleración espectral entre la norma vigente y la nueva propuesta para 0.5 y 1.0 s de periodo respectivamente. Las zonas de color verde indican que la aceleración espectral propuesta es menor que la vigente en la norma, mientras que las de color rojo indican lo contrario.

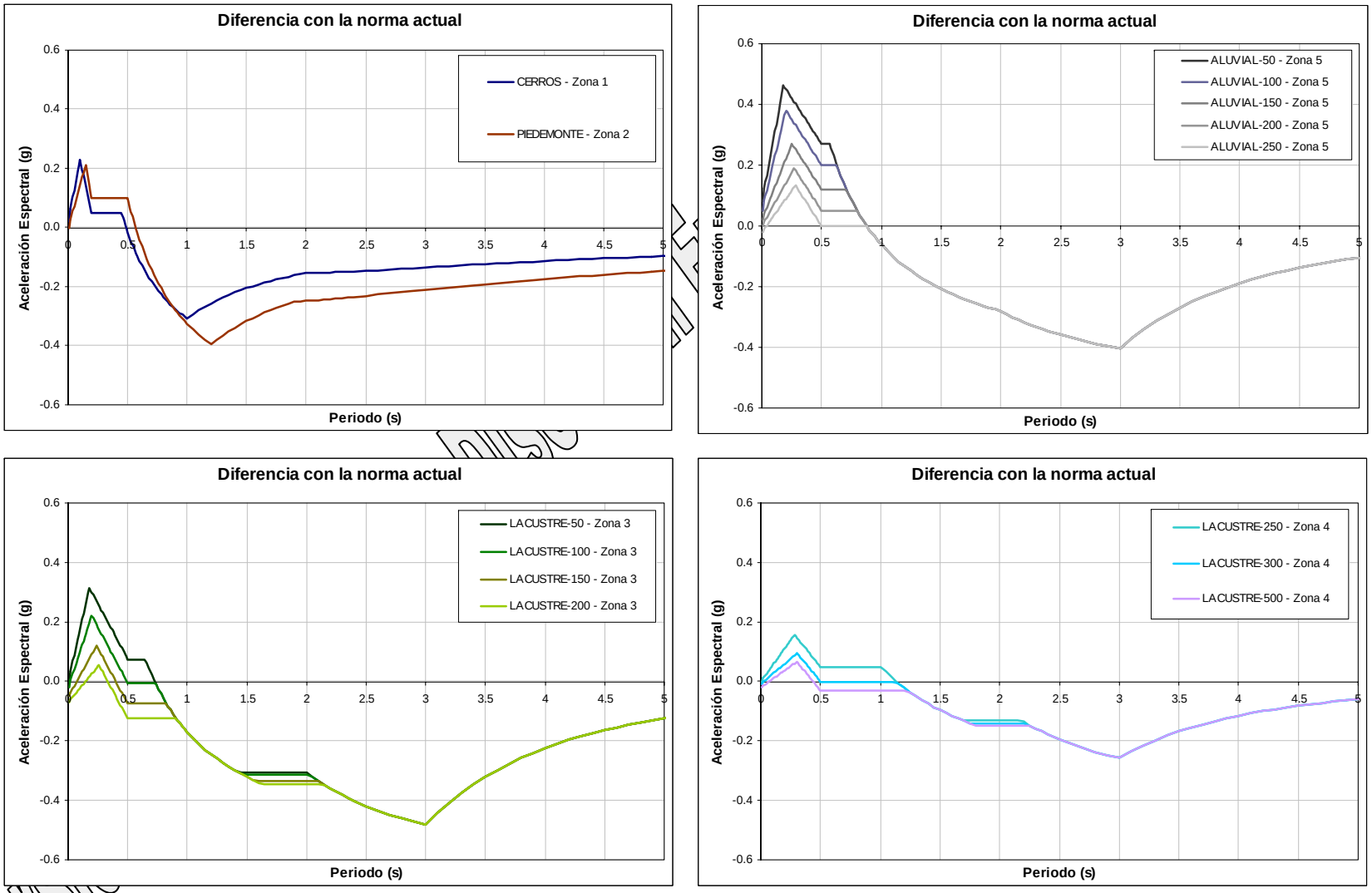


Figura 6.6. Diferencia entre los espectros propuestos y los espectros vigentes

Versión

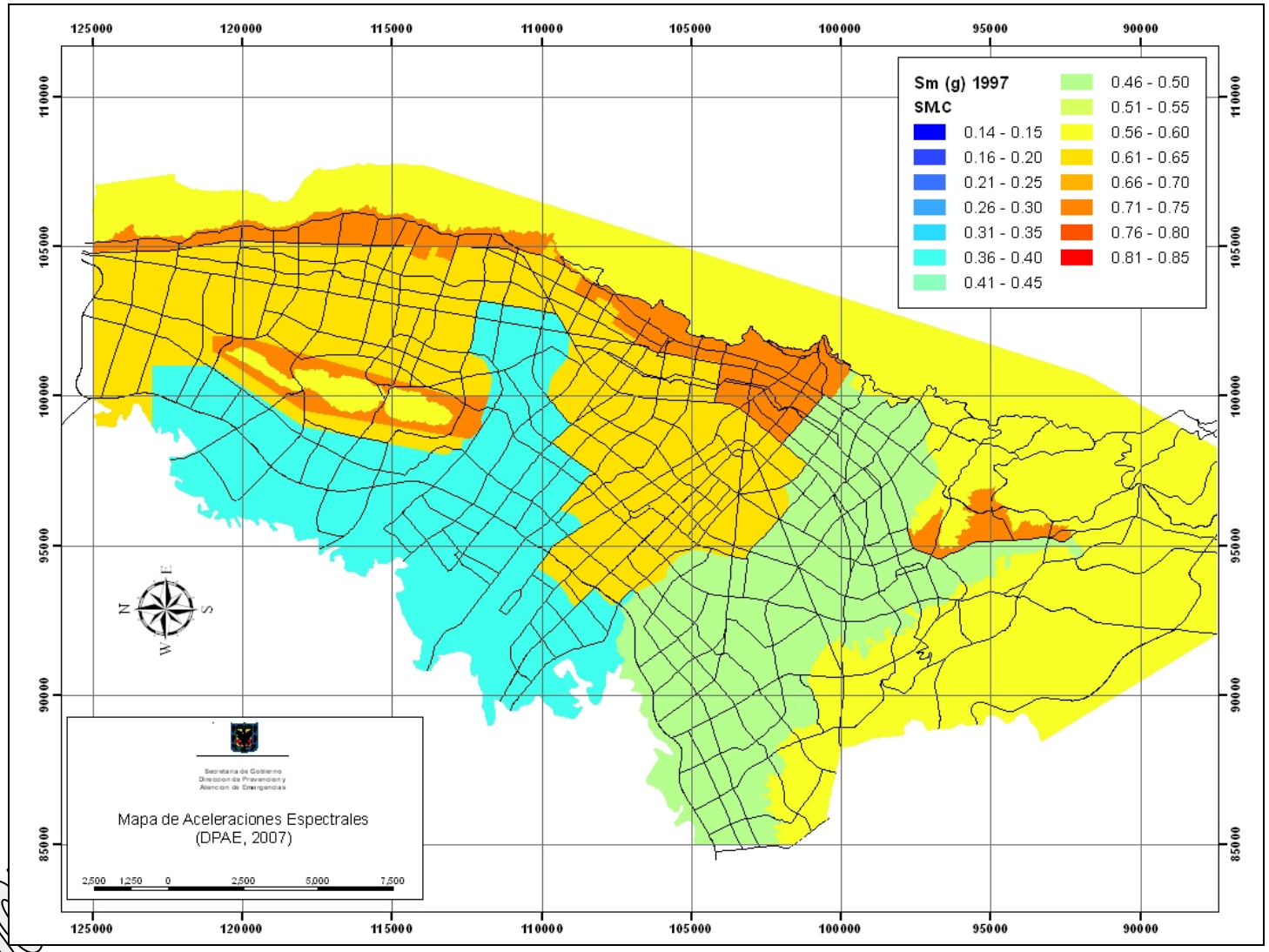


Figura 6.7. Mapa de Sa máxima vigente

Versión

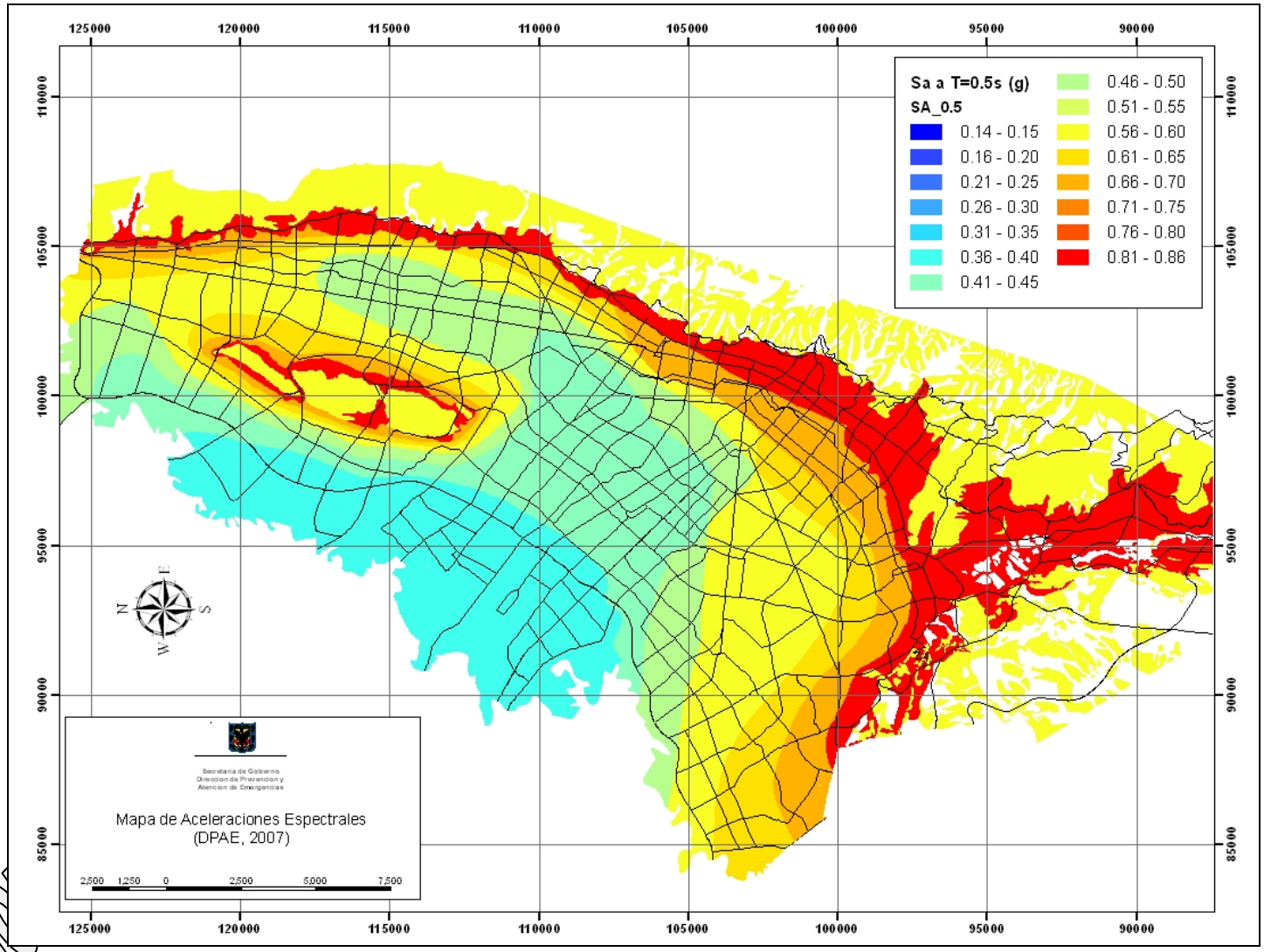


Figura 6.8. Mapa de Sa para T = 0.5 s propuesto

Versión

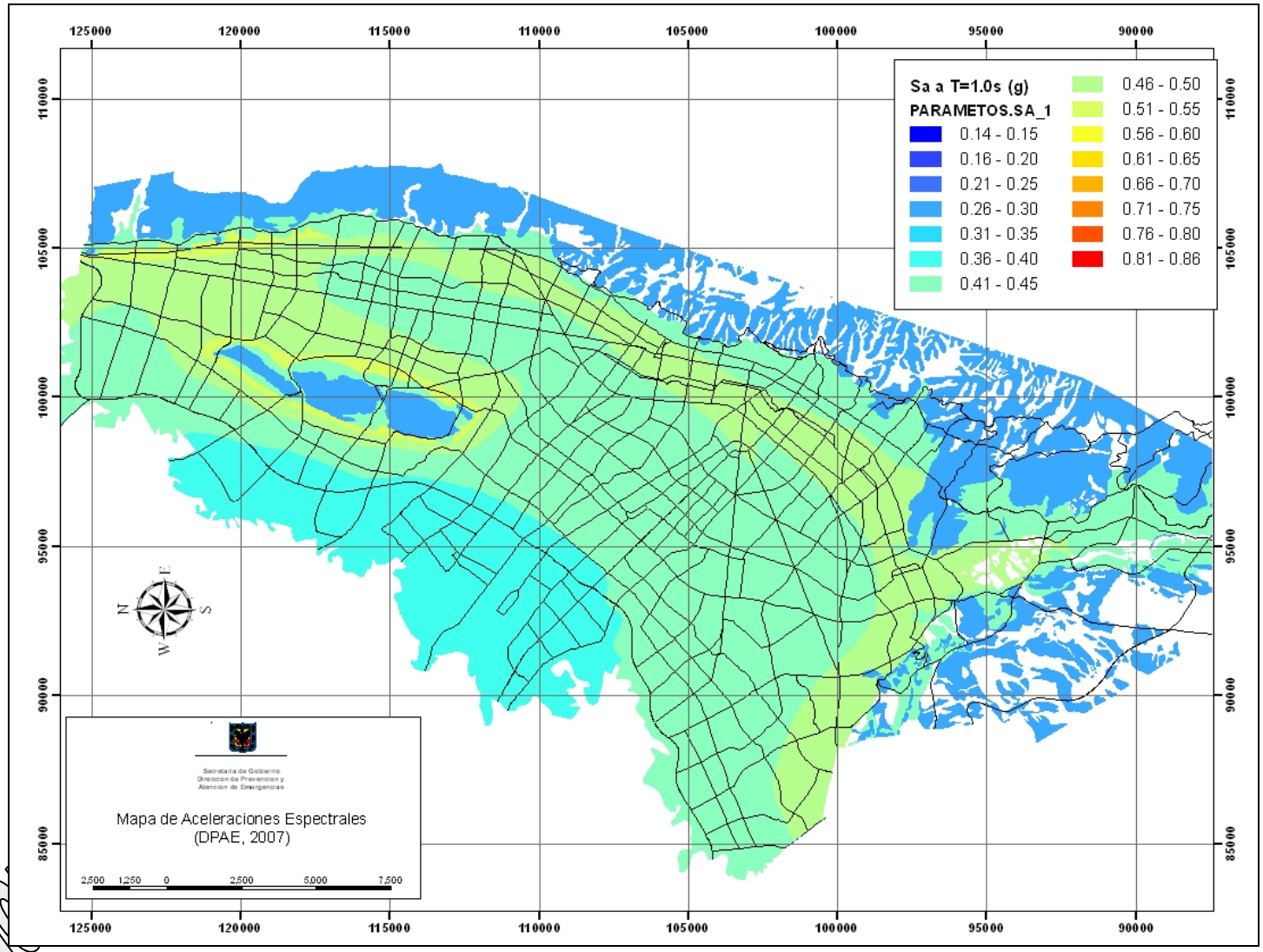


Figura 6.9. Mapa de Sa para T = 1.0 s propuesto

Versión

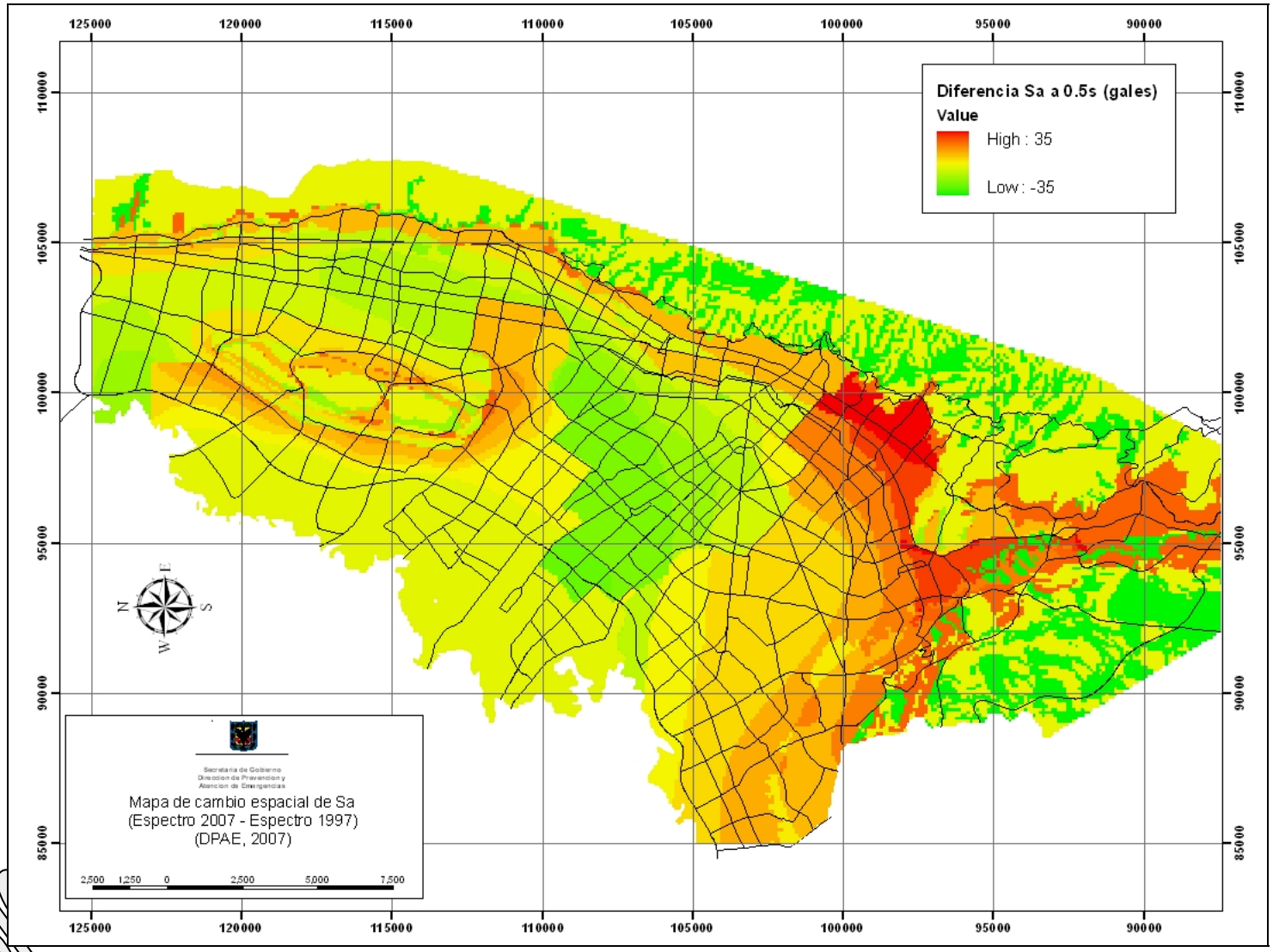


Figura 6.10. Mapa de cambio en Sa para T=0.5 s propuesto y vigente

Versión

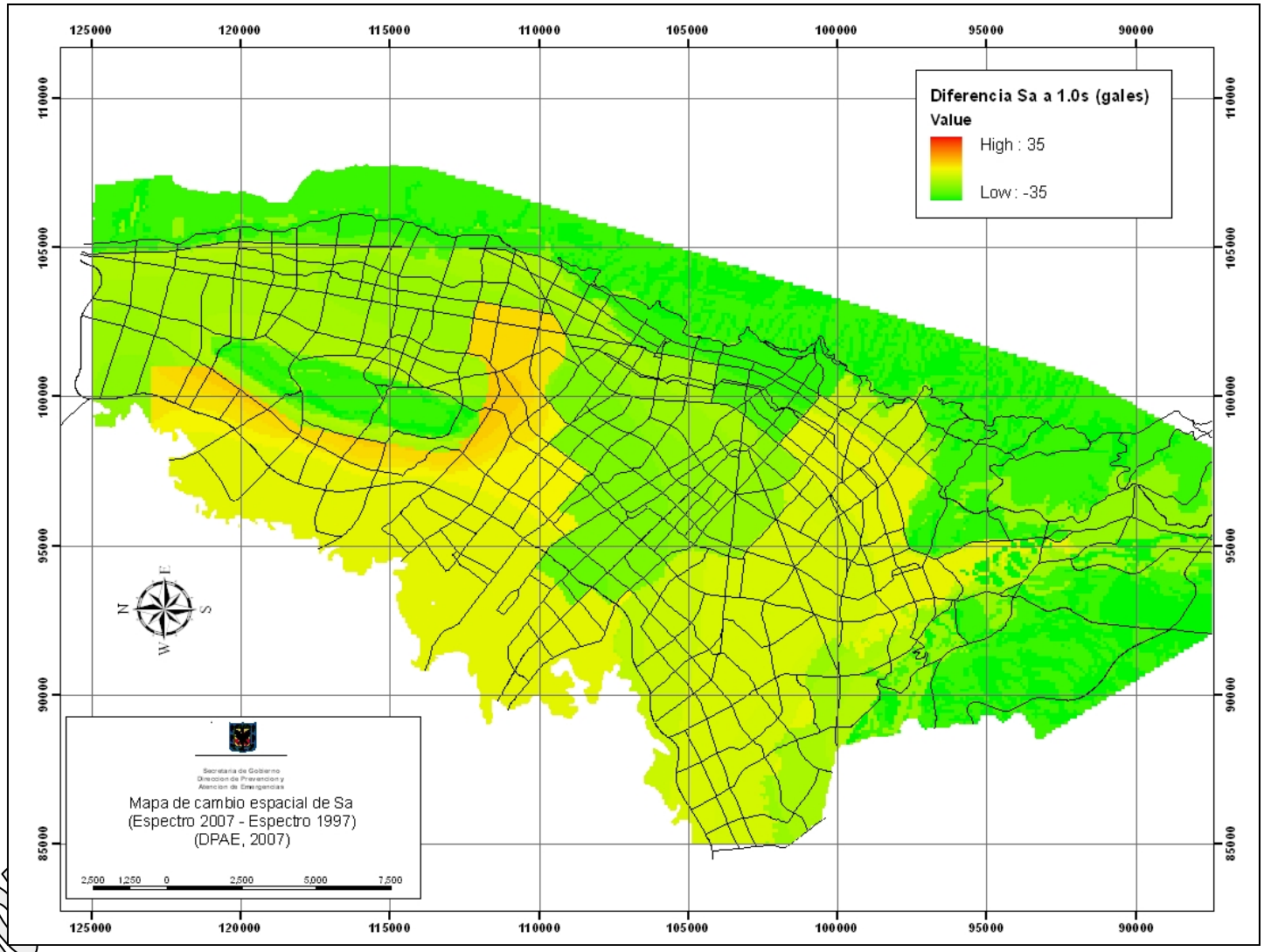


Figura 6.11. Mapa de cambio en Sa para T=1.0 s propuesto y vigente

Versión

En los mapas anteriores se puede aprecia entonces que para periodos menores a 0.5 s en general no hay cambios considerables, a excepción de las zonas de piedemonte y aluvial de menos de 100 m de espesor, donde aumenta la solicitación. Lo anterior se debe principalmente a que en el escenario cercano se consideraron nuevas señales de diseño consistentes con la amenaza y respecto al aumento en las zonas sur de la ciudad se debe a que el mapa vigente no tiene demarcadas las zonas de piedemonte en este sector de la ciudad y en la nueva propuesta se definió con mayor detalle cada una de las zonas de respuesta sísmica.

Para periodos superiores desde 0.5 a 1.0 segundo las solicitaciones sísmicas en toda el área estudiada disminuyen considerablemente, lo cual se debe principalmente a las señales de diseño compatibles con la amenaza empleadas en la modelación, el refinamiento de las zonas de respuesta sísmica, la modelación detallada de la respuesta sísmica y la definición de espectros con control de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Es muy importante destacar que los cambios propuestos son el producto de 10 años del avance del conocimiento en: señales de diseño (se pasó de 3 señales a 16 señales compatibles con la amenaza), información geotécnica (se pasó de 38 exploraciones de mas de 50 m de profundidad a más de 200), modelos de respuesta (se paso de 38 sitios de análisis a mas de 380) y nuevas técnicas para definir las zonas de respuesta sísmica y espectros de diseño (Particularmente, análisis bidimensionales y sensibilización estadística de parámetros). Todo lo anterior es el avance normal del conocimiento técnico acerca de los fenómenos naturales, pues los resultados de la MZSB de 1997 fueron la mejor solución propuesta con el conocimiento e información disponibles en ese momento.

6.2 RECOMENDACIONES PARA LA ACTUALIZACIÓN DE NORMATIVIDAD

A continuación se resumen algunos de los aspectos más importantes que se deben de tener en cuenta para la actualización de la normatividad, los cuales han sido el fruto las discusiones técnicas realizadas en las reuniones de trabajo con profesionales de la DPAE, SCG, AIS, y UNIANDES, teniendo en cuenta además las recomendaciones publicadas en el documento *"Acerca de la Construcción de Edificaciones, Esbeltas, Elevadas, Pesadas y Densamente Pobladas sobre Suelos Blandos de la Ciudad de Bogotá"* publicado por Gallego M., (2007) y la suma de experiencias acumuladas durante la aplicación del Decreto 074 de 2001 y 193 de 2006 que reglamentó el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá.

6.2.1 Mapa de zonificación de efectos locales

Es necesario mantener los límites que se proponen en este estudio y no ajustarlos a las vías, pues esto llevaría a que se pierda gran parte del trabajo y no se reflejen adecuadamente los resultados de un fenómeno natural que no hace descripción por limites construidos por el hombre.

Por lo anterior, se recomienda que para la normatividad y consulta del mapa de zonificación de efectos locales se realice por medio de las coordenadas del sitio de interés o de la dirección precisa, de tal manera que a través del portal de información de la entidad SIRE, se facilite la divulgación y consulta de los resultados.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2010

6.2.2 Reclasificaciones

Las reclasificaciones de los sitios únicamente serán validas dentro de las zonas de transición si se comprueba, mediante un estudio geotécnico, que el perfil de suelo y el espesor del depósito corresponden a una de las zonas cercanas, entendiendo por cercana a las que sean contiguas al sitio de interés.

6.2.3 Estudios de efectos locales con interacción cinemática suelo estructura

Para efecto de solicitar cambios en los espectros de diseño establecidos en cada zona, debido a las características locales del sitio y particulares del proyecto, serán opcionales los estudios de efectos locales con interacción cinemática suelo estructura únicamente en los siguientes casos:

- Edificaciones indispensables o de atención a la comunidad de acuerdo con la NSR – 98 con coeficientes de importancia de 1.2 y 1.3 respectivamente.

- Edificaciones con más de un sótano o con sótano y cimentación profunda.

Serán obligatorios los estudios de efectos locales con interacción cinemática suelo estructura para:

- Edificaciones con un periodo estructural con base rígida superior a 2.5 segundos.

Los estudios de efectos locales con interacción cinemática suelo estructura se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- La información geotécnica debe provenir de perforaciones superiores 50 m en suelo o 5 m en roca.

- Se debe medir la velocidad de onda de corte y compresión mediante equipos calibrados y la interpretación de los resultados debe estar a cargo de un profesional especializado. En las zonas de piedemonte se deben realizar pruebas geofisicas adicionales que logren identificar la variación bidimensional de la estratigrafía, velocidad de onda de corte y la forma del basamento rocoso.

- Se deben realizar ensayos de clasificación para todo el perfil del suelo y ensayos dinámicos sobre muestras representativas para al menos cada material de análisis. En el caso de no poderse realizar ensayos dinámicos por las características del material se pueden emplear para su caracterización las recomendaciones dadas en la bibliografía reciente siempre y cuando se tenga en cuenta el efecto del confinamiento. En el caso de realizarse varios ensayos dinámicos a diferentes niveles de deformación cortante, se deben integrar teniendo en cuenta las características de las acciones sísmicas sean compatibles con la frecuencia de aplicación de cargas, trayectorias de esfuerzos y esfuerzos efectivos de cada ensayo.

- Se deben emplear las señales de diseño que se usaron para la actualización de la microzonificación sísmica o las recomendadas por la DPAE, las cuales deben ser escaladas de acuerdo con la amenaza desagregada recomendada en este estudio.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

- Se pueden emplear modelos de respuesta unidimensional en las zonas lacustre y aluvial de espesores superiores a 50m. En la zona de cerros, piedemonte, lacustre y aluvial de menos de 50 m se debe realizar modelos bidimensionales.

- Los modelos de respuesta deben reflejar la configuración de la cimentación así como el número de pisos, sótanos y profundidad de los pilotes.

- El espectro de diseño propuesto debe envolver las aceleraciones espectrales promedio de cada una de las tres fuentes sísmicas, analizadas independientemente. En el caso de que se presentan aceleraciones espectrales superiores a las establecidas en este estudio se deben tener en cuenta la definición del espectro de diseño propuesto, pero en ningún caso puede ser menor al 80% de las establecidas para la zona.

6.2.4 Espectros de diseño

Se definen dos espectros de diseño para cada zona, acorde con los escenarios sísmicos de campo cercano y de campo lejano.

Para los diseños basados en el método de la fuerza horizontal equivalente se debe tomar la mayor solicitación entre los dos campo sísmicos, cercano y lejano, para determinar la solicitación de diseño.

Para el caso de diseños basados en análisis modales se debe contemplar como dos hipótesis de carga sísmica cada campo, cercano y lejano, independiente. El diseño se realizará entonces para la condición más crítica de las dos hipótesis de carga.

En el caso de realizarse estudios de efectos locales con interacción cinemática suelo estructura de acuerdo con las recomendaciones del numeral anterior, el espectro de diseño recomendado no puede ser inferior al 80% de la zona donde se localiza el proyecto y en el caso de que se presentan aceleraciones espectrales superiores a las establecidas para la zona estudiada se deben tener en cuenta la definición del espectro de diseño propuesto para el proyecto de interés.

6.2.5 Diseño de edificaciones

Se recomienda que sea de obligatorio cumplimiento diseñar edificaciones con los espectros de diseño de la microzonificación para la construcción de obra nueva, ampliación, modificación y reforzamiento de edificaciones de más de 2 pisos de altura.

Se debe verificar en todos los proyectos de edificaciones la posibilidad de que se presente resonancia entre el periodo de vibración de la edificación y el periodo fundamental del suelo. En el caso de que estos dos periodos tengan una diferencia inferior al 10% se deben tomar las medidas necesarias para el diseño estructural resista adecuadamente la posible resonancia de la estructura con el periodo del suelo.

6.2.6 Diseño de cimentaciones

En el diseño de la fundación se debe considerar la acción sísmica, en la cual se evalúe tanto la capacidad portante de los cimientos bajo esta consideración como la capacidad a la tensión producida por los momentos inducidos por el posible cabeceo de la estructura

Versión Preliminar para Discusión Enero 2006

al someterse a una acción sísmica, tanto individualmente para cada cimentación como en conjunto para todo el sistema de fundación.

En los análisis seudo estáticos de cimentaciones se debe tomar como solicitación 2/3 de Ao respectivo del sitio de interés.

Los estudios de suelos deben proporcionar la información suficiente para realizar el diseño sismorresistente de la fundación, así como el periodo fundamental del suelo para verificar posibles problemas de resonancia con la edificación, el cual debe ser consistente con los intervalos establecidos en la leyenda del mapa de efectos locales de Bogotá (Tabla 5.5. Descripción de las zonas de efectos locales).

6.2.7 Análisis de estabilidad de taludes

En los análisis seudo estáticos realizados para evaluar la estabilidad de laderas bajo condiciones sísmicas se debe tomar 2/3 de Ao respectivo del sitio de interés.

6.2.8 Diseño de infraestructura

Para el diseño de vías, puentes, canales, presas, jarillones, redes de acueducto, alcantarillado, gas, etc., no son aplicables directamente los resultados de este estudio, la responsabilidad de los diseños de cada infraestructura es responsabilidad de cada entidad a cargo de la misma, es decisión de cada una adoptar o no los resultados de este estudio.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los cambios propuestos son el producto de 10 años del avance del conocimiento en: señales de diseño (se pasó de 3 señales a 16 señales compatibles con la amenaza), información geotécnica (se pasó de 38 exploraciones de mas de 50 m de profundidad a más de 200), modelos de respuesta (se paso de 38 sitios de análisis a mas de 380) y nuevas técnicas para definir las zonas de respuesta sísmica y espectros de diseño (Particularmente, análisis bidimensionales y sensibilización estadística de parámetros).

Todo lo anterior es el avance normal del conocimiento técnico acerca de los fenómenos naturales, pues los resultados de la MZSB de 1997 fueron la mejor solución propuesta con el conocimiento e información disponibles en ese momento.

7.1 CONCLUSIONES

7.1.1 Metodología

La metodología aplicada consistió en recopilar toda la información disponible, organizarla y estructurarla en un sistema de información geográfica, para de esta manera analizarla integralmente y lograr proponer la actualización de la microzonificación sísmica de Bogotá, cuyos productos principales son el mapa de zonificación geotécnica, el mapa de zonificación de efectos locales y los espectros de diseño.

La participación activa en las reuniones de trabajo y los valiosos aportes de los representantes de la Universidad de los Andes, Sociedad Colombiana de Geotecnia y Asociación de Ingeniería Sísmica, han servido para que la DPAE actualice la MZSB y presente a la sociedad un estudio completo con la participación de las agremiaciones de mayor reconocimiento en el tema.

7.1.2 Estudios previos y convenios

Los estudios que se tuvieron en cuenta para la actualización de la zonificación geotécnica y de efectos locales de Bogotá, fueron el estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá (1997) y los aportes más importantes realizados por Ingeominas en los últimos años sobre este tema, a partir de esta información se definió la necesidad de actualizar la respuesta sísmica del depósito de la cuidad, por ello la DPAE realizó tres convenios interadministrativos con el propósito aunar esfuerzos para modelar la respuesta de sitio de acuerdo con las distintas metodologías existentes.

Es importante aclarar que estuvo fuera del alcance en esta etapa de actualización del estudio de MZSB la revisión detallada de la tectónica y sismicidad regional y local, puesto que esta actividad demandaría de mayor recurso y tiempo, además de la participación de entidades como Ingeominas quien es la entidad con mayor competencia en este tema y

que en el momento se encuentra adelantando la actualización del mapa nacional de amenaza sísmica.

7.1.3 Amenaza sísmica y señales de diseño

Los valores de amenaza sísmica total y desagregada adoptados en este estudio junto con las señales sísmicas que se emplearon en las modelaciones de la respuesta de sitio se obtuvieron a partir de los estudios de Microzonificación Sísmica de Bogotá, selección de señales sísmicas compatibles con la amenaza de Ingeominas y el estudio de actualización de la información sísmica de Bogotá realizado por la Universidad de los Andes.

Se analizaron los diferentes valores de amenaza total y amenaza desagregada y con base en la información disponible, las bondades y limitaciones de las metodologías de cálculo de amenaza y las referencias nacionales e internacionales, se concluye que se conserva el valor de amenaza total de 0.2 g para la ciudad y se adoptan para efectos de la actualización del mapa de efectos locales de Bogotá los siguientes valores de la amenaza desagregada para la Fuente Local de 0.187 g, fuente Regional de 0.165 g y para la fuente Lejana de 0.038 g.

Para que las señales de diseño sean compatibles con los escenarios sísmicos deben ser escaladas a los valores desagregados recomendados en este estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos los valores desagregados de aceleraciones máximas reportadas en el estudio de Microzonificación sísmica de Bogotá de 1997 sobreestiman la amenaza sísmica para el periodo de retorno de 475 años.

Para lograr normalizar a los niveles de amenaza sísmica de diseño (475 años) los resultados obtenidos en las modelaciones realizadas por cada uno de los grupos de trabajo, se consideró que los modelos unidimensionales trabajados por la AIS, que emplearon las señales escaladas, se trabaja con los promedios de las respuestas espectrales para todos los escenarios, considerando además que las aceleraciones espectrales entre 0.1 a 0.5s están sobrevaloradas; mientras que los modelos de unidimensionales realizados por UNIANDES y bidimensionales desarrollados por la SCG, se emplearon las señales sin escalar, por lo cual se trabajará para la fuente local con el promedio más 1.5 veces la desviación estándar, para la fuente regional con el promedio más 3.0 veces la desviación estándar y para la fuente de subducción con el promedio.

7.1.4 Zonificación Geotécnica

La información que se tiene en este momento, proveniente de diferentes fuentes, como son perfiles geológicos, perforaciones, ensayos de campo, análisis de respuesta por efectos locales, etc., permiten conocer de mejor manera el subsuelo de Bogotá y lograr una refinación importante en la definición de zonas de comportamiento geotécnico homogéneo, información muy útil tanto para respuesta símica como para las evaluaciones, diseños y obras que se adelantan en la ciudad.

Se conservaron en la zonificación geotécnica las mismas unidades geotécnicas identificadas en las zonificaciones anteriores, cerros, piedemonte, lacustre, aluvial y llanura de inundación, los principales aportes de este mapa están en la delimitación precisa de las zonas de piedemonte y en la subdivisión de las unidades de planicie

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

(lacustre, aluvial y llanura de inundación) de acuerdo con criterios geotécnicos más que geológicos.

La zonificación geotécnica para respuesta sísmica tiene cuatro grandes zonas, cerros, piedemonte, lacustre y aluvial, y al subdividirse de acuerdo con la subzona geotécnica y el espesor del depósito se obtienen en total 30 zonas de respuesta sísmica homogénea, lo que garantiza la gradual variación espacial en la respuesta de sitio y de este modo se evitan cambios bruscos entre una unidad a otra contigua.

Dado que el proceso de análisis incorpora varios tipos de información, es necesario estructurar cada temática involucrada en coberturas de información. Para ello, la información se articuló en un Sistema de Información Geográfica SIG (ArcGis by ESRI) con el fin de poder realizar los análisis de interpolación para observar la variación espacial de algunos de los parámetros geotécnicos.

7.1.5 Zonificación de efectos locales y espectros de diseño

Se tuvieron en cuenta para este mapa alrededor de 200 perforaciones y 384 sitios modelados bajo tres enfoques, logrando así buen cubrimiento de la ciudad.

Se definieron cuatro (4) zonas de respuesta sísmica. Cerros, Piedemonte, Lacustre y Conos, que por efectos de la variación del espesor del deposito se subdividieron para obtener una transición gradual de la respuesta entre cada zona, logrando de este modo identificar 14 zonas de respuesta sísmica homogénea.

De acuerdo con los resultados de los modelos de respuesta se presentan dos tipos de solicitaciones sísmicas en la ciudad, una de campo cercano y otra de campo lejano, razón por la cual los espectros de diseño presentan dos formas espectrales para cubrir cada campo.

7.1.6 Comparación de resultados y normatividad

Espacialmente se aprecia que la solicitación sísmica para periodos menores a 0.5 s en general no hay cambios considerables a excepción de las zonas de piedemonte y aluvial de menos de 100 m de espesor, donde aumenta un poco la solicitación. Lo anterior se debe principalmente a que el escenario cercano se consideraron nuevas señales de diseño consistentes con la amenaza y respecto al aumento en las zonas sur de la ciudad se debe a que el mapa vigente no tiene demarcadas las zonas de piedemonte en este sector de la ciudad y en la nueva propuesta se definió con mayor detalle cada una de las zonas de respuesta sísmica.

Para periodos superiores a 0.5 a 1.0 segundo las solicitaciones sísmicas en toda el área estudiada disminuyen considerablemente, lo cual se debe principalmente a las señales de diseño compatibles con la amenaza empleadas en la modelación, al refinamiento de las zonas de respuesta sísmica, a la modelación detallada de la respuesta sísmica y a la definición de espectros con control de aceleración, velocidad y desplazamiento.

Se relacionan los aspectos más importantes que se deben considerar en la actualización de la reglamentación del estudio microzonificación sísmica de Bogotá, los cuales son el resultado de varios años de experiencia y reuniones de trabajo sobre la aplicación normatividad.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

7.2 RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que los cambios en la normatividad pueden tener efectos diferentes para los distintos actores que la utilizan, es necesario revisar las implicaciones de los resultados y su concordancia con la normatividad vigente.

Es conveniente conformar una base de datos geotécnica con la información recopilada en el estudio, dado que la información aunque se encuentra organizada y digital no está debidamente estructurada en una base de datos que facilite la alimentación y búsqueda de información.

Es conveniente revisar con base en los resultados presentados, el escenario de daños por terremoto e identificar posibles sitios de interés para complementar la Red de Acelerógrafos de Bogotá que maneja la DPAE.

Se debe trabajar en el tema de interacción cinemática suelo estructura, para analizar los problemas que se pueden presentar en edificaciones con cimentación profunda y sótanos, pues los análisis que se presentan corresponden a una condición de campo libre.

Se debe estudiar la manera como se consideran las acciones sísmicas en el diseño de las cimentaciones de las edificaciones y las implicaciones de la configuración de la cimentación (Cimentación profunda y sótanos) en las solicitaciones sísmicas.

Restringir en la medida de lo posible la construcción de edificaciones con periodos de vibración reales similares al periodo fundamental del suelo de fundación, puesto que se puede presentar resonancia entre los periodos de la edificación y del suelo, aumentando las amplificaciones cuando ocurra un evento sísmico, de acuerdo con las experiencias ya vistas en otras partes del mundo.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2018

8 REFERENCIAS

AIS300 Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica, (1998). Normas Colombianas de diseño y construcción sismorresistentes, ley 400 de 1997, decreto 33 de 1998.

AIS Asociación Colombiana de Ingeniería sísmica, (2007). Estudio de Amplificación Sísmica en los Sitios Establecidos por la DPAE a través de Análisis Unidimensional, Transportando en un Análisis no Lineal por etapas la Señal desde la Roca a la Superficie. Convenio interadministrativo FOPAE-AIS No 487 de 2006.

Bommer, J.J. & Martínez-Pereira, A., (2000). The effective duration of earthquake strong-motion, Journal of Earthquake Engineering, Vol 3, No 2, 127-172.

Bommer J. J., Scott S. G. & Sarma S. K., (2000). Hazard consistent earthquake scenarios. Soil Dynamics and Earthquacke Engineering No19, 219-231.

Bommer J. J., (2005). Seismic Hazard analysis for engineering desing and earthquake loss estimation. Congreso Chileno de Sismología e ingeniería Antisísmica.

Díaz-Parra F., (2007). Modelo de comportamiento dinámico de arcillas blandas. Tesis Maestría en Geotecnia Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

Gallego M., (2007). Acerca de la Construcción de Edificaciones, Esbeltas, Elevadas, Pesadas y Densamente Pobladas sobre Suelos Blandos de la Ciudad de Bogotá.

Hashash Y., & Park D., (2002). Viscous damping formulation and frequency motion propagation in non-linear site response analysis. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 22, pp 611-624.

Hashash Y., Park D. (2001). Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississipi embayment. Engineering geology. Pags185-206.

Hashash Y., Park D. (2002). Site response analysis in the Mississippi embayment. U.S. – Japan seminar on seismic disaster mitigation in urban area. Geotechnical engineering.

Hashash Y., & Park D., (2002). Viscous damping formulation and frequency motion propagation in non-linear site response analysis. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 22, pp 611-624.

Hubach, E. (1954). Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y sus alrededores. Ingeominas Boletín geológico. Vol. V, No. 2, pp. 94-112. Bogotá.

INGEOMINAS, UNIANDES, (1997). Microzonificación Sísmica de Bogotá. Publicación especial Ingeominas. Bogotá.

Julivert, M. (1963). Observaciones sobre el Cuaternario de la Sabana de Bogotá. Boletín de Geología Universidad Industrial de Santander. No.7, pp. 52. Bucaramanga.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008

Kramer, S., (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall International.

Krinitzsky E. L., (2002). How to obtain earthquake ground motions for engineering desing. Engineering Geology, No 65, 1-16.

Loboguerrero A., (1994). Geología del subsuelo del nororiente de la ciudad de Bogota. Tesis Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Martínez A., Alvarado C, Rubiano D. (2002). Selección de señales de diseño consistentes con el escenario regional de amenaza sísmica: casos aplicados a Colombia. IX Congreso y IV Seminario Colombianos de Geotecnia. Medellín- Colombia.

Park D., Hashash Y. (2005). Evaluation of seismic site effects in the Mississipi embayment. I. Estimation of dynamic properties. Soil dynamic s and earthquake engineering. Pags 133-144.

SCG Sociedad Colombiana de Geotecnia, (2007). Modelo Geotécnico de La Sabana de Bogotá y Caracterización Dinámica Bidimensional de los Suelos de Bogotá. Convenio interadministrativo FOPAE-SCG No 460 de 2006.

Stokoe K., Darendeli M., Gilber R., Meno F., and Choi W., (2004). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. PhD Dissertation, University of Texas at Austin.

UNIANDES Universidad de los Andes, (2006). Innovación e Investigación Tendientes a la Actualización de la Información Sísmica de la Ciudad De Bogotá. Convenio interadministrativa FOPAE-UNIANDES No 667 de 2005.

Youd, T.L, Idriss, I.M. eds., (1997). Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Tech. Rep. NCEER-97-0022, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo.

Zhang J., Andrus R. and Juang H., (2005). Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol 131, No. 4, pp 453-464.

Versión Preliminar para Discusión Enero 2008