



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS
DE CAMINS, CANALS I PORTS



DEPARTAMENTO DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS
EN LA INGENIERÍA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN ANÁLISIS ESTRUCTURAL

METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN, CÁLCULO Y
CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DE LA AMENAZA
SÍSMICA PARA LA EVALUACIÓN PROBABILISTA DEL
RIESGO

TESIS DOCTORAL PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR POR LA
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Autor:

GABRIEL ANDRÉS BERNAL GRANADOS

Directores:

DR. ALEX H. BARBAT B.
DR. OMAR D. CARDONA A.

Barcelona, Septiembre de 2014

AGRADECIMIENTOS

La realización de esta tesis ha sido posible gracias al soporte económico de la beca “Paul C. Bell” de la Florida International University, Miami, FL. Agradezco sinceramente a este programa de becas, en especial a su director el Dr. Juan Pablo Sarmiento, por la confianza depositada en mí y el apoyo económico para la realización del doctorado.

Agradezco de manera muy especial a mis directores de tesis, los Doctores Alex Barbat y Omar Darío Cardona, por su orientación, por su interés y su confianza en mí, lo cual me permitió llevar a cabo este trabajo.

Agradezco sinceramente al profesor Dr. Mario Gustavo Ordaz por su amable colaboración, las sesiones de trabajo y sus excelentes ideas que hicieron posible el desarrollo de varios aspectos presentados en esta tesis. También agradezco al profesor Luis Yamín, quien me introdujo al mundo de la ingeniería sísmica y me brindó su apoyo y orientación al inicio del doctorado.

Agradezco a mi tutora, la Dra. Marta Liliana Carreño por darme toda la orientación necesaria para llevar a buen término esta tesis. Igualmente quiero dar las gracias a mis compañeros: Mario Salgado, Miguel Mora, César Velázquez, Dr. Jairo Valcárcel y Dra. Mabel Marulanda, quienes muy a su estilo han aportado de alguna manera a este proceso.

Agradezco de todo corazón a mis padres Gabriel y Gladys, y a mis hermanas Sandra Milena y María Angélica por apoyarme en la realización del doctorado y enseñarme desde siempre el amor por la vida académica.

Finalmente, agradezco con el alma a mi familia; a mi esposa María Alejandra y a mis hijos Juan Martín y José Pablo, por ser el motor de mi vida e inspirarme a lograr esta meta; y a Dios por darme la vida y las herramientas para vivirla.

DEDICATORIA

A María Alejandra, Juan Martín y José Pablo. Mi familia.

RESUMEN

Dentro del análisis de riesgo sísmico, la evaluación de la amenaza es uno de sus principales componentes, dado que, desde una perspectiva probabilista, provee las tasas de excedencia anuales de las intensidades de movimiento fuerte en el sitio o región de análisis, o alternativamente, provee un conjunto de eventos generados de manera estocástica que representan integralmente la amenaza del sitio o región de análisis. Esta tesis aporta elementos metodológicos en dos componentes principales de la evaluación de la amenaza sísmica: la atenuación del movimiento fuerte y la evaluación de efectos de sitio.

Se propone un procedimiento numérico para la calibración de un modelo de espectro de fuente, para obtener la combinación óptima de parámetros sismológicos con el fin de calcular funciones de atenuación no sesgadas en términos de la aceleración espectral en roca firme, usando los registros acelerográficos disponibles como objetivo de calibración. El modelo de espectro de fuente es usado para calcular el espectro radiado de aceleración para diferentes momentos sísmicos y distancias hipocentrales, combinando modelos de fuente puntual (campo lejano) y fuente finita (campo cercano). El valor esperado de la aceleración máxima del terreno se calcula del espectro radiado usando teoría de vibraciones aleatorias. Un algoritmo genético es implementado para buscar los parámetros sismológicos del modelo de espectro de fuente que mejor se ajusten a los registros acelerográficos disponibles. Posteriormente, se extiende el procedimiento de calibración a aceleraciones espectrales para diferentes periodos estructurales. Esta metodología puede ser aplicada en cualquier región con una cantidad estadísticamente significativa de registros acelerográficos. La metodología propuesta es empleada para generar funciones de atenuación compatibles con el entorno sísmo tectónico de Colombia, usando 206 acelerogramas como objetivo de calibración. Las funciones de atenuación obtenidas son comparadas con las usadas en el más reciente estudio de amenaza sísmica de Colombia. La comparación muestra que las funciones de atenuación obtenidas en esta tesis presentan el menor sesgo, mostrando un ajuste razonable entre ellas y los acelerogramas disponibles.

Por otra parte, en esta tesis se desarrolló una metodología para la evaluación de efectos de sitio en ciudades, la cual está basada en la geometría de las formaciones geológicas que dan origen a los suelos blandos. La metodología permite calcular la respuesta dinámica del suelo en cualquier punto dentro de una ciudad, haciendo uso de un modelo geotécnico de respuesta sísmica, el cual se basa en la generación de estratigrafías sintéticas a partir de la definición de perfiles en profundidad de las propiedades geotécnicas relevantes en la evaluación de la amplificación sísmica. Estas propiedades geotécnicas son modeladas como variables aleatorias, con el fin de incluir en el modelo, de una manera adecuada, la incertidumbre asociada al desconocimiento del valor exacto de dichas propiedades en profundidad. El modelo de efectos de sitio puede ser aplicado con tres objetivos principales: i) la obtención de funciones de transferencia del espectro de respuesta para análisis de riesgo, ii) la generación de shakemaps con fines de respuesta a emergencias, y iii) la microzonificación sísmica de la ciudad y obtención de espectros elásticos de diseño sísmo-resistente.

Las metodologías acá presentadas son un primer paso hacia la construcción de modelos de amenaza sísmica más detallados, que reflejen adecuadamente las condiciones particulares de la región en donde son aplicados. Esto deriva en la definición de modelos de riesgo sísmico más acertados, que permitan reducir las incertidumbres asociadas a la evaluación de la amenaza y, por lo tanto, obtener estimaciones de pérdidas más ajustadas con el fin de proveer a los tomadores de decisiones con información confiable y segura para la adecuada gestión del riesgo sísmico.

ABSTRACT

In the assessment of seismic risk, hazard is one of its main components, given that, from a probabilistic perspective, provides the annual rates of exceedance of the intensities of strong motion in the site or region of analysis, or alternatively, provides a set of stochastically generated events that fully represent the hazard of the site or region of analysis. This thesis provides methodological elements of two major components of the assessment of seismic hazard: the attenuation of strong motion and site effects.

A numerical procedure for the calibration of a source spectrum model to find the optimal combination of seismological parameters and derive unbiased ground motion prediction equations is presented, using available accelerogram recordings as calibration target. The source spectrum model is used to compute the radiated spectra of SH-waves for different seismic moments and hypocentral distances, combining point (far field) and finite (near field) source models. The expected value of the peak ground acceleration is computed from the radiated spectra using random vibrations theory. A genetic algorithm is used to search for the source spectrum parameters that best fit the available strong motion recordings. The procedure can be applied to any region with statistically significant accelerogram records. The proposed methodology is followed to derive spectral ground motion prediction equations compatible with the seismotectonic environment of Colombia, using 206 strong motion recordings as the calibration target. The obtained ground motion prediction equations are compared with those used in the latest national seismic hazard assessment study of Colombia. The comparison shows that the strong ground motion prediction equations obtained using the proposed methodology have lower residual bias, showing reasonable matching between them and the real strong motion recordings.

Furthermore, in this thesis a methodology for assessing site effects in cities was developed, which is based on the geometry of the prevailing geological formations and their relation to soft soil deposits. The methodology allows to calculate the soil dynamic response at any location within a city, using a geotechnical seismic response model, which is based on the generation of synthetic stratigraphies from the definition of depth profiles of geotechnical properties relevant in assessing the seismic amplification. These geotechnical properties are modeled as random variables, in order to include in the model, in a consistent way, the uncertainty associated with the lack of the exact value of these properties in depth. This site effects model can be applied with three main objectives: i) obtaining transfer functions of the response spectrum for risk assessment, ii) generating Shake-Maps for emergency response purposes, and iii) the seismic microzonation of a city and obtaining elastic seismic-resistant design spectra.

The methodologies presented here are a first step towards the construction of more detailed models of seismic hazard, which adequately reflect the specific conditions of the region where they are applied. This leads to the definition of more accurate models of seismic risk, to reduce the uncertainties associated with the assessment of the hazard and, therefore, to obtain tighter estimates of losses in order to provide decision makers with reliable information for the proper management of seismic risk.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.3 CONTENIDO DE LA TESIS.....	4
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	7
2.1 RIESGO SÍSMICO.....	7
2.1.1 LA AMENAZA COMO COMPONENTE DEL ANÁLISIS DE RIESGO	7
2.1.2 ELEMENTOS EXPUESTOS.....	11
2.1.3 VULNERABILIDAD DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS.....	11
2.1.4 CÁLCULO DEL RIESGO.....	12
2.1.5 MÉTRICAS DEL RIESGO	14
2.2 AMENAZA SÍSMICA	16
2.2.1 PARÁMETROS DE MOVIMIENTO FUERTE	16
2.2.2 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE MOVIMIENTO FUERTE	16
2.2.3 EVALUACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA SÍSMICA	18
2.3 ANTECEDENTES EN COLOMBIA	23
CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE ESPECTRO DE FUENTE Y SU APLICACIÓN EN COLOMBIA	27
3.1 ESPERANZA MATEMÁTICA DE PGA.....	28
3.1.1 ESPECTRO DE AMPLITUDES DE FOURIER DE ACELERACIÓN	28
3.1.2 VALOR ESPERADO DE PGA	32
3.1.3 PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA PGA.....	33
3.2 EXPANSIÓN A ORDENADAS ESPECTRALES	35
3.2.1 PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA ORDENADAS ESPECTRALES	35
3.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN COLOMBIA	36
3.3.1 BASE DE DATOS DE MOVIMIENTO FUERTE.....	36
3.3.2 FUNCIONES DE ATENUACIÓN DE PGA PARA COLOMBIA.....	40
3.3.3 FUNCIONES DE ATENUACIÓN DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL PARA COLOMBIA.....	42
3.3.4 COMPARACIÓN CON FUNCIONES DE ATENUACIÓN PREVIAMENTE APLICADAS AL CASO COLOMBIANO ..	44
3.4 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA	47
3.4.1 REPRESENTACIÓN POR ESCENARIOS.....	56
CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTO PARA LA DEFINICIÓN DE UN MODELO INTEGRAL DE EFECTOS DE SITIO EN CIUDADES	61
4.1 ASPECTOS METODOLÓGICOS FUNDAMENTALES	63
4.1.1 CONSTRUCCIÓN DE ESTRATIGRAFÍAS SINTÉTICAS.....	63
4.1.2 INCERTIDUMBRE EN LA RESPUESTA DINÁMICA DEL SUELO.....	65
4.1.3 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA.....	65

4.1.4	FUNCIONES DE ATENUACIÓN ESPECÍFICAS DE CADA SITIO	67
4.1.5	FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL ESPECTRO DE RESPUESTA	67
4.2	CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE EFECTOS DE SITIO PARA BOGOTÁ.....	67
4.2.1	EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA A NIVEL DE ROCA FIRME	68
4.2.2	DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS CONTACTOS GEOLÓGICOS.....	69
4.2.3	CONDICIONES DE BORDE	72
4.2.4	INFORMACIÓN GEOTÉCNICA.....	74
4.2.5	DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE SUELO DE ANÁLISIS.....	81
4.2.6	MALLA DE CÁLCULO	86
4.2.7	CONSTRUCCIÓN DE ESTRATIGRAFÍAS SINTÉTICAS.....	87
4.2.8	EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA.....	90
4.3	APLICACIONES DEL MODELO DE EFECTOS DE SITIO EN BOGOTÁ.....	100
4.3.1	FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL ESPECTRO DE RESPUESTA CON FINES DE ANÁLISIS DE RIESGO	100
4.3.2	GENERACIÓN DE SHAKEMAPS.....	118
4.3.3	MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ	128
 CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		141
5.1	CONCLUSIONES SOBRE LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DEL ESPECTRO DE FUENTE	141
5.2	CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO DE ATENUACIÓN GENERADO PARA COLOMBIA.....	142
5.3	CONCLUSIONES SOBRE EL PROCEDIMIENTO PARA LA DEFINICIÓN DE UN MODELO INTEGRAL DE EFECTOS DE SITIO.....	142
5.4	CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO DE EFECTOS DE SITIO DE BOGOTÁ	143
5.5	FUTUROS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN.....	144
5.5.1	REFINAMIENTO DEL MODELO DE ESPECTRO DE FUENTE.....	145
5.5.2	CÁLCULO DE MODELOS DE ATENUACIÓN PARA DIFERENTES REGIONES DEL MUNDO	145
5.5.3	REFINAMIENTO DEL MODELO DE EFECTOS DE SITIO	145
5.5.4	MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA BASADA EN FUNCIONES DE TRANSFERENCIA ESTRUCTURAL.....	145
5.5.5	MODELACIÓN DEL RIESGO EN SISTEMAS DE ELEMENTOS EXPUESTOS	146
 REFERENCIAS.....		148
 ANEXO A: TABLAS DE ATENUACIÓN.....		A-1
 SISMOS CORTICALES		A-2
SISMOS DE SUBDUCCIÓN		A-6
 ANEXO B: MAPAS DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA		B-1
 ANEXO C: DESCOMPOSICIÓN DE CHOLESKY.....		C-1
 ANEXO D: MATRIZ PROPAGADORA DE THOMPSON-HASKEL.....		D-1
 ANEXO E: PROGRAMA STRONG MOTION ANALYST.....		E-1
 REQUERIMIENTOS E INSTALACIÓN.....		E-2
INTERFAZ DE USUARIO		E-3

PROCESAMIENTO DE SEÑALES	E-4
BASE DE DATOS DE MOVIMIENTO FUERTE	E-11
RESPUESTA DINÁMICA DE SUELOS	E-13
ATENUACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE.....	E-17
CATÁLOGOS SISMOLÓGICOS	E-20
<u>ANEXO F: PROGRAMA SEISMIC MICROZONATION STUDIO</u>	<u>F-1</u>
REQUERIMIENTOS E INSTALACIÓN.....	F-1
INTERFAZ DE USUARIO	F-1
GEOMETRÍA.....	F-2
DATOS DE CAMPO.....	F-3
PROPIEDADES GEOTÉCNICAS.....	F-4
SEÑALES SÍSMICAS	F-5
SITIOS DE CÁLCULO.....	F-6
RESPUESTA DINÁMICA	F-7
EXPORTACIÓN	F-9
POST PROCESAMIENTO	F-11
<u>ANEXO G: ARTÍCULOS Y PROYECTOS RELACIONADOS CON LA TESIS.....</u>	<u>G-1</u>
PUBLICACIONES	G-1
ARTÍCULOS EN REVISTAS INDEXADAS	G-1
ARTÍCULOS EN OTRAS REVISTAS	G-1
CAPÍTULOS DE LIBROS	G-1
PONENCIAS EN CONGRESOS	G-1
PROYECTOS	G-3

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UN EVENTO ARBITRARIO A DENTRO DEL ESPACIO DE MUESTRO DE PÉRDIDAS S. ...	8
FIGURA 2-2. SUBDIVISIÓN DEL ESPACIO DE MUESTRO S EN EVENTOS BASE B.	8
FIGURA 2-3. INTERSECCIONES ENTRE EL EVENTO A Y LOS EVENTOS BASE B.	9
FIGURA 2-4. EJEMPLO DE UNA FUNCIÓN DE VULNERABILIDAD.	12
FIGURA 2-5. EJEMPLO DE VARIAS MEDIDAS DE DISTANCIA USADAS EN FUNCIONES DE ATENUACIÓN. (KRAMER, 1996)	17
FIGURA 3-1. AMPLITUD DADA POR EL TÉRMINO DE FUENTE COMO FUNCIÓN DE LA MAGNITUD Y LA DISTANCIA.	29
FIGURA 3-2. ATENUACIÓN GEOMÉTRICA COMO FUNCIÓN DE LA DISTANCIA HIPOCENTRAL Y R_x	29
FIGURA 3-3. FILTRO F_Q COMO FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y PARA VALORES ARBITRARIOS DE ε	30
FIGURA 3-4. FILTRO F_K COMO FUNCIÓN DE LA FRECUENCIA Y PARA VALORES ARBITRARIOS DE κ	31
FIGURA 3-5. ESPECTROS DE AMPLITUDES DE FOURIER TEÓRICOS CALCULADOS CON EL MODELO DE FUENTE PUNTUAL	32
FIGURA 3-6. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LOS EPICENTROS DE LOS SISMOS USADOS EN LA CALIBRACIÓN.	37
FIGURA 3-7. DISTRIBUCIÓN DE MAGNITUD Y DISTANCIA DE LOS ACELEROGRAMAS EMPELADOS.	39
FIGURA 3-8. NÚMERO DE REGISTROS POR RANGO DE MAGNITUD	39
FIGURA 3-9. NÚMERO DE REGISTROS POR RANGO DE DISTANCIA	40
FIGURA 3-10. RESIDUALES PARA SISMOS CORTICALES (ARRIBA) Y DE SUBDUCCIÓN (ABAJO)	41
FIGURA 3-11. PGA CALCULADO VS. OBSERVADO PARA SISMOS CORTICALES (IZQUIERDA) Y DE SUBDUCCIÓN (DERECHA). LA LÍNEA ROJA INDICA EL CASO EN EL QUE AMBAS CANTIDADES SON IGUALES.	41
FIGURA 3-12. FUNCIÓN DE ATENUACIÓN PARA SISMOS CORTICALES	42
FIGURA 3-13. FUNCIÓN DE ATENUACIÓN PARA SISMOS DE SUBDUCCIÓN	42
FIGURA 3-14. VALORES DE Q_0 COMO FUNCIÓN DEL PERIODO ESTRUCTURAL, PARA SISMOS CORTICALES (IZQUIERDA) Y DE SUBDUCCIÓN (DERECHA).	43
FIGURA 3-15. ESPECTROS DE RESPUESTA CALCULADOS CON LAS FUNCIONES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS CORTICALES OBTENIDAS PARA COLOMBIA.	43
FIGURA 3-16. ESPECTROS DE RESPUESTA CALCULADOS CON LAS FUNCIONES DE ATENUACIÓN PARA SISMOS DE SUBDUCCIÓN OBTENIDAS PARA COLOMBIA.	44
FIGURA 3-17. COMPARACIÓN DE LOS SESGOS Y DESVIACIONES ESTÁNDAR DE LA FUNCIÓN DE ATENUACIÓN OBTENIDA PARA SISMOS CORTICALES CON AQUELLAS USADAS EN EL ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA, PARA DIFERENTES PERIODOS ESTRUCTURALES	45
FIGURA 3-18. COMPARACIÓN DE LOS SESGOS Y DESVIACIONES ESTÁNDAR DE LA FUNCIÓN DE ATENUACIÓN OBTENIDA PARA SISMOS DE SUBDUCCIÓN CON AQUELLAS USADAS EN EL ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA, PARA DIFERENTES PERIODOS ESTRUCTURALES	45
FIGURA 3-19. COMPARACIÓN DE LAS FUNCIONES DE ATENUACIÓN OBTENIDAS PARA SISMOS CORTICALES CON AQUELLAS USADAS EN EL ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA, PARA DIFERENTES MAGNITUDES	46
FIGURA 3-20. COMPARACIÓN DE LAS FUNCIONES DE ATENUACIÓN OBTENIDAS PARA SISMOS DE SUBDUCCIÓN CON AQUELLAS USADAS EN EL ESTUDIO GENERAL DE AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA, PARA DIFERENTES MAGNITUDES	47
FIGURA 3-21. GEOMETRÍA DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS CORTICALES EN COLOMBIA. TOMADO DE AIS, 2010.	49
FIGURA 3-22. GEOMETRÍA DE LAS FUENTES SISMOGÉNICAS DE SUBDUCCIÓN EN COLOMBIA. TOMADO DE AIS, 2010.	50
FIGURA 3-23. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE PGA (cm/s^2) PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.	51
FIGURA 3-24. PGA PARA 475 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO, CALCULADO EN LAS CIUDADES COLOMBIANAS CAPITALES DE DEPARTAMENTO.	52
FIGURA 3-25. COMPARACIÓN DEL PGA PARA 475 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO, CALCULADO EN ESTA TESIS, CON EL COEFICIENTE A_a EXIGIDO POR LA NSR-10.	53
FIGURA 3-26. ESPECTROS DE AMENAZA UNIFORME PARA CIUDADES SELECCIONADAS.	54
FIGURA 3-27. ESPECTROS DE AMENAZA UNIFORME PARA CIUDADES SELECCIONADAS.	55
FIGURA 3-28. EPICENTROS DE LOS TERREMOTOS INCLUIDOS EN LA COLECCIÓN DE ESCENARIOS.	57
FIGURA 3-29. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA MEDIANA DE PGA (cm/s^2) PARA UN TERREMOTO DE MAGNITUD 7.8 OCURRIENDO EN LA FALLA FRONTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL.	58
FIGURA 3-30. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA MEDIANA DE PGA (cm/s^2) PARA UN TERREMOTO DE MAGNITUD 7.4 OCURRIENDO EN LA FALLA ROMERAL.	59
FIGURA 3-31. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA MEDIANA DE PGA (cm/s^2) PARA UN TERREMOTO DE MAGNITUD 8.3 OCURRIENDO EN LA ZONA DE SUBDUCCIÓN.	60
FIGURA 4-1. CURVAS DEL MODELO LINEAL EQUIVALENTE	66
FIGURA 4-2. UBICACIÓN DE BOGOTÁ EN COLOMBIA.	68
FIGURA 4-3. MAPA DE AMENAZA UNIFORME EN ROCA EN TÉRMINOS PGA. 475 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.	69

FIGURA 4-4. GEOMETRÍA DEL TERRENO FIRME (ROCA). ESCALA ESTÁ DADA EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR.....	70
FIGURA 4-5. GEOMETRÍA CONTACTO SABANA-SUBACHOQUE. ESCALA ESTÁ DADA EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR.....	71
FIGURA 4-6. CONTORNO DE AFLORAMIENTO DE ROCA FIRME.	72
FIGURA 4-7. TOPOGRAFÍA EMPLEADA. ESCALA ESTÁ DADA EN METROS SOBRE EL NIVEL DEL MAR.	73
FIGURA 4-8. PROFUNDIDAD DEL NIVEL FREÁTICO.	74
FIGURA 4-9. UBICACIÓN DE LOS SONDEOS EN BOGOTÁ.	76
FIGURA 4-10. PROFUNDIDAD EXPLORADA.....	78
FIGURA 4-11. PORCENTAJE EXPLORADO DEL DEPÓSITO BLANDO.....	79
FIGURA 4-12. PERFILES EXTRAPOLADOS DE PESO ESPECÍFICO Y VELOCIDAD DE ONDA DE CORTANTE PARA EL SONDEO N51 ..	80
FIGURA 4-13. PERFILES COMPLETADOS DE PESO ESPECÍFICO Y VELOCIDAD DE ONDA DE CORTANTE PARA EL SONDEO PA1 ..	81
FIGURA 4-14. PERFILES DE ALGUNAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO TIPO 1.....	82
FIGURA 4-15. CURVAS DE DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ PARA SUELOS BLANDOS COHESIVOS.	84
FIGURA 4-16. CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO PARA SUELOS BLANDOS COHESIVOS.....	84
FIGURA 4-17. PERFILES DE ALGUNAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DEL SUELO TIPO 2.....	85
FIGURA 4-18. CURVA DE DEGRADACIÓN DE RIGIDEZ PARA SUELOS GRANULARES.	86
FIGURA 4-19. CURVA DE AMORTIGUAMIENTO PARA SUELOS GRANULARES.	86
FIGURA 4-20. MALLA DE CÁLCULO Y EXTENSIÓN TOTAL DEL ANÁLISIS	87
FIGURA 4-21. PERFILES EN PROFUNDIDAD CON 50 SIMULACIONES SOBRE EL SITIO 226. LA LÍNEA NEGRA INDICA EL VALOR PROMEDIO DE LAS PROPIEDADES.	89
FIGURA 4-22. VELOCIDAD DE ONDA DE CORTANTE PROMEDIO.	90
FIGURA 4-23. PROFUNDIDAD TOTAL DEL DEPÓSITO BLANDO.	91
FIGURA 4-24. PERIODOS FUNDAMENTALES DE VIBRACIÓN DEL SUELO (SEG).....	92
FIGURA 4-25. FUNCIONES DE AMPLIFICACIÓN DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL PARA 20 SIMULACIONES EN EL SITIO 226. LA LÍNEA NEGRA CORRESPONDE AL VALOR PROMEDIO DEL FACTOR DE AMPLIFICACIÓN $AF(T)$	93
FIGURA 4-26. DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL LOGARITMO DE LA FUNCIÓN DE AMPLIFICACIÓN $AF(T)$ PARA EL SITIO 226.	93
FIGURA 4-27. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE σ_{LNAF} PARA PGA	94
FIGURA 4-28. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE σ_{LNAF} PARA T = 0.1 SEG.	95
FIGURA 4-29. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE σ_{LNAF} PARA T = 0.5 SEG.	96
FIGURA 4-30. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE σ_{LNAF} PARA T = 1.0 SEG.	97
FIGURA 4-31. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE σ_{LNAF} PARA T = 2.0 SEG.	98
FIGURA 4-32. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE σ_{LNAF} PARA T = 3.0 SEG.	99
FIGURA 4-33. ESQUEMA DE LA ESTRUCTURAL DEL FORMATO DE EFECTOS DE SITIO PROPUESTO POR HUERTA ET.AL. 2011. 100	
FIGURA 4-34. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=0 SEG Y PGA EN ROCA = 50 CM/S ² . . 101	
FIGURA 4-35. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=0.1 SEG Y PGA EN ROCA = 50 CM/S ²	102
FIGURA 4-36. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=0.5 SEG Y PGA EN ROCA = 50 CM/S ²	103
FIGURA 4-37. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=1 SEG Y PGA EN ROCA = 50 CM/S ² . . 104	
FIGURA 4-38. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=2 SEG Y PGA EN ROCA = 50 CM/S ² . . 105	
FIGURA 4-39. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=3 SEG Y PGA EN ROCA = 50 CM/S ² . . 106	
FIGURA 4-40. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=0 SEG Y PGA EN ROCA = 400 CM/S ² . 107	
FIGURA 4-41. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=0.1 SEG Y PGA EN ROCA = 400 CM/S ²	108
FIGURA 4-42. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=0.5 SEG Y PGA EN ROCA = 400 CM/S ²	109
FIGURA 4-43. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=1 SEG Y PGA EN ROCA = 400 CM/S ² . 110	
FIGURA 4-44. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=2 SEG Y PGA EN ROCA = 400 CM/S ² . 111	
FIGURA 4-45. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA, PARA T=3 SEG Y PGA EN ROCA = 400 CM/S ² . 112	
FIGURA 4-46. PORTAFOLIOS DE EDIFICACIONES DE EDUCACIÓN DE BOGOTÁ.	113
FIGURA 4-47. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE BOGOTÁ.	114
FIGURA 4-48. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD DE LOS SISTEMAS ESTRUCTURALES DE BOGOTÁ.	115
FIGURA 4-49. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS DEL PORTAFOLIO DE EDUCACIÓN.....	116
FIGURA 4-50. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE EXCEDENCIA DE PML DEL PORTAFOLIO DE EDUCACIÓN.....	117
FIGURA 4-51. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS DE PROBABILIDAD DE QUIEBRA DEL PORTAFOLIO DE EDUCACIÓN, PARA DIFERENTES VENTANAS DE EXPOSICIÓN.	117
FIGURA 4-52. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE SISBOG-LISA (BERNAL, 2009).	118
FIGURA 4-53. ACELEROGRAMA DEL SISMO DE ARMENIA (1999) REGISTRADO EN LA ESTACIÓN BOCATOMA.....	119

FIGURA 4-54. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PGA PARA EL SISMO DE ARMENIA (1999).....	120
FIGURA 4-55. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=0.1 SEG) PARA EL SISMO DE ARMENIA (1999).....	121
FIGURA 4-56. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=0.2 SEG) PARA EL SISMO DE ARMENIA (1999).....	122
FIGURA 4-57. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=0.5 SEG) PARA EL SISMO DE ARMENIA (1999).....	123
FIGURA 4-58. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=1 SEG) PARA EL SISMO DE ARMENIA (1999).....	124
FIGURA 4-59. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=1.5 SEG) PARA EL SISMO DE ARMENIA (1999).....	125
FIGURA 4-60. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=2 SEG) PARA EL SISMO DE ARMENIA (1999).....	126
FIGURA 4-61. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SA(T=3 SEG) PARA EL SISMO DE ARMENIA (1999).....	127
FIGURA 4-62. FUNCIONES DE ATENUACIÓN DE SITIOS SELECCIONADOS.....	128
FIGURA 4-63. ESPECTROS DE AMENAZA UNIFORME DE SITIOS SELECCIONADOS.....	129
FIGURA 4-64. MAPA DE AMENAZA UNIFORME EN TÉRMINOS DE PGA.....	130
FIGURA 4-65. MAPA DE AMENAZA UNIFORME EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL PARA T=0.05 SEG.....	131
FIGURA 4-66. MAPA DE AMENAZA UNIFORME EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL PARA T=0.3 SEG.....	132
FIGURA 4-67. MAPA DE AMENAZA UNIFORME EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL PARA T=0.5 SEG.....	133
FIGURA 4-68. MAPA DE AMENAZA UNIFORME EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL PARA T=1.0 SEG.....	134
FIGURA 4-69. MAPA DE AMENAZA UNIFORME EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL PARA T=2.0 SEG.....	135
FIGURA 4-70. MAPA DE AMENAZA UNIFORME EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL PARA T=3.0 SEG.....	136
FIGURA 4-71. ESPECTRO ELÁSTICO DE ACELERACIONES DE DISEÑO COMO FRACCIÓN DE G. (TOMADO DE LA NSR-10).....	137
FIGURA 4-72. ESPECTROS DE DISEÑO AJUSTADOS PARA SITIOS SELECCIONADOS.....	137
FIGURA 4-73. MAPA DE DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DEL PARÁMETRO FA.....	138
FIGURA 4-74. MAPA DE DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DEL PARÁMETRO Fv.....	139
FIGURA B-1. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE PGA (CM/S ²) PARA 100 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	B-1
FIGURA B-2. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE PGA (CM/S ²) PARA 250 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	B-2
FIGURA B-3. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE PGA (CM/S ²) PARA 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	B-3
FIGURA B-4. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE PGA (CM/S ²) PARA 1000 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	B-4
FIGURA B-5. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE PGA (CM/S ²) PARA 2500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	B-5
FIGURA B-6. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL (CM/S ²) PARA PERIODO ESTRUCTURAL DE 0.15 SEG. Y 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	B-6
FIGURA B-7. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL (CM/S ²) PARA PERIODO ESTRUCTURAL DE 0.3 SEG. Y 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	B-7
FIGURA B-8. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL (CM/S ²) PARA PERIODO ESTRUCTURAL DE 0.5 SEG. Y 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	B-8
FIGURA B-9. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL (CM/S ²) PARA PERIODO ESTRUCTURAL DE 1.0 SEG. Y 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	B-9
FIGURA B-10. MAPA DE AMENAZA EN TÉRMINOS DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL (CM/S ²) PARA PERIODO ESTRUCTURAL DE 2.0 SEG. Y 500 AÑOS DE PERIODO DE RETORNO.....	B-10
FIGURA E-1. INTERFAZ DE SMA.....	E-3
FIGURA E-2. ARCHIVO DE TEXTO MULTI-CANAL DE LABVIEW CARGADO A SMA.....	E-4
FIGURA E-3. SEÑALES CONTENIDAS EN VARIOS CANALES.....	E-5
FIGURA E-4. VENTANA DE SEÑAL.....	E-5
FIGURA E-5. ALGUNAS VENTANAS DE SEÑAL COLAPSADAS PARA FACILITAR LA VISUALIZACIÓN.....	E-6
FIGURA E-6. VENTANA DE PROCESAMIENTO POR LOTES.....	E-7
FIGURA E-7. SEÑAL CON SU CORRESPONDIENTE ESPECTRO DE RESPUESTA (5% DE AMORTIGUAMIENTO).....	E-8
FIGURA E-8. SEÑAL CON SU CORRESPONDIENTE ESPECTRO AMPLITUDES DE FOURIER.....	E-8
FIGURA E-9. SEÑAL CON SU CORRESPONDIENTE DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA.....	E-8
FIGURA E-10. SEÑAL CON SU CORRESPONDIENTE DIAGRAMA DE HUSID.....	E-8
FIGURA E-11. SEÑAL CON SU CORRESPONDIENTE DIAGRAMA DE FLUJO DE ENERGÍA.....	E-8
FIGURA E-12. VENTANA MULTI SPECTRUM MOSTRANDO ESPECTROS DE RESPUESTA.....	E-9
FIGURA E-13. SEÑALES SELECCIONADAS PARA OPERAR.....	E-9
FIGURA E-14. FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA (SEÑAL1/SEÑAL2).....	E-10
FIGURA E-15. CORRELACIÓN CRUZADA. SE MUESTRA EL PERIODOGRAMA A LA IZQUIERDA Y LA DENSIDAD ESPECTRAL CRUZADA A LA DERECHA.....	E-10
FIGURA E-16. SUMA (SEÑAL1+SEÑAL2). LA SUMA SE ADICIONA COMO UN NUEVO CANAL AL ARCHIVO.....	E-10
FIGURA E-17. RESTA (SEÑAL1-SEÑAL2). LA RESTA SE ADICIONA COMO UN NUEVO CANAL AL ARCHIVO.....	E-11
FIGURA E-18. ODOGRAMA. MUESTRA EL MOVIMIENTO DE UNA PARTÍCULA, EN EL PLANO CARTESIANO, ANTE LA ACCIÓN DE LA SEÑAL 1 EN EL EJE HORIZONTAL Y LA SEÑAL 2 EN EL EJE VERTICAL.....	E-11
FIGURA E-19. REGISTRO DE PROCESAMIENTO.....	E-11

FIGURA E-20. PANTALLA DE LA BASE DE DATOS DE MOVIMIENTO FUERTE.	E-12
FIGURA E-21. PANTALLA DEL MÓDULO DE RESPUESTA DINÁMICA DE SUELOS.	E-13
FIGURA E-22. PESTAÑA DE INFORMACIÓN GENERAL.	E-14
FIGURA E-23. PESTAÑA DE CONFIGURACIÓN DE ANÁLISIS - ESTRATIGRAFÍA.	E-14
FIGURA E-24. PESTAÑA DE CONFIGURACIÓN DE ANÁLISIS – SEÑALES SÍSMICAS EN LA BASE DEL SITIO.	E-15
FIGURA E-25. PESTAÑA DE RESULTADOS – RESULTADOS POR CAPA.	E-15
FIGURA E-26. PESTAÑA DE RESULTADOS – ESPECTROS DE RESPUESTA EN SUPERFICIE.	E-16
FIGURA E-27. PESTAÑA DE RESULTADOS – FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL ESPECTRO DE AMPLITUDES DE FOURIER. ..	E-16
FIGURA E-28. PESTAÑA DE RESULTADOS – ACELEROGRAMAS EN SUPERFICIE.	E-17
FIGURA E-29. PANTALLA DEL MÓDULO DE ATENUACIÓN DEL MOVIMIENTO FUERTE.	E-17
FIGURA E-30. PARÁMETROS PARA LA CONFIGURACIÓN DE UNA FUNCIÓN DE ATENUACIÓN.	E-18
FIGURA E-31. FUNCIÓN DE ATENUACIÓN GENERADA.	E-18
FIGURA E-32. VENTANA DE FUNCIÓN DE ATENUACIÓN – VISTA GRÁFICA.	E-19
FIGURA E-33. VENTANA DE FUNCIÓN DE ATENUACIÓN – VISTA TABULADA.	E-19
FIGURA E-34. VENTANA DE CÁLCULO DE FUNCIONES DE ATENUACIÓN POR LOTES.	E-19
FIGURA E-35. FORMULARIO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO.	E-20
FIGURA E-36. PANTALLA DEL MÓDULO DE PROCESAMIENTO DE CATÁLOGOS SISMOLÓGICOS.	E-21
FIGURA E-37. MAPA Y PROPIEDADES DE UN CATÁLOGO SISMOLÓGICO DE COLOMBIA.	E-21
FIGURA E-38. HERRAMIENTA DE REMOCIÓN DE RÉPLICAS.	E-22
FIGURA E-39. HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE COMPLETITUD.	E-22
FIGURA E-40. HERRAMIENTA DE SISMICIDAD SUAVIZADA.	E-23
FIGURA F-1. PANTALLA DE INCIO DE SMS.	F-2
FIGURA F-2. PANTALLA DE GEOMETRÍA.	F-3
FIGURA F-3. PROPIEDADES DE LAS CAPAS DE CONTACTO GEOLÓGICO.	F-3
FIGURA F-4. PANTALLA DE DATOS DE CAMPO.	F-4
FIGURA F-5. PERFIL EN PROFUNDIDAD DE LA VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE.	F-4
FIGURA F-6. PANTALLA DE PROPIEDADES GEOTÉCNICAS – PROPIEDADES DEL SUELO 1.	F-5
FIGURA F-7. PANTALLA DE PROPIEDADES GEOTÉCNICAS – PROPIEDADES DE LA ROCA BASE.	F-5
FIGURA F-8. PANTALLA DE SEÑALES SÍSMICAS.	F-6
FIGURA F-9. PANTALLA DE SITIOS DE CÁLCULO.	F-6
FIGURA F-10. PANTALLA DE RESPUESTA DINÁMICA.	F-7
FIGURA F-11. PANTALLA DE RESPUESTA DINÁMICA – RESULTADOS POR CAPA.	F-8
FIGURA F-12. PANTALLA DE RESPUESTA DINÁMICA – ESPECTROS DE RESPUESTA.	F-8
FIGURA F-13. PANTALLA DE RESPUESTA DINÁMICA – FUNCIONES DE TRANSFERENCIA.	F-9
FIGURA F-14. PANTALLA DE RESPUESTA DINÁMICA – ACELEROGRAMAS EN SUPERFICIE.	F-9
FIGURA F-15. PANTALLA DE EXPORTACIÓN.	F-10
FIGURA F-16. LISTADO DE OPCIONES DE LA PANTALLA EXPORTACIÓN.	F-10

LISTA DE TABLAS

TABLA 2-1. EVENTOS ARBITRARIOS A Y SU MEDIDA DE PROBABILIDAD.....	10
TABLA 2-2. CAPACIDAD DE LOS PARÁMETROS DE MOVIMIENTO FUERTE PARA REPRESENTAR LAS CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO.	16
TABLA 3-1. RESUMEN DE LA BASE DE DATOS DE ACELEROGRAMAS	38
TABLA 3-2. RANGOS INICIALES PARA LOS PARÁMETROS SISMOLÓGICOS.....	40
TABLA 3-3. PARÁMETROS SISMOLÓGICOS RESULTANTES, SESGO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA CADA MODELO	40
TABLA 3-4. VALORES RESULTANTES DE Q_0 , SESGO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR POR TIPO DE TERREMOTOS	43
TABLA 3-5. SESGOS Y DESVIACIONES ESTÁNDAR PARA LAS FUNCIONES DE ATENUACIÓN DE PGA PREVIAMENTE USADOS EN COLOMBIA, EN COMPARACIÓN CON LAS OBTENIDAS EN ESTA TESIS	44
TABLA 3-6. PARÁMETROS DE SISMICIDAD ASIGNADOS A LAS FUENTES SISMOGÉNICAS COLOMBIANAS. TOMADO DE AIS, 2010.	48
TABLA 4-1. LISTADO DE LOS SONDEOS EMPLEADOS.	75
TABLA 4-2. FACTORES DE CORRECCIÓN DE G/G_0 PARA SUELOS DE BOGOTÁ (SCG 2006).	83
TABLA 4-3. RESULTADO DE LA CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTRATIGRAFÍA SINTÉTICA.	88
TABLA 4-4. SISTEMAS ESTRUCTURALES DE EDIFICACIONES EN BOGOTÁ.....	114
TABLA 4-5. RESUMEN DE RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL RIESGO.	116

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Los sismos se definen como un proceso de liberación súbita de energía mecánica debido a cambios en el estado de esfuerzos y deformaciones en zonas de interacción de placas tectónicas, o dentro de ellas. Su efecto inmediato es la transmisión de esa energía mecánica y su difusión mediante ondas de diversos tipos, a través de la corteza terrestre. Su ocurrencia, dentro marcos de tiempo de vida humana, es poco probable, mientras que sus consecuencias pueden ser devastadoras.

Los grandes desastres sísmicos recientes, como el terremoto de Haití del 12 de enero de 2010, el de Chile del 27 de febrero de 2010 y el de Japón del 11 de marzo de 2011, dan una muestra del potencial destructivo de este fenómeno natural. No obstante, el impacto asociado a los terremotos no está condicionado exclusivamente por la violencia del movimiento que se genera en el terreno como resultado del tránsito de las ondas sísmicas. Si ocurre un terremoto de gran magnitud lejos de una zona poblada, puede no ocurrir ningún desastre. Es el caso del terremoto del océano Índico del 11 de abril de 2004, de magnitud de momento 8.9, con epicentro ubicado a unos 300 Km al sur oeste de la población indonesia de Aceh. Este evento, que ocupa el décimo tercer lugar en la lista de los terremotos más fuertes registrados a nivel mundial, resultó en un total de 10 personas fallecidas, 7 heridas y algunas afectaciones moderadas y leves en viviendas en Indonesia y Sri Lanka. Si bien sus consecuencias no dejan de ser importantes, se evidencia el hecho que, de haber ocurrido más cerca a la costa de Indonesia, podría fácilmente haberse repetido una tragedia regional como la del 26 de diciembre de 2004 tras la ocurrencia del sismo de Sumatra-Andamán.

Es claro entonces que la ocurrencia de los terremotos no es por si misma suficiente para la ocurrencia de los desastres. La existencia de construcciones e infraestructura expuesta a la amenaza, así como su vulnerabilidad inherente, es en definitiva lo que condiciona el desastre. En conclusión, como lo hace notar claramente el informe de 1993 de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, “los desastres no son naturales”.

El crecimiento de los asentamientos humanos deriva inevitablemente en exponer las construcciones e infraestructura al potencial efecto destructivo de los terremotos, en regiones con actividad sísmica importante. Si bien no es adecuado restringir el desarrollo de las comunidades, tampoco lo es exponerlas deliberadamente a futuros desastres. Por lo tanto, el proceso de desarrollo de las comunidades debe incorporar de manera consiente el riesgo que se deriva de las actividades humanas y maneras para gestionarlo.

La gestión del riesgo comprende todo el conjunto de acciones que pueden ser ejecutadas con el fin de reducir el impacto negativo de los desastres en el desarrollo humano. Se trata entonces de una estrategia de desarrollo que debe ser concebida desde las esferas más altas de la administración pública y trascender a todos los niveles institucionales y territoriales de un país. Diversas son las acciones que hacen parte de una adecuada gestión del riesgo, desde la planificación del territorio, hasta la creación de mecanismos de protección financiera para el estado, pasando por la definición de códigos de construcción, la creación de sistemas de alerta y la preparación para la atención a emergencias. Todas estas son igualmente importantes dado que atienden diferentes niveles de riesgo. Sin embargo, el primer paso para una correcta gestión del riesgo es identificarlo y cuantificarlo. El conocimiento del riesgo es entonces un componente fundamental dentro del desarrollo sostenible.

Para conocer el riesgo deben conocerse sus componentes: la amenaza, los elementos expuestos y su vulnerabilidad. La amenaza se refiere a la ocurrencia de un fenómeno natural, como los terremotos, y la violencia con que impacta una región específica. Los elementos expuestos son el conjunto de bienes o activos que se encuentran expuestos a la amenaza y pueden llegar a sufrir

daños que deriven en pérdidas económicas o afectación a la población. Por último, la vulnerabilidad es esa medida de susceptibilidad a sufrir daño que tienen los elementos expuestos, tras la manifestación de la amenaza en su ubicación.

La evaluación del riesgo resulta entonces de la combinación de sus tres componentes. Si bien existen varias propuestas sobre como evaluar y cuantificar el riesgo, se destaca la metodología de análisis probabilista dado que permite incorporar las incertidumbres asociadas a la evaluación de la amenaza y la vulnerabilidad, dándole un tratamiento racional al problema. Dentro de esta metodología, es común calcular la pérdida en términos económicos debido a sus directas aplicaciones en la ciencia actuarial y el mercado de seguros y reaseguros, aunque puede aplicarse también dentro del dominio social y ambiental. Los terremotos se ajustan particularmente bien al uso de la metodología probabilista debido a las características catastróficas de los desastres que ocasionan: baja frecuencia de ocurrencia con grandes consecuencias.

En definitiva, la evaluación probabilista del riesgo sísmico tiene como objetivo estimar la distribución de probabilidad de la pérdida que puede presentarse en un conjunto de elementos expuestos, tras la ocurrencia de un terremoto. Es claro que esta evaluación no puede hacerse siguiendo metodologías estadísticas convencionales dado que la frecuencia de ocurrencia de los terremotos es muy baja, por lo cual no se cuenta con registros históricos de pérdida suficientes. La modelación probabilista permite entonces realizar pronósticos sobre los niveles futuros de pérdida, considerando la amenaza propia de la región de estudio y la incertidumbre en su estimación, así como la vulnerabilidad inherente de los elementos expuestos y su incertidumbre.

Ahora enfoquémonos en la amenaza sísmica. El análisis tradicional de amenaza sísmica se realiza de manera probabilista (PSHA por sus siglas en inglés Probabilistic Seismic Hazard Analysis), en el cual se determinan las tasas de excedencia de los parámetros de intensidad de movimiento (e.g. la aceleración máxima del terreno o las aceleraciones espectrales) en cada punto del territorio de análisis. Estas tasas de excedencia dan cuenta del número de veces por año que se espera se iguale o exceda una intensidad de movimiento particular en el sitio de interés.

Para realizar un análisis de amenaza probabilista, es fundamental la definición de funciones de atenuación que representen de manera adecuada los procesos de transformación que sufren las ondas sísmicas al transitar por la corteza terrestre. Estos procesos están asociados al gasto de la energía de movimiento principalmente por el avance y expansión del frente de onda y la anelasticidad del medio. Dentro de los avances recientes de la sismología moderna está la solución del espectro de amplitudes de Fourier (EAF) de aceleración en un medio continuo, por efecto de un rompimiento súbito de cortante puro en una dislocación con geometría conocida. Estos modelos están basados en formulaciones sismológicas clásicas, las cuales permiten definir la forma matemática de los desplazamientos de las fuentes cuando ocurre un sismo, así como el contenido de frecuencia que genera dicho movimiento, para diferentes mecanismos de dislocación. Es decir, es posible calcular, suponiendo un medio homogéneo e isotrópico y un semi-espacio infinito, la forma del EAF en cualquier parte de un territorio, conociendo la magnitud y localización del hipocentro de un terremoto particular.

Si bien son muchas las funciones de atenuación de movimiento fuerte disponibles en la literatura, cada una determinada a partir de información de una región particular y mediante suposiciones y consideraciones también particulares, no existe en la actualidad una metodología general de obtención de funciones de atenuación que sea aplicable en cualquier territorio que cuente con instrumentación sísmica adecuada y que esté basada en la solución teórica de las amplitudes espectrales. En esta tesis se propone el desarrollo de una metodología numérica para la calibración de un modelo de espectro de fuente a partir de información acelerográfica disponible. Esta metodología será aplicable a cualquier territorio donde se cuente con una muestra representativa de mediciones de movimiento sísmico.

Las funciones de atenuación determinan la intensidad de movimiento fuerte a nivel de los estratos

de roca firme cercanos a la superficie. No obstante, la presencia natural de materiales jóvenes no consolidados en forma de depósitos de suelo blando, implica la necesidad de conocer como es el comportamiento dinámico de estos materiales y como se modifica la intensidad de movimiento fuerte, desde la roca firme, hasta la cimentación de las estructuras. La respuesta dinámica de los depósitos blandos de suelo modifica significativamente, en amplitud y contenido frecuencial, las ondas sísmicas incidentes a nivel de roca firme. Este efecto está asociado al cambio de impedancias entre la roca firme y los estratos de suelo generalmente más blandos y menos competentes. La propagación vertical de las ondas de cortante por la estratigrafía local y el comportamiento típicamente no lineal de los estratos de suelo, inducen estas modificaciones en el movimiento fuerte superficial.

Si bien la respuesta dinámica de depósitos de suelo blando ha sido objeto de estudio desde hace más de 70 años, la investigación relacionada tomó fuerza con la ocurrencia del sismo de Michoacán, en México en 1985. En este terremoto se evidenció la importancia de los suelos blandos en la amplificación de las señales sísmicas incidentes en roca firme. Adicionalmente al sismo de México de 1985, varios terremotos han evidenciado la importancia de los efectos de sitio en la demanda sísmica final sobre las edificaciones y componentes de infraestructura. Se destacan los sismos de Kalamata, Grecia 1986; Armenia, URSS 1988; Loma Prieta, USA 1989; Filipinas 1990; Armenia, Colombia 1999; Chi-Chi, Taiwán 1999.

En grandes ciudades, en las cuales se agrupan un gran número de elementos expuestos, y en donde se concentra generalmente buena parte de la población, valor económico y fuerza productiva de los países, es especialmente importante el problema de los efectos de sitio. Es por eso que en las pasadas décadas, se han desarrollado estudios de microzonificación sísmica en varias ciudades alrededor del mundo. Estos estudios cuantifican el efecto de los suelos blandos que conforman la geología superficial de las ciudades, en la amplificación de la intensidad de movimiento fuerte, y usualmente definen coeficientes sísmicos de diseño para la construcción de edificaciones nuevas y la rehabilitación de las existentes.

La modelación de los efectos de sitio para ciudades, con fines por ejemplo de realizar estudios de microzonificación sísmica, deben considerar, como mínimo, los siguientes aspectos: la geometría de las formaciones geológicas superficiales que dan origen a los suelos blandos, la profundidad total del depósito, las propiedades geotécnicas estáticas y dinámicas de los suelos y su variación en profundidad y la amenaza sísmica a nivel de roca firme. De la operación adecuada de los aspectos mencionados es posible obtener estimaciones de la amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno. Es usual calcular la respuesta dinámica en sitios seleccionados dentro de la ciudad, para luego interpolar esos resultados y estimar la amenaza en toda la extensión geográfica de la ciudad. Si bien esta es una práctica adecuada, no existe en la actualidad una manera para determinar la respuesta dinámica en cualquier ubicación de la ciudad, sin recurrir a interpolaciones y sin que esto implique multiplicar los esfuerzos de recolección de información geotécnica.

En esta tesis se plantea el desarrollo de una metodología de evaluación de efectos de sitio en ciudades, que involucra los principales aspectos mencionados y que permite determinar la respuesta sísmica en cualquier ubicación dentro de la ciudad. La base de la metodología es un modelo geotécnico de respuesta y un modelo geométrico de la geología superficial, de manera que es posible construir estratigrafías sintéticas en cualquier ubicación y calcular su respuesta dinámica. El modelo de efectos de sitio que resulta de aplicar la metodología planteada, se vuelve particularmente interesante dentro de tres aspectos asociados a la gestión del riesgo sísmico: i) para el cálculo del riesgo, de manera que se incluyan los factores de amplificación del suelo en la evaluación de las pérdidas; ii) para la implementación de sistemas automáticos de estimación de daños post-terremoto, con fines de atención a emergencias, en los cuales se requiere conocer la distribución de las intensidades de movimiento fuerte en toda la ciudad (shakemap); y iii) para adelantar estudios de microzonificación sísmica que regulen el diseño y construcción de edificaciones sismo-resistentes.

En resumen, dentro del análisis de riesgo sísmico, la evaluación de la amenaza es uno de sus principales componentes, dado que, desde una perspectiva probabilista, provee las tasas de excedencia anuales de las intensidades de movimiento fuerte en el sitio o región de análisis, o alternativamente, provee un conjunto de eventos generados de manera estocástica que representan integralmente la amenaza del sitio o región de análisis. Esta tesis aporta elementos metodológicos para la modelación, cálculo y calibración de parámetros fundamentales dentro del análisis de la amenaza sísmica y en consecuencia, de la evaluación probabilista del riesgo. Los parámetros en los que se centra este trabajo son: i) la atenuación del movimiento fuerte y ii) los efectos de sitio.

Este documento presenta la memoria de desarrollo de: (i) una metodología para la calibración numérica de funciones de atenuación basadas en la solución del EAF (espectro de fuente), usando como base de calibración la información acelerográfica disponible en cualquier territorio y (ii) una metodología de evaluación de efectos de sitio basada en la definición de un modelo geológico tridimensional y la construcción de estratigrafías sintéticas para el análisis de la respuesta dinámica unidimensional.

Los métodos desarrollados en esta tesis son aplicados a los casos de estudio de Colombia y su ciudad capital, Bogotá. Estos casos de estudio pretenden demostrar la aplicabilidad de las metodologías propuestas y sus aplicaciones prácticas. Para tal fin, se desarrollaron funciones de atenuación para el territorio colombiano, junto con un modelo detallado de efectos de sitio para Bogotá, siguiendo lo propuesto en esta tesis.

1.2 OBJETIVOS

Esta tesis pretende aportar en la evaluación de la amenaza sísmica haciendo uso de representaciones avanzadas de la misma y enfocada al análisis de riesgo por terremoto. Esto con el fin de dar un primer paso hacia la construcción de modelos de amenaza sísmica más detallados, que reflejen adecuadamente las condiciones particulares de la región en donde son aplicados y de esta manera aportar en la definición de modelos de riesgo sísmico más acertados, que permitan reducir las incertidumbres asociadas a la evaluación de la amenaza y, por lo tanto, obtener estimaciones de pérdidas más confiables. Con este fin, se definieron los siguientes objetivos:

1. Desarrollo de una metodología para la calibración numérica de funciones de atenuación basadas en formulaciones del espectro de fuente radiado, usando como base de calibración la información acelerográfica disponible en cualquier territorio.
2. Calibración de funciones de atenuación compatibles con el entorno sismo tectónico de Colombia, haciendo uso de la información acelerográfica oficial del país.
3. Desarrollo de una metodología de evaluación de efectos de sitio basada en la definición de un modelo geológico tridimensional y la construcción de estratigrafías sintéticas para el análisis de la respuesta dinámica unidimensional.
4. Construcción de un modelo de respuesta dinámica de suelos para Bogotá, con tres aplicaciones directas:
 - a. Funciones de transferencia del espectro de respuesta, espacialmente distribuidas, para el análisis del riesgo sísmico.
 - b. Generación de shakemaps con fines de respuesta a emergencias por terremoto.
 - c. Microzonificación sísmica y espectros elásticos de diseño sismo-resistente para edificaciones.

1.3 CONTENIDO DE LA TESIS

La memoria se ha estructurado en 5 capítulos. El segundo capítulo presenta el estado del conocimiento en evaluación probabilista del riesgo sísmico y de la amenaza sísmica, con el fin de poner en contexto el desarrollo de los trabajos. En este capítulo se dan los lineamientos teóricos

de la evaluación del riesgo así como la definición matemática de sus principales métricas. Se hace énfasis en la necesidad de representar la amenaza mediante un conjunto de escenarios estocásticos, con fines de la evaluación probabilista del riesgo. Se presenta entonces la amenaza sísmica dentro del contexto de la evaluación de pérdidas, así como los pasos requeridos para su evaluación. Finalmente se detalla el estado del arte dentro de los componentes de la amenaza sísmica, especialmente para aquellos en los que se enfoca esta tesis (atenuación del movimiento fuerte y efectos de sitio).

En el tercer capítulo se propone un procedimiento numérico para la calibración de un modelo de espectro de fuente, para obtener la combinación óptima de parámetros sismológicos con el fin de calcular funciones de atenuación no sesgadas en términos de la aceleración espectral en roca firme, usando los registros acelerográficos disponibles como objetivo de calibración. El modelo de espectro de fuente es usado para calcular el espectro radiado de aceleración para diferentes momentos sísmicos y distancias hipocentrales, combinando modelos de fuente puntual (campo lejano) y fuente finita (campo cercano). El valor esperado de la aceleración máxima del terreno se calcula del espectro radiado usando teoría de vibraciones aleatorias. Un algoritmo genético es implementado para buscar los parámetros sismológicos del modelo de espectro de fuente que mejor se ajusten a los registros acelerográficos disponibles. Esta metodología puede ser aplicada en cualquier región con una cantidad estadísticamente significativa de registros acelerográficos. La metodología propuesta es empleada para generar funciones de atenuación compatibles con el entorno sísmo tectónico de Colombia, usando 206 acelerogramas como objetivo de calibración. Las funciones de atenuación obtenidas son comparadas con las usadas en el más reciente estudio de amenaza sísmica de Colombia. La comparación muestra que las funciones de atenuación obtenidas en esta tesis presentan el menor sesgo, mostrando un ajuste razonable entre ellas y los acelerogramas disponibles.

En el cuarto capítulo se presenta una metodología para la evaluación de efectos de sitio en ciudades, la cual está basada en la geometría de las formaciones geológicas que dan origen a los suelos blandos. La metodología permite calcular la respuesta dinámica del suelo en cualquier punto dentro de una ciudad. Se detallan los diferentes pasos que componen la metodología propuesta, los cuales, en resumen, tienen que ver con: la evaluación de la amenaza sísmica a nivel de roca firme, la definición de la geometría de los contactos geológicos, la definición de la geometría de las condiciones de borde, la información geotécnica requerida, la definición de tipos de suelo de análisis, la definición de una malla de cálculo, la construcción de estratigrafías sintéticas y la evaluación de la respuesta dinámica sobre esas estratigrafías. La metodología propuesta es aplicada en la ciudad de Bogotá con tres objetivos principales: i) la obtención de funciones de transferencia del espectro de respuesta que sean útiles para el análisis de riesgo, ii) la generación de shakemaps con fines de respuesta a emergencias, y iii) la microzonificación sísmica de la ciudad y obtención de espectros elásticos de diseño sísmo-resistente.

El quinto capítulo presenta las principales conclusiones del trabajo. Las metodologías acá presentadas son un primer paso hacia la construcción de modelos de amenaza sísmica más detallados, que reflejen adecuadamente las condiciones particulares de la región en donde son aplicados. Esto deriva en la definición de modelos de riesgo sísmico más acertados, que permitan reducir las incertidumbres asociadas a la evaluación de la amenaza y, por lo tanto, obtener estimaciones de pérdidas más ajustadas con el fin de proveer a los tomadores de decisiones con información confiable y segura para la adecuada gestión del riesgo sísmico.

Finalmente, una serie de anexos complementan algunos aspectos presentados dentro de este documento. El Anexo A presenta las tablas de atenuación resultantes de la calibración del modelo de espectro de fuente a los datos acelerográficos de Colombia. Estas tablas de atenuación se incluyen con el fin de permitir el uso directo de los resultados de esta tesis, dado que el modelo de atenuación propuesto no tiene una representación matemática de fácil aplicación. El Anexo B contiene una serie de mapas de amenaza sísmica calculados para el territorio colombiano, haciendo uso del modelo de atenuación de movimiento fuerte propuesto en esta tesis. El Anexo

C presenta el procedimiento de descomposición de Cholesky de un sistema lineal de ecuaciones, el cual se aplica en la generación de números aleatorios correlacionados para la simulación de estratigrafías sintéticas dentro del modelo de efectos de sitio. El Anexo D contiene la descripción del método de la matriz propagadora de Thompson-Haskell, el cual se emplea para para evaluación de la respuesta elástica unidimensional de los depósitos de suelo estratificados, dentro de la metodología de análisis no-lineal (lineal equivalente) implementada en el modelo de efectos de sitio. El Anexo E incluye una breve descripción del software Strong Motion Analyst, desarrollado durante la ejecución del trabajo de tesis, y el cual implementa la metodología de calibración del modelo de espectro de fuente, así como la obtención de funciones de atenuación con los resultados de esta tesis, o para un modelo sismológico personalizado. Por último, el Anexo F presenta una breve descripción del software Seismic Microzonation Studio, desarrollado también durante la ejecución de la tesis, el cual permite construir el modelo de efectos de sitio siguiendo la metodología propuesta en este documento.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En esta sección se describe de manera general el estado del conocimiento en la evaluación del riesgo y la amenaza sísmica.

2.1 RIESGO SÍSMICO

Como se mencionó anteriormente, la evaluación probabilista del riesgo sísmico tiene como objetivo estimar la distribución de probabilidad de la pérdida económica que puede presentarse en un conjunto de elementos expuestos, dada la ocurrencia de un terremoto particular. El riesgo se deriva de la combinación de tres componentes principales:

1. *La amenaza*, la cual se representa por medio de una colección de escenarios, generados de manera estocástica, los cuales representan de manera integral, y en términos de probabilidad, la amenaza sísmica de una región. Cada escenario tiene asociada una frecuencia de ocurrencia y contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia.
2. *Los elementos expuestos*, que son el conjunto de bienes o activos (construcciones) susceptibles de sufrir daños y producir pérdidas, dada la ocurrencia de los escenarios que definen la amenaza. Estos elementos se caracterizan por su ubicación geográfica, su valor de reposición y la clase estructural a la que pertenecen.
3. *La vulnerabilidad*, la cual es una característica intrínseca de los elementos expuestos y que caracteriza el comportamiento de la construcción durante la ocurrencia de un sismo. Está definida mediante curvas de vulnerabilidad, las cuales relacionan los momentos de probabilidad (valor esperado y varianza) de la pérdida en el elemento expuesto, como función de la intensidad de movimiento fuerte que ocurra en su ubicación.

2.1.1 LA AMENAZA COMO COMPONENTE DEL ANÁLISIS DE RIESGO

La amenaza sísmica se mide usando su frecuencia de ocurrencia y su severidad, esta última siendo caracterizada a través de parámetros de movimiento fuerte calculados en cada ubicación geográfica. La evaluación de riesgos se basa en la frecuencia histórica de ocurrencia de los terremotos y la intensidad de movimiento que producen. Una vez que los parámetros que caracterizan la ocurrencia del fenómeno se definen desde un punto de vista físico, es necesario generar un conjunto de escenarios estocásticos que, analíticamente hablando, permiten definir todas las formas posibles en que la amenaza sísmica puede manifestarse en la región de análisis, en función de su frecuencia y severidad.

La amenaza se caracteriza entonces, en cada punto de análisis en el territorio de estudio, a través de la distribución de la probabilidad de la medida de intensidad asociada a su severidad, definida en términos de su valor central y su medida de dispersión, la cual da cuenta de la incertidumbre asociada con la ocurrencia de dicho grado de intensidad en el territorio. Es importante señalar que, en lo que respecta a la evaluación del riesgo sísmico, la dispersión es altamente relevante para la correcta cuantificación de las pérdidas, dado que un mismo escenario puede causar una correlación de pérdida, es decir, afectación simultánea a varios elementos expuestos en un área extensa.

La razón por la cual debe representarse la amenaza como una colección de escenarios está relacionada directamente con la evaluación del riesgo. Es representación permite aplicar la metodología probabilista de análisis de riesgo de manera directa, y permite incluir de manera racional las incertidumbres asociadas a la amenaza.

Como se mencionó anteriormente, el objetivo del análisis probabilista del riesgo es la caracterización, también probabilista, de las pérdidas esperadas sobre un conjunto de elementos expuestos, dada la ocurrencia de terremotos. Dado que hay incertidumbre en la estimación de la pérdida, esta es entonces modelada como una variable aleatoria. En términos generales, interesa conocer lo siguiente acerca de la pérdida:

- El universo de todas las pérdidas posibles, es decir, el dominio de la variable aleatoria que describe la pérdida.
- La función de densidad de probabilidad de la pérdida, la cual está definida dentro del dominio de la variable.

En términos generales, un evento de pérdida A , definido dentro del universo de todas las pérdidas posibles (o espacio de muestreo) S , se puede representar en un diagrama de conjuntos como se muestra en la Figura 2-1. El evento A es un subconjunto de S , el cual es definido de manera totalmente arbitraria, es decir, su definición depende exclusivamente de a que pregunta se quiere contestar. En este sentido, el evento A puede estar definido, por ejemplo, como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, o como el conjunto de pérdidas menores a 100 millones, o incluso como el conjunto de pérdidas entre 10 y 100 millones. Esto significa que A es definido por el tomador de decisiones, en función del tipo de decisiones que quiera tomar. Ahora bien, la definición de A en sí misma no es de interés; interesa conocer la probabilidad de A , denotada como $P(A)$. Entonces si, por ejemplo, A está definido como el conjunto de pérdidas mayores a 10 millones, lo que realmente interesa conocer es la probabilidad de que la pérdida sea mayor a 10 millones, es decir $P(A)$.

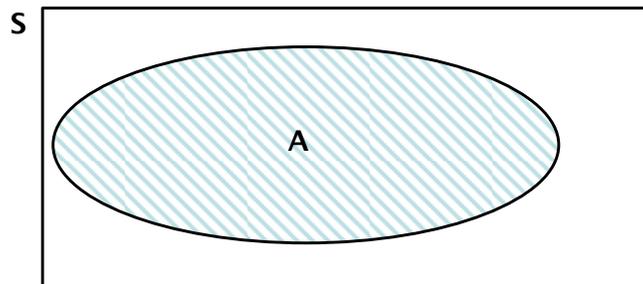


Figura 2-1. Representación gráfica de un evento arbitrario A dentro del espacio de muestreo de pérdidas S .

Dado que los eventos A son definidos de manera arbitraria, resulta inconveniente realizar el análisis de riesgo para un conjunto A específico. Se requiere encontrar una manera mediante la cual sea posible determinar $P(A)$ para cualquier evento A de interés. Esto se logra subdividiendo el espacio de muestreo S en un número finito de eventos base conocidos, B (Figura 2-2).

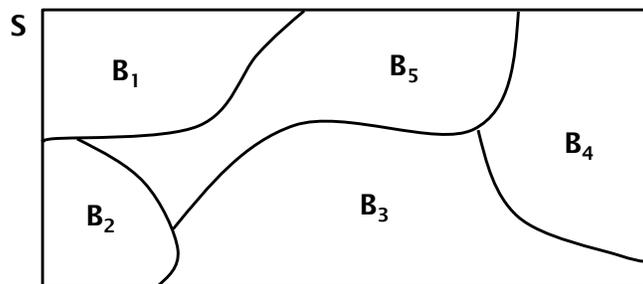


Figura 2-2. Subdivisión del espacio de muestreo S en eventos base B .

Los eventos base B deben cumplir las siguientes características:

- Ser *mutuamente excluyentes*. En términos matemáticos esto significa que los conjuntos nunca se intersectan, es decir, su intersección es el conjunto vacío. En términos del análisis de riesgo esto quiere decir que los eventos de pérdida B no pueden ocurrir simultáneamente.
- Ser *colectivamente exhaustivos*. En términos matemáticos esto implica que la unión de todos los conjuntos B es igual al espacio de muestreo S . En términos del análisis de riesgo esto significa que los eventos B , en conjunto, representan de manera integral el universo de todas las pérdidas posibles.

Ahora bien, para poder determinar $P(A)$, para un evento A cualquiera, hacemos uso de las intersecciones que se producen entre el evento A y los eventos base B (Figura 2-3).

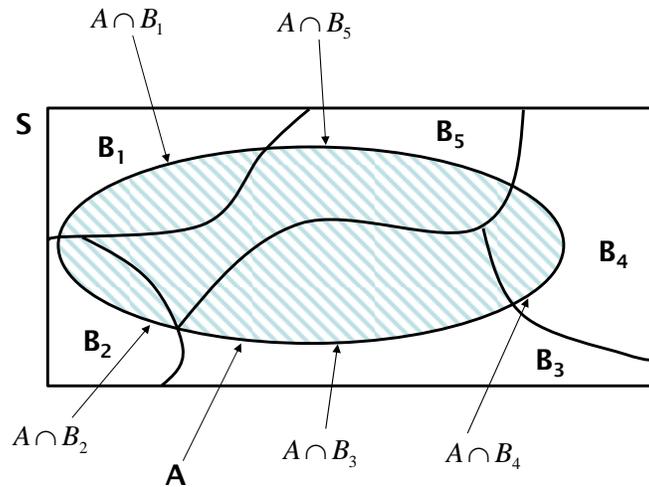


Figura 2-3. Intersecciones entre el evento A y los eventos base B .

Dado que el evento A se puede definir como la unión de sus intersecciones con los eventos base B , y recurriendo al tercer axioma de la teoría de la probabilidad¹, podemos definir a $P(A)$ como la suma, para todos los eventos base B , de la probabilidad de ocurrencia de las intersecciones:

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A \cap B_j) \quad (\text{Ec. 2-1})$$

Para cualquier evento base B_j , definimos la probabilidad $P(A|B_j)$ como la probabilidad condicional de A , dado que B_j ha ocurrido. Esta probabilidad condicional está dada por:

$$P(A|B_j) = \frac{P(A \cap B_j)}{P(B_j)}, \quad P(B_j) \neq 0 \quad (\text{Ec. 2-2})$$

Nótese que se asume que B_j ha ocurrido. Esto significa que el espacio de muestreo S es ahora reemplazado por un nuevo espacio de muestreo, B_j , y $P(A|B_j)$ no es más que la probabilidad de A en ese nuevo espacio. De esta manera, reemplazando la Ecuación 2 en la Ecuación 1, llegamos a la solución de $P(A)$, que no es más que la definición del teorema de la probabilidad total:

¹ El tercer axioma de la probabilidad establece que, para una colección contable de eventos mutuamente excluyentes, la probabilidad de su unión es igual a la suma de las probabilidades individuales.

$$P(A) = \sum_{j=1}^n P(A | B_j) \cdot P(B_j) \quad (\text{Ec. 2-3})$$

Esta ecuación indica la probabilidad de ocurrencia de cualquier evento de pérdida sobre el espacio S .

Haciendo uso de la Ecuación 3 podemos calcular la probabilidad de cualquier evento A . La Tabla 2-1 muestra, a modo de ejemplo, tres eventos A arbitrarios y su medida de probabilidad calculada con la Ecuación 3.

Tabla 2-1. Eventos arbitrarios A y su medida de probabilidad.

Eventos arbitrarios A	Probabilidad
Pérdidas mayores a 10 millones	$P(p > 10) = \sum_{j=1}^n P(p > 10 B_j) \cdot P(B_j)$
Pérdidas menores a 100 millones	$P(p < 100) = \sum_{j=1}^n P(p < 100 B_j) \cdot P(B_j)$
Pérdidas entre 10 y 100 millones	$P(p > 10 \cap p < 100) = \sum_{j=1}^n P(p > 10 \cap p < 100 B_j) \cdot P(B_j)$

En resumen, dentro del contexto del análisis de riesgo, la definición de los eventos de interés A es totalmente arbitraria, por lo tanto su probabilidad $P(A)$ se calcula como función de la distribución de probabilidad de la pérdida para cada evento base B_j . Esto implica que los eventos base B no pueden ser definidos de manera arbitraria.

En análisis de riesgo, la colección de eventos base B se construye a partir de la definición de escenarios de amenaza. Se define entonces una colección de escenarios de amenaza, usualmente generados de manera estocástica, los cuales representan de manera integral todas las formas como la amenaza puede manifestarse en el territorio de análisis. Estos escenarios deben cumplir las siguientes características:

- Ser mutuamente excluyentes.
- Ser colectivamente exhaustivos.
- Admitir una medida de probabilidad temporal, generalmente conocida como su frecuencia anual de ocurrencia.
- Admitir una medida de probabilidad espacial mediante la definición de su medida de intensidad como una variable aleatoria.

La medida de intensidad a la que se hace referencia corresponde a la variable física que representa la severidad del fenómeno en el territorio de análisis. Para el caso de los terremotos, las medidas de intensidad comúnmente usadas son las amplitudes máximas del movimiento fuerte en el terreno (PGA, PGV, PGD), así como las ordenadas del espectro de respuesta (S_a).

Dado que el número de escenarios que representan de manera integral la amenaza sísmica en un territorio cualquiera puede ser de decenas o centenas de miles, Torres et.al. (2013) proponen el uso de un formato computacional llamado .AME, el cual es un formato raster multicapa diseñado específicamente para amenazas naturales, y que permite un manejo adecuado, en términos computacionales, de la información asociada a los escenarios.

2.1.2 ELEMENTOS EXPUESTOS

En general, puede definirse como elemento expuesto cualquier objeto, geográficamente referenciado, que sea susceptible de sufrir algún tipo de afectación por causa de la ocurrencia de un evento de amenaza. Una vez identificado cada uno de los elementos expuestos, es necesario asignar como mínimo un valor económico de reposición, una ocupación humana y una definición de su vulnerabilidad.

Los elementos expuestos son fundamentales dentro del análisis de riesgo, debido a que comprenden los objetos sobre los cuales se evalúan las pérdidas, es decir, son la fuente de las pérdidas potenciales debido al hecho de estar expuestos a una amenaza y ser susceptibles de sufrir un daño. En términos matemáticos, los elementos expuestos proveen individualmente el valor absoluto máximo posible de la pérdida en su ubicación, así como los sumandos de la función de densidad de probabilidad de la pérdida de un escenario de amenaza. Es decir, son en primera medida el elemento integrador de la amenaza y la vulnerabilidad en su ubicación, y en segunda medida, el elemento integrador de las pérdidas totales para un escenario. Su adecuada caracterización es de gran importancia para la adecuada estimación de las pérdidas.

Adicionalmente, los elementos expuestos tienen implícito un componente asociado a la responsabilidad sobre las pérdidas. Si, por ejemplo, los elementos expuestos de un análisis de riesgo corresponden a centros públicos de salud, entonces las pérdidas causadas por la ocurrencia de fenómenos de amenaza serán responsabilidad de la institución de salud pública correspondiente. En caso que los elementos expuestos sean, por ejemplo, las viviendas de los estratos socio-económicos más bajos, estamos hablando de una responsabilidad fiscal del estado, dada la imposibilidad de los propietarios de dichas viviendas privadas de responder a la situación de desastre. Es por esto importante determinar la responsabilidad sobre las pérdidas directamente en la definición de los elementos expuestos. Por esta razón los elementos expuestos se agrupan en *portafolios*, los cuales permiten determinar de manera general dicha responsabilidad. Es posible entonces contar dentro de una misma evaluación del riesgo con portafolios de, por ejemplo, centros públicos de salud, centros educativos, viviendas, edificaciones institucionales, infraestructura vial, infraestructura de comunicaciones, etc. En definitiva deben definirse tantos portafolios como haya entidades o instituciones responsables sobre las pérdidas.

2.1.3 VULNERABILIDAD DE LOS ELEMENTOS EXPUESTOS

La vulnerabilidad de los elementos expuestos se caracteriza mediante curvas de vulnerabilidad, las cuales caracterizan el comportamiento de una construcción durante la ocurrencia de un terremoto. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de la pérdida (p) como función de la intensidad producida durante un escenario específico, es decir, condicional a la ocurrencia de un nivel de intensidad (s) en la ubicación del elemento expuesto. La pérdida p generalmente se entiende como la pérdida relativa al valor de reposición del elemento expuesto.

Estas funciones de vulnerabilidad se definen entonces mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno (ver Figura 2-4). La pérdida se asume típicamente como distribuida Beta, con su función de densidad de probabilidad dada como (Ordaz 2008),

$$f(p|s) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} p^{a-1}(1-p)^{b-1} \quad (\text{Ec. 2-4})$$

en donde Γ es la función Gamma y los parámetros a y b están dados por,

$$a = \frac{1 - (1 + c^2(p|s)) \cdot E(p|s)}{c^2(p|s)} \quad (\text{Ec. 2-5})$$

$$b = a \cdot \frac{1 - E(p|s)}{E(p|s)} \quad (\text{Ec. 2-6})$$

en donde $E(p|s)$ es el valor esperado de la pérdida y $c(p|s)$ es su coeficiente de variación, dada la intensidad de movimiento en el sitio. ($c(p|s) = \sigma(p|s)/E(p|s)$, en donde $\sigma(p|s)$ es la desviación estándar de la pérdida).

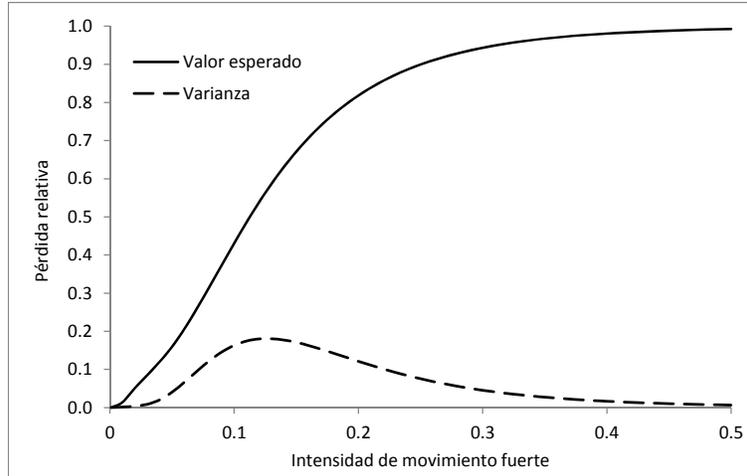


Figura 2-4. Ejemplo de una función de vulnerabilidad.

2.1.4 CÁLCULO DEL RIESGO

El riesgo se determina mediante la convolución entre la amenaza y la vulnerabilidad, en la ubicación ocupada por los elementos expuestos y para la totalidad de los mismos. Como se ha mencionado anteriormente, en el cálculo probabilista de las pérdidas la amenaza y la vulnerabilidad están representadas también de manera probabilista. La amenaza tiene una representación probabilista tanto temporal como espacial. La ocurrencia en el tiempo de los escenarios de amenaza se modela como un proceso de Poisson, lo que conlleva a modelar mediante una distribución de probabilidad exponencial el tiempo que transcurre entre los escenarios. Por otra parte, la medida de intensidad de movimiento fuerte en cada ubicación modela como una variable aleatoria con distribución Lognormal, definida por sus dos primeros momentos de probabilidad (su mediana y la desviación estándar del logaritmo natural). La vulnerabilidad se define también por medio de dos momentos de probabilidad los cuales define la distribución de probabilidad Beta asignada a la pérdida.

Las incertidumbres asociadas a la amenaza y a la vulnerabilidad son entonces definidas en su propia naturaleza; temporal y espacial para la amenaza y dependiente de la intensidad para la vulnerabilidad. De esta manera, el principal resultado del modelo es una distribución de probabilidad específica de la pérdida para cada escenario de riesgo. De acuerdo con el procedimiento analítico propuesto por Ordaz (2000), la función de densidad de probabilidad de la pérdida en el elemento j , condicional a la ocurrencia del escenario i , $f(p_j|E_i)$, se calcula como,

$$f(p_j | E_i) = \int_0^{\infty} f(p_j | s) f(s | E_i) ds \quad (\text{Ec. 2-7})$$

en donde el primer término de la integral tiene que ver con la vulnerabilidad ($f(p_j|s)$), la densidad de probabilidad de la pérdida dada una intensidad de movimiento s y la segunda parte tiene que ver con la amenaza ($f(s|E_i)$), la densidad de probabilidad de la intensidad de movimiento, dada la ocurrencia de un escenario).

La pérdida total del escenario i corresponde a la suma de todas las pérdidas individuales (p_j) de los elementos expuestos. Dado que los sumandos son variables aleatorias, debe usarse la aritmética correcta para determinar la pérdida del escenario i . La suma se hace sobre los momentos de probabilidad de las variables p_j como se indica a continuación.

$$E(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} E(p_j) \quad (\text{Ec. 2-8})$$

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} \text{cov}(p_k, p_j) \quad (\text{Ec. 2-9})$$

en donde $E(p|E_i)$ es el valor esperado de la pérdida del escenario i , $\sigma^2(p|E_i)$ es su varianza, NE es el número total de elementos expuestos, $E(p_j)$ es el valor esperado de la pérdida en el elemento j , $\sigma^2(p_j)$ es su varianza, y $\text{cov}(p_k, p_j)$ es la covarianza de la pérdida de dos elementos expuestos diferentes. Dado que es prácticamente imposible establecer con toda certeza la correlación de la pérdida entre dos elementos expuestos, se asume un coeficiente de correlación $\rho_{k,j}$ de 0.3. La ecuación 12 puede escribirse entonces como,

$$\sigma^2(p|E_i) = \sum_{j=1}^{NE} \sigma^2(p_j) + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ k < j}}^{NE-1} \sum_{j=2}^{NE} \rho_{k,j} \sigma(p_k) \sigma(p_j) \quad (\text{Ec. 2-10})$$

De esta manera queda completamente determinada, en términos de probabilidad, la pérdida asociada a la ocurrencia del escenario i .

El riesgo sísmico es comúnmente descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas* la cual especifica las frecuencias de ocurrencia de eventos en que se exceda un valor específico de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como *tasa de excedencia*, y se calcula de la siguiente manera,

$$\nu(p) = \sum_{i=1}^N \Pr(P > p|E_i) \cdot F_A(E_i) \quad (\text{Ec. 2-11})$$

en donde $\nu(p)$ es la tasa de excedencia de la pérdida p , N es el número total de escenarios de amenaza, $F_A(E_i)$ es la frecuencia anual de ocurrencia del escenario i , y $\Pr(P > p|E_i)$ es la probabilidad de que p sea excedida dado que ocurrió el escenario i . La suma cubre todos los escenarios de amenaza que pueden generar pérdidas. El inverso de $\nu(p)$ es el periodo de retorno de la pérdida p , identificado como Tr . La curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar, en términos de probabilidad, el proceso de ocurrencia de las pérdidas asociadas a terremotos. Nótese que la ecuación 2-11 es, en esencia, igual a la ecuación 2-3.

Es importante hacer notar que la curva de excedencia de pérdidas no tiene incertidumbre. Es común asociar los resultados de un modelo probabilista de riesgo a un nivel de confianza o de variabilidad de los mismos. Pues bien, las tasas de excedencia calculadas en un modelo probabilista de riesgo consideran directamente la incertidumbre en las pérdidas, por lo cual dichas

tasas de excedencia no pueden tener una incertidumbre o variabilidad propia. Esto debido a que, en términos matemáticos, son una medida de probabilidad calculada para una cantidad de pérdida específica. En el contexto de la modelación del riesgo, la pérdida es la variable aleatoria, no las tasas anuales de excedencia.

2.1.5 MÉTRICAS DEL RIESGO

A partir de la curva de excedencia de pérdidas es posible obtener diversas métricas del riesgo sísmico, las cuales son útiles para diferentes fines dentro de la toma de decisiones y la gestión del riesgo. Estas métricas pretenden proporcionar una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o unos pocos números, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por escenarios o la curva de excedencia de pérdidas completa.

2.1.5.1 La pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. En un esquema simple de seguro, la PAE sería la prima pura anual justa. Se calcula como la integral de la curva de excedencia de pérdidas,

$$PAE = \int_0^{\infty} v(p) dp \quad (\text{Ec. 2-12})$$

Desde el conjunto de evento de pérdida, puede determinarse la PAE como,

$$PAE = \sum_{i=1}^N E(P|E_i) F_A(E_i) \quad (\text{Ec. 2-13})$$

La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdida, de la ocurrencia de los escenarios de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Se considera como el indicador más robusto de riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de generación de pérdidas en un solo número, sino por ser insensible a la incertidumbre, debido a que determina la esperanza matemática de las pérdidas en una base anual, y no su incertidumbre.

2.1.5.2 La pérdida máxima probable (PML)

Se denota PML por sus siglas en inglés (Probable Maximum Loss). Corresponde a una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno grande. Como se indicó anteriormente, el periodo de retorno es el inverso de la tasa de excedencia de pérdidas,

$$Tr(p) = \frac{1}{v(p)} \quad (\text{Ec. 2-14})$$

En realidad la PML es una curva que relaciona las pérdidas a su correspondiente periodo de retorno. No obstante, es práctica común definir la PML como un único valor. La selección del periodo de retorno de la PML depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. Por ejemplo, en la industria aseguradora el periodo de retorno de la PML se toma usualmente entre 200 y 1500 años. Mayores detalles sobre el significado y aplicación de la PML pueden encontrarse en Marulanda (2013).

2.1.5.3 La probabilidad de quiebra (P_Q)

Asumiendo que el proceso de ocurrencia de las pérdidas en el tiempo sigue un proceso de Poisson, es posible determinar la probabilidad de alcanzar o exceder un nivel de pérdida dado, en un periodo de exposición particular,

$$\Pr(P > p)_T = 1 - e^{-\nu(p)T} \quad (\text{Ec. 2-15})$$

en donde $\Pr(P > p)_T$ es la probabilidad de excedencia de la pérdida p , en el lapso de tiempo T (dado en años). Si la pérdida p corresponde a la PML, se obtiene lo que se conoce como la probabilidad de quiebra (P_Q), la cual no es más que la probabilidad de exceder la PML en un lapso de tiempo T .

$$P_Q = 1 - e^{-T/\text{Tr}(PML)} \quad (\text{Ec. 2-16})$$

2.1.5.4 Otras métricas del riesgo

Como se mencionó anteriormente, la curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar de manera rigurosa la ocurrencia de pérdidas. Es posible determinar directamente de $\nu(p)$ otras métricas del riesgo que pueden ser relevantes para la toma de decisiones. Aquí se presentan algunos ejemplos.

La función de densidad de probabilidad de la pérdida durante el próximo evento, o un evento tomado al azar, se obtiene como,

$$f(p) = -\frac{1}{\nu(0)} \frac{d\nu(p)}{dp} \quad (\text{Ec. 2-17})$$

La probabilidad de exceder un nivel de pérdida particular tras la ocurrencia del próximo evento, o un evento tomado al azar, se puede calcular como,

$$\Pr(P > p) = \frac{\nu(p)}{\nu(0)} \quad (\text{Ec. 2-18})$$

La función de densidad de probabilidad del tiempo hasta la ocurrencia del próximo evento (t) es exponencial y se define como,

$$f(t) = \nu(p)e^{-\nu(p)t} \quad (\text{Ec. 2-19})$$

El número de eventos (N) que ocurrirán en un lapso de tiempo T , que igualan o exceden la pérdida p , se distribuye Poisson, por lo cual la probabilidad que ese número sea igual a n es,

$$\Pr(N = n) = \frac{(\nu(p)T)^n e^{-\nu(p)T}}{n!} \quad (\text{Ec. 2-20})$$

2.2 AMENAZA SÍSMICA

El peligro que induce la actividad sísmica sobre regiones aledañas a poblaciones o asentamientos humanos, ha derivado en la necesidad de establecer parámetros que definan el nivel de la amenaza y metodologías generales que permitan estimar dichos parámetros.

Los parámetros que definen el nivel de peligro en un modelo de amenaza sísmica se conocen como *parámetros de movimiento fuerte*. Estos parámetros definen la intensidad del movimiento en el sitio de análisis. Su estimación se hace por medio de ecuaciones conocidas como *funciones de atenuación*, las cuales dependen principalmente de la distancia de la fuente sismogénica al sitio, la magnitud sísmica, y el tipo de mecanismo focal de ruptura.

2.2.1 PARÁMETROS DE MOVIMIENTO FUERTE

Los parámetros de movimiento fuerte permiten definir la amenaza en un área en particular, por lo cual se constituyen en el objetivo primordial de los estudios y análisis de amenaza sísmica. El movimiento del terreno se caracteriza por tener variables representativas tanto en amplitud, como frecuencia y duración. Algunos parámetros logran caracterizar el movimiento en uno de estos componentes, mientras otros pueden caracterizar los tres. Dada la complejidad asociada al tránsito de las ondas sísmicas por la corteza terrestre, resulta imposible reproducir perfectamente el movimiento del terreno en un sitio determinado, por muy complejo que sea el modelo que se adopte. De acuerdo con esto, la elección del modelo de estimación del movimiento fuerte debe hacerse de acuerdo con los alcances del estudio que se realice. La Tabla 2-2 presenta algunos de los parámetros de movimiento más empleados en ingeniería sísmica, indicando su capacidad de representar alguna de sus características primordiales.

Tabla 2-2. Capacidad de los parámetros de movimiento fuerte para representar las características del movimiento (Kramer, 1996).

Parámetro de movimiento fuerte		Característica del movimiento fuerte		
		Amplitud	Contenido frecuencial	Duración
Aceleración, velocidad o desplazamiento máximo	<i>PGA, PGV, PGD</i>	x		
Espectro de Fourier	<i>EF</i>	x	x	x
Espectro de respuesta	<i>ER</i>	x	x	
Duración	<i>T_d</i>			x

La manera más sencilla y común de definir un movimiento fuerte es a partir de un *acelerograma*. Un acelerograma es simplemente una representación gráfica de aceleración contra tiempo. Esta gráfica contiene toda la información necesaria asociada al movimiento, como por ejemplo los valores de amplitud máxima, contenido frecuencial y duración. Esta señal de aceleración puede ser convertida a velocidad o desplazamiento, mediante la integración numérica directa del registro. Los acelerogramas se registran en estaciones acelerográficas, provistas de sensores en tres ejes ortogonales. Uno de esos ejes se hace coincidir con la vertical, mientras los otros dos se hacen coincidir con las líneas NS y EO respectivamente.

2.2.2 ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE MOVIMIENTO FUERTE

Uno de los principales componentes en un análisis de amenaza sísmica es el estudio de las funciones de atenuación de los parámetros de intensidad que caracterizan el movimiento. La mayor parte de la energía de un sismo se libera en forma de ondas de esfuerzo, que se desplazan por la corteza de la tierra. Dado que la magnitud está relacionada con la energía liberada en el foco del sismo, la intensidad de dichas ondas se encuentra relacionada con la magnitud. Los efectos de la magnitud son principalmente: el aumento en la amplitud de la intensidad, la variación en el contenido frecuencial y el aumento en la duración de la vibración.

A medida que las ondas se desplazan por el medio rocoso, son absorbidas parcial y progresivamente por los materiales por los que transitan. Como resultado, la energía por unidad de volumen varía en función de la distancia. Dado que la intensidad está relacionada con la energía de las ondas, se encuentra también relacionada con la distancia. Muchas funciones de atenuación relacionan la intensidad en términos de algún parámetro de movimiento fuerte, con una de las distancias presentadas en la Figura 2-5, las cuales caracterizan de diferente manera el origen del movimiento vibratorio.

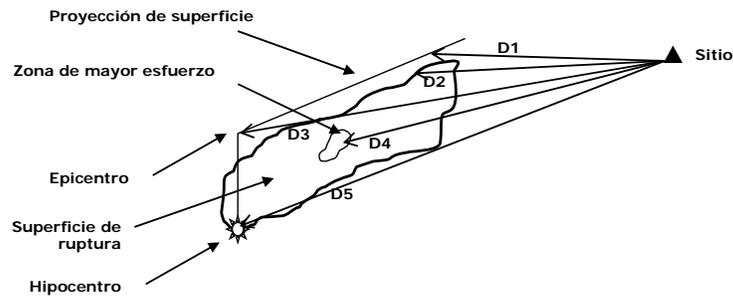


Figura 2-5. Ejemplo de varias medidas de distancia usadas en funciones de atenuación. (Kramer, 1996)

La distancia D1 representa la distancia del sitio a la proyección en superficie del plano de falla. D2 es la distancia a la superficie de falla. D3 es la distancia epicentral. D4 corresponde a la distancia hasta la zona en la superficie de falla que liberó una mayor cantidad de energía, la cual no necesariamente corresponde con el hipocentro. Y por último D5 es la distancia hipocentral.

La aceleración máxima (PGA) es el parámetro más empleado en los estudios de amenaza sísmica para representar el movimiento del terreno, por lo cual se han propuesto diversos modelos de atenuación de este parámetro con la distancia y las propiedades del medio transmisor. A medida que se cuenta con mayor cantidad de registros de sismos, es posible refinar las funciones de atenuación, lo que deriva en una frecuente publicación de correlaciones nuevas y más refinadas. El nivel de refinamiento aumenta a medida que se desarrollan métodos de procesamiento más avanzados. Un sinnúmero de funciones de atenuación de aceleración máxima han sido desarrolladas a nivel mundial en las últimas 4 décadas, dada la alta relevancia de este insumo dentro de los análisis de amenaza sísmica.

Análisis similares a los realizados para la aceleración máxima del terreno han derivado en la obtención de relaciones de atenuación de la velocidad máxima horizontal (PGV) y el desplazamiento máximo (PGD), a partir de registros acelerográficos integrados.

Dada la importancia que ha tenido el espectro de respuesta dentro de la práctica de la ingeniería sísmica, se han desarrollado relaciones de atenuación para obtener las ordenadas del espectro de manera directa. Esto puede realizarse a partir de regresiones sobre espectros calculados a registros acelerográficos de zonas con buena instrumentación sísmica.

Alternativamente, se puede calibrar un modelo teórico de las características físicas de una fuente, medio de tránsito de ondas, y comportamiento de la respuesta en el sitio, para predecir la forma del espectro de amplitudes de Fourier (EAF). A partir de la solución del rompimiento instantáneo sobre una superficie esférica en un medio perfectamente elástico, es posible estimar las amplitudes del espectro de Fourier.

La duración del movimiento aumenta al aumentar la magnitud sísmica. Sin embargo, la variación con la distancia depende de cómo se defina el parámetro. Para duraciones basadas en amplitudes de aceleración absoluta, como la determinada con el umbral de duración, tienden a disminuir a

medida que aumenta la distancia, dado que la aceleración absoluta disminuye de la misma manera. Duraciones basadas en aceleraciones relativas se incrementan con la distancia, derivando en duraciones muy largas aun cuando las amplitudes sean muy pequeñas.

2.2.3 EVALUACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA SÍSMICA

El cálculo de la amenaza sísmica emplea las definiciones y métodos presentados anteriormente, para establecer el nivel de peligro esperado en un sitio o zona determinada, bajo la influencia de la actividad sísmica de fuentes aledañas. Históricamente los ingenieros, geólogos y sismólogos se han preocupado por desarrollar metodologías de cálculo que representan cada vez mejor el comportamiento de las fuentes, el tránsito de las ondas dentro del medio rocoso, la respuesta de los suelos y la respuesta estructural en el sitio de interés.

En las últimas décadas se ha desarrollado el enfoque probabilista en los análisis de amenaza sísmica, con el fin de involucrar de manera analítica la incertidumbre asociada con las variables que intervienen en el peligro sísmico de una región. Parámetros como la frecuencia de ocurrencia de determinado sismo, la probabilidad de que ocurra en un sitio específico, probabilidades de excedencia de intensidades sísmicas, entre otros, son incluidos en los modelos de cálculo, para conformar un análisis probabilista de amenaza sísmica (PSHA por sus siglas en inglés).

La evaluación probabilista de la amenaza sísmica se basa en la ecuación propuesta por Esteva (1970) para el cálculo de tasas de excedencia de medidas de intensidad de movimiento sísmico, como función de las características de generación de los terremotos y la atenuación de las ondas sísmicas a su paso por la corteza terrestre, la cual a su vez es una aplicación del teorema de la probabilidad total. Por lo tanto la tasa de excedencia de alguna medida de intensidad asociada a la ocurrencia de un evento de amenaza, en un punto particular del territorio de análisis, se puede calcular como la suma ponderada de la probabilidad de excedencia del nivel de intensidad para el cual se está calculando, para todos los escenarios que definen la amenaza, usando como factores de ponderación las frecuencias anuales de ocurrencia de los terremotos.

Por lo tanto, para calcular las tasas de excedencia de valores de intensidad es necesario construir un conjunto de escenarios estocásticos, mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivos, cada uno con una distribución geográfica de momentos de probabilidad que caractericen las medidas de intensidad de movimiento fuerte.

Desde hace más de 30 años se ha desarrollado una metodología robusta de evaluación probabilista de la amenaza sísmica, mediante la cual es posible involucrar de manera analítica la incertidumbre asociada a variables como la tasa de ocurrencia de terremotos en una región, la magnitud y ubicación de los sismos y la atenuación de la energía del movimiento fuerte. La metodología de evaluación probabilista de la amenaza sísmica fue establecida inicialmente por Cornell (1968) y Esteva (1970), y puede resumirse en cuatro pasos principales, según lo establece Reiter (1990):

1. Caracterización de las fuentes generadoras de terremotos con influencia en el sitio de análisis, en términos de su geometría y distribución de probabilidad de inicio de la ruptura en el área definida.
2. Definición de la sismicidad de las fuentes consideradas, a partir del registro histórico de eventos ocurridos sobre su geometría (catálogo sísmico) y sus características sismotectónicas. Existen diferentes modelos de recurrencia de magnitudes para caracterizar la tasa de ocurrencia de terremotos.
3. Estimación de parámetros de movimiento fuerte en el sitio de análisis. Esto se lleva a cabo empleando funciones de atenuación de movimiento que consideren la incertidumbre asociada a la estimación de los parámetros.
4. Finalmente se combinan las incertidumbres asociadas a localización, tamaño y atenuación y se obtienen las tasas anuales de excedencia de parámetros de movimiento fuerte.

2.2.3.1 Caracterización de las fuentes sísmicas

La caracterización de las fuentes generadoras de terremotos puede hacerse mediante diferentes geometrías. Es usual modelar las fuentes como planos en el espacio, dado que esta geometría se ajusta muy bien a las características generales de las zonas de deformación y rompimiento de la corteza terrestre. Es usual también asignar una probabilidad uniforme a la ocurrencia de los terremotos dentro de la geometría de las fuentes. Dado que esta suposición implica que toda la energía del terremoto es irradiada desde el hipocentro, Der-Kiureghian y Ang (1977) plantearon una manera de considerar el tamaño de la superficie de ruptura dentro de análisis de amenaza. Relaciones entre la magnitud sísmica y el tamaño de la zona de ruptura, considerando fuentes planas pueden encontrarse en Brune (1970), Singh et al. (1982) o Wells y Coppersmith (1994). Dentro del alcance del análisis probabilista de amenaza sísmica, no se han propuesto mayores avances respecto a este tema.

2.2.3.2 Parámetros de sismicidad de fuentes sismogénicas

Con relación a la caracterización de la sismicidad de las fuentes, es decir, establecer la tasa de ocurrencia de los terremotos, existen una serie de modelos de recurrencia de magnitudes que son directamente aplicables en el análisis. Dentro de los más representativos se encuentran la ley de recurrencia de Gutenberg y Richter (1944) y variaciones como la ley Gutenberg y Richter acotada, y la ley de recurrencia del terremoto característico, esta última empleada en diversas investigaciones (Youngs y Coppersmith, 1985; Wu et. al. 1995). Si bien estos modelos permiten establecer la recurrencia de magnitudes en una fuente a partir de la información histórica disponible, no permiten caracterizar la ocurrencia de terremotos dentro de una ventana de tiempo. Es común entonces considerar que el proceso de generación de terremotos en una fuente sigue un proceso de Poisson, es decir, se considera que el número de ocurrencias en una ventana de tiempo dada es independiente del número de ocurrencias en cualquier otra ventana de tiempo, o en otras palabras, que el proceso no tiene memoria. Esta manera de ver la recurrencia de magnitudes permite establecer tanto la distribución de probabilidad de la ocurrencia de terremotos de diferente magnitud, como la distribución de probabilidad del tiempo entre la ocurrencia de dos terremotos consecutivos. El modelo de recurrencia de Poisson ha sido usado en una gran cantidad de investigaciones sobre amenaza sísmica, a tal punto que es el modelo de recurrencia más ampliamente usado hoy en día. Cornell y Winterstein (1986) mostraron que el modelo de recurrencia Poissoniano es adecuado para la caracterización de la sismicidad de las fuentes, excepto en casos particulares en los cuales toda la amenaza esté controlada por una sola fuente con un fuerte comportamiento de recurrencia del terremoto característico. Por este motivo y otras razones asociadas a la simplicidad, facilidad de uso y carencia de información para la aplicación de modelos más sofisticados, el modelo de recurrencia de Poisson se puede considerar como el más apropiado para el análisis de amenaza sísmica.

En el modelo poissoniano, la actividad de la i -ésima fuente sísmica se especifica en términos de la tasa de excedencia de las magnitudes, $\lambda_i(M)$, generadas por esta fuente. La tasa de excedencia de magnitudes mide qué tan frecuentemente se generan temblores con magnitud superior a una específica. Para la mayor parte de las fuentes sísmicas, la función $\lambda_i(M)$ es una versión modificada de la relación de Gutenberg y Richter. En estos casos, la sismicidad queda descrita como,

$$\lambda(M) = \lambda_0 \frac{e^{-\beta M} - e^{-\beta M_u}}{e^{-\beta M_0} - e^{-\beta M_u}} \quad (\text{Ec. 2-21})$$

en donde M_0 es la mínima magnitud o magnitud umbral. λ_0 , β , y M_u son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas. Estos parámetros, diferentes para cada fuente, se estiman mediante procedimientos estadísticos de máxima verosimilitud e información

experta. De esta manera, cada una de las fuentes sismogénicas queda caracterizada mediante los siguientes de parámetros de sismicidad:

- *Recurrencia de magnitudes*: se identifica mediante el parámetro β que representa la pendiente promedio de la curva de recurrencia de magnitudes (curva de número de eventos con magnitud mayor que M , versus magnitud sísmica M) en la zona de magnitudes bajas.
- *Magnitud máxima M_u* : se estima con base en la máxima longitud de ruptura posible de cada una de las fuentes y en otras características morfotectónicas.
- *Tasa de recurrencia de sismos con magnitud mayor que la de umbral λ_0* : corresponde al número promedio de eventos por año de sismos con magnitud mayor que M_0 que ocurren en una determinada fuente.

2.2.3.3 Atenuación de las intensidades de movimiento fuerte

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber qué intensidad se presentaría en el sitio en cuestión, hasta ahora supuesto en terreno firme, si en la i -ésima fuente ocurriera un temblor con magnitud dada.

La intensidad de movimiento fuerte, s , se modela como una variable aleatoria con el fin de incorporar de manera racional la incertidumbre asociada a su estimación. En la práctica común de la ingeniería sísmica, el interés se centra en la estimación de parámetros de movimiento de amplitud máxima (PGA, PGV y PGD), así como ordenadas del espectro de respuesta. Es usual representar estos parámetros de movimiento fuerte como variables aleatorias distribuidas lognormal, con momentos de probabilidad dados por la función de atenuación.

Recientemente se han desarrollado una gran variedad de modelos de atenuación, generalmente basados en datos históricos de mediciones de movimiento en estaciones acelerográficas. A partir de regresiones sobre los datos disponibles es posible establecer tendencias y dispersiones de las intensidades de movimiento en función de la magnitud sísmica y la distancia fuente-sitio. Dentro de los desarrollos recientes vale la pena mencionar las llamadas *funciones de atenuación de nueva generación* (NGA) (Abrahamson & Silva 2008; Boore & Atkinson 2008; Campbell & Bozorgnia 2008, Chiou & Youngs 2008; Idriss 2008).

Por otra parte, desde hace más de 30 años la sismología moderna ha estudiado el problema de propagación de las ondas sísmicas por la corteza terrestre, y ha derivado expresiones matemáticas que permiten caracterizar la forma del espectro de amplitudes de Fourier del movimiento fuerte para una magnitud y una distancia conocidas. Estos modelos se conocen como modelos de espectro de fuente (Aki, 1967; Brune, 1970). Estos modelos están basados en formulaciones sismológicas clásicas, las cuales permiten definir la forma matemática de los desplazamientos de las fuentes cuando ocurre un sismo, así como el contenido frecuencial del movimiento fuerte, para diferentes mecanismos de dislocación.

Aki (1967) dedujo la forma del EAF de desplazamiento, asociado al paso de las ondas de cortante (ondas S) por un punto del campo lejano, en función de la densidad de masa del medio por donde transitan las ondas, la velocidad de las ondas de cortante en el medio, la distancia hipocentral, el momento sísmico, el patrón de radiación, y la frecuencia de esquina. Brune (1970) convirtió el modelo de Aki (1967) a aceleración multiplicando por la frecuencia al cuadrado, para obtener el EAF de aceleraciones en un medio ideal y un semi-espacio infinito.

Una porción de la energía que transmiten las ondas sísmicas a la corteza terrestre se transforma en deformación elástica. Otra porción se disipa por procesos viscosos, comportamiento no lineal de las rocas o en forma de calor. Por tanto, en la atenuación de la intensidad del movimiento se

considera el efecto de la atenuación anelástica. Knopoff (1964) determinó que este efecto está controlado por un parámetro conocido como absorción anelástica. Este parámetro ha sido ampliamente usado en la sismología moderna para establecer la calidad de las rocas en términos de disipación de energía sísmica.

Por otra parte, el espectro de Brune (1970) predice una amplitud constante para valores de frecuencia superiores a la frecuencia de esquina. Esto no es posible en la realidad dado que se estaría considerando una disponibilidad energética infinita para el movimiento sísmico. Se ha observado en espectros de aceleración para sismos reales, que a medida que aumenta la distancia al foco sísmico, las altas frecuencias son filtradas por el medio y las amplitudes de aceleración decaen de forma más rápida que lo predicho por la atenuación geométrica. Hanks (1982) introdujo una frecuencia de corte al modelo de espectro de fuente que permite modelar el decaimiento de la energía en alta frecuencia.

Singh et.al. (1989) condensaron los anteriores parámetros en un modelo de espectro de fuente que considera la atenuación anelástica y el decaimiento de la energía en alta frecuencia, junto con consideraciones particulares que involucran el comportamiento observado de ciertos parámetros del modelo en función de la frecuencia y de la distancia. El resultado es un modelo de espectro de fuente que permite describir suficientemente bien el tránsito de las ondas S por la corteza, y determinar la forma teórica del EAF de aceleración en cualquier punto del territorio de análisis.

Considerando la aleatoriedad inherente al movimiento fuerte inducido por la ocurrencia de terremotos, se puede emplear la teoría de vibraciones aleatorias para determinar el valor esperado de la intensidad de movimiento a partir del EAF. Singh et.al. (1989) emplean los trabajos de Cartwright y Longuett-Higgins (1956), y Davenport (1964), con el fin de determinar el valor esperado de la intensidad máxima de movimiento en el dominio temporal como función de momentos de área del EAF. El procedimiento puede ampliarse a ordenadas espectrales, al multiplicar el EAF calculado por la función de transferencia de un oscilador de un grado de libertad, caracterizado por un periodo fundamental de vibración y un porcentaje de amortiguamiento respecto al crítico.

En décadas pasadas varios autores han usado modelos de espectro de fuente para derivar funciones de atenuación (Ordaz y Singh, 1992; Atkinson 1995; Gallego 1999; Tavaloki y Pezeshk, 2005; Zafarani y Soghlat, 2012). Cabe resaltar el trabajo de Gallego (1999), quién calibró el modelo de espectro de fuente propuesto por Singh et.al. (1989) con datos acelerográficos recolectados por la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia, y propuso funciones de atenuación de la aceleración espectral para el territorio colombiano.

2.2.3.4 Cálculo de la amenaza sísmica

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes y los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, puede calcularse la amenaza sísmica considerando la suma de los efectos de la totalidad de las fuentes sísmicas y la distancia entre cada fuente y el sitio donde se encuentra la estructura. La amenaza, expresada en términos de las tasas de excedencia de intensidades s , se calcula como,

$$\nu(s) = \sum_{n=1}^N \int_{M_0}^{M_u} -\frac{\partial \lambda_i(M)}{\partial M} \Pr(S > s | M, R_i) dM \quad (\text{Ec. 2-22})$$

en donde la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sísmicas N , y $\Pr(S > s | M, R_i)$ es la probabilidad de que la intensidad exceda un cierto valor, dadas la magnitud del sismo M , y la distancia entre la i -ésima fuente y el sitio R_i . Las funciones $\lambda_i(M)$ son las tasas de actividad de las fuentes sísmicas. La integral se realiza desde M_0 hasta M_u , lo que indica que se toma en cuenta, para cada fuente sísmica, la contribución de todas las magnitudes.

2.2.3.5 Modificación de los parámetros de amenaza por efectos de sitio

Una vez conocido el movimiento fuerte a nivel de roca firme, es necesario establecer el nivel de amplificación asociado a la respuesta dinámica de los suelos blandos, si los hay. La metodología de evaluación de la respuesta dinámica de suelos más ampliamente usada corresponde al método de propagación unidimensional de ondas de cortante SH por medio de un modelo de respuesta lineal equivalente con el cual se evalúa la respuesta del depósito usando ecuaciones de comportamiento elástico lineal, pero con propiedades mecánicas no lineales, de manera que por medio de un proceso iterativo se aproxima la respuesta no lineal del depósito.

Los movimientos del terreno a nivel de superficie, sobre un depósito de suelo horizontal y uniforme, pueden ser atribuidos principalmente a la propagación vertical de las ondas de cortante desde la formación rocosa. En esos casos el depósito de suelo puede ser considerado como una viga unidimensional de cortante, debido a que los movimientos en el terreno inducidos por la excitación sísmica en la base son únicamente resultado de la deformación de cortante del suelo.

Las metodologías de análisis de la propagación unidimensional de ondas de cortante pueden agruparse en dos categorías principales: análisis en el dominio de la frecuencia y análisis en el dominio del tiempo. En ambos casos el modelo constitutivo del suelo está definido por medio de funciones de variación de la rigidez a cortante y el amortiguamiento histerético del suelo, respecto a la deformación cortante inducida por el movimiento. Por razones de simplicidad, en el desarrollo de esta tesis se empleará un modelo de análisis en el dominio de la frecuencia.

Los análisis de respuesta en el dominio de la frecuencia son los más empleados a nivel mundial, debido a su simplicidad, flexibilidad y bajos requerimientos computacionales. Existen diferentes enfoques para el cálculo de la respuesta dinámica en el dominio de la frecuencia, aunque todos ellos están centrados en la solución de la ecuación de onda en medios estratificados para ondas de cortante y superficiales.

Uno de los métodos más ampliamente usado es el de la matriz propagadora, desarrollado originalmente por Thompson (1950), y corregido por Haskell (1953). Ha sido empleado no sólo en evaluación de respuesta dinámica, sino en sismología en general, por estar enfocado al análisis de ondas superficiales (Rayleigh y Love) en medios estratificados. Este método (conocido en sismología como el método de Thompson-Haskell) es un caso especial del método de matriz propagadora introducido por Gilbert y Backus (1966). Conceptualmente el método de la matriz propagadora es muy simple. El medio verticalmente heterogéneo se reemplaza por una serie de capas de materiales homogéneos, con características mecánicas conocidas. El movimiento se propaga verticalmente mediante la combinación de las propiedades de todos los estratos en la matriz propagadora. Dado que se trata de operaciones matriciales simples, el método es computacionalmente muy eficiente. Sin embargo, considera que los estratos del medio se comportan de manera elástica lineal, lo cual para la respuesta sísmica de depósitos de suelo no es aplicable sino en el caso en que el movimiento tenga una intensidad muy baja a nivel de la base del estrato. Dado que en general el objetivo del análisis de riesgo es considerar posibles terremotos catastróficos, la respuesta no lineal del suelo ante intensidades importantes a nivel del basamento rocoso es esencial para estimar adecuadamente el movimiento fuerte esperado en la cimentación de las estructuras. Detalles del método de la matriz propagadora pueden consultarse en Aki y Richards (2002).

El método más empleado en la actualidad es el modelo de respuesta lineal equivalente propuesto por Idriss y Seed (1968) y Seed e Idriss (1970). En este método se calcula la respuesta lineal del estrato de suelo y, por medio de un proceso iterativo, se ajustan las propiedades (rigidez a cortante y amortiguamiento) en función de modelos constitutivos de comportamiento no lineal del suelo. La evaluación de la respuesta elástica lineal está basada en la solución continua de la ecuación de onda propuesta por Kanai (1951) y mejorada por varios autores (Matthiesen et.al. 1964; Roesset

y Whitman, 1969; Lysmer et al, 1971). Este método ha sido implementado en los programas SHAKE (Schnabel et al 1972), SHAKE 91 (Idriss y Sun 1992) y EERA (Bardet et al 2000).

En ingeniería sísmica, es práctica común la modelación del comportamiento dinámico de depósitos estratificados de suelo blando mediante funciones de transferencia del espectro de respuesta, las cuales permiten conocer el valor de amplificación por el cual se deben modificar las aceleraciones espectrales calculadas a nivel de terreno firme. Estas funciones de transferencia deben construirse para diferentes valores de aceleración máxima del terreno, con el fin de tener en cuenta el efecto no lineal de degradación de la rigidez y amortiguamiento de los suelos.

A partir de la función de amplificación definida para un sitio de análisis $AF(T)$, en donde T es el periodo de vibración estructural, las aceleraciones espectrales a nivel de superficie $S_a^s(T)$, se calculan como:

$$S_a^s(T) = AF(T) \cdot S_a(T) \quad (\text{Ec. 2-23})$$

en donde $S_a(T)$ es la aceleración espectral calculada a nivel del terreno firme, empleando el modelo de amenaza sísmica.

2.3 ANTECEDENTES EN COLOMBIA

La ocurrencia del sismo de Popayán en 1983 derivó en la necesidad de conocer las características y condiciones particulares en las que se generan los terremotos en Colombia, así como la vulnerabilidad propia de las ciudades colombianas y los niveles de riesgo a los que se encuentra expuesta la población. Un primer paso en este sentido se dio con la publicación del Código Colombiano de Construcciones Sismo-resistentes, Decreto 1400 de 1984, el cual se basó en el estudio AIS 100 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). En 1984 se publica también el Estudio General de Riesgo Sísmico de Colombia, desarrollado de igual manera por la AIS.

En 1997 la AIS publica el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, el cual es un estudio de carácter científico orientado a la determinación de las características sísmicas de las principales fuentes generadoras de terremotos del país. Se identificaron y caracterizaron un total de 32 fuentes, entre fuentes tipo subducción y corticales. Como producto adicional de este estudio se desarrolló el mapa general de amenaza sísmica y el mapa de aceleraciones máximas probables a nivel de terreno firme para Colombia. Con este importante insumo, se conforma en 1998 la primera actualización de la normativa sismo-resistente nacional, bajo el nombre de Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente NSR-98, Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998.

En 2010 se desarrolla por parte de la AIS la actualización del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS 2012; Salgado et.al. 2010), en el cual fue definido un modelo actualizado de amenaza sísmica a nivel nacional, lo cual incluye la revisión y actualización de la geometría de las fuentes sismogénicas, nuevos parámetros de sismicidad que incluyen la ocurrencia de sismos importantes hasta el 2010, y funciones de atenuación específicas para el territorio colombiano. Los modelos de atenuación empleados fueron: una versión modificada del publicado por Campbell en 1997, y el propuesto por Gallego y Ordaz en 1999.

La primera actualización de la NSR se llevó a cabo en 2010 por parte de la AIS. La norma NSR-10 incluye los resultados del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, desarrollado por la AIS en 2010, el cual fue desarrollado con un modelo actualizado de amenaza sísmica a nivel nacional (Salgado et.al. 2010). Esta es la normativa vigente en la actualidad, y regula el diseño y construcción de edificaciones en todo el territorio nacional.

Según lo establecido en el numeral A.2.9 de la NSR-10, las ciudades capitales de Departamento y en general las ciudades con población superior a los 100.000 habitantes localizadas en zonas de amenaza sísmica intermedia o alta, deben complementar lo establecido en dicha normativa por medio de estudios particulares de microzonificación sísmica, que den cuenta de las amplificaciones en el movimiento fuerte del terreno como efecto de la respuesta dinámica de los depósitos blandos de suelo. Dentro de este marco, se han realizado en el país varios estudios de microzonificación sísmica de ciudades. El primero de ellos se realizó en la ciudad de Popayán en 1992 con financiación de la Comunidad Económica Europea, y la ejecución técnica de la Universidad de los Andes y el Ingeominas (actualmente Servicio Geológico Colombiano). Posteriormente se realizaron los estudios de microzonificación sísmica de Bogotá (primera versión), ejecutado por la Universidad de los Andes y el Ingeominas; y de Medellín, llevado a cabo por la Universidad EAFIT, Integral, Ingeominas y la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Hacia abril de 1999 se realizaron también los estudios de microzonificación sísmica de la ciudad de Pereira y los municipios de Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal bajo la dirección de la Universidad de los Andes.

Después de la ocurrencia del sismo del Eje Cafetero en enero de 1999, que ocasionó la destrucción de una parte importante de la ciudad de Armenia, se desarrolló el Estudio de Microzonificación Sísmica Indicativa de Armenia-Quindío, en el cual participaron la Universidad de los Andes, la AIS, la Universidad del Quindío e Ingeominas. Este estudio, financiado por la OFDA/AID de los Estados Unidos, fue realizado con el fin de definir los planes de ordenamiento y reconstrucción de la ciudad.

El 30 de enero de 2001, se firma en Bogotá el Decreto 074 de 2001, por medio del cual se complementa y modifica el Código de Construcción de Bogotá y se identifican los límites de la Microzonificación Sísmica y se adoptan los espectros de diseño. La firma de este decreto obliga al uso de los resultados del estudio de microzonificación sísmica en el diseño de edificaciones nuevas en la ciudad.

La Universidad de los Andes adelantó en el 2002 el Estudio de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Manizales, con la colaboración de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Así mismo en el 2005, la Universidad de los Andes adelantó el estudio de Microzonificación Sísmica y Estudios Generales de Riesgo Sísmico para las Ciudades de Palmira, Tuluá y Buga en el Valle del Cauca, y en 2006 los Estudios de Amenaza, Respuesta Dinámica y Microzonificación Sísmica para la Ciudad de Ibagué. Hacia mediados del año 2007, el Ingeominas finalizó la realización de la microzonificación sísmica de Cali.

El 8 de junio de 2006, se firma en Bogotá el Decreto 193 de 2006, por medio del cual se complementa y modifica el código de construcción de Bogotá y se adoptan los espectros de diseño y las determinantes del estudio de Microzonificación Sísmica. Este decreto reemplaza al Decreto 074 de 2001 por medio de una serie de modificaciones menores en cuanto a la aplicabilidad territorial.

La Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (DPAE) realizó en 2007 el Estudio de Actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá, ejecutado de manera paralela por la Universidad de los Andes, la AIS y la Sociedad Colombiana de Geotecnia. Este estudio representa el estado del arte en ingeniería sísmica aplicado a la ciudad de Bogotá. Los resultados de estos estudios fueron compilados en una nueva microzonificación de la ciudad, la cual está armonizada con la normativa nacional (NSR10). En diciembre 2010 se firma en Bogotá el Decreto 523 de 2010 mediante el cual la administración distrital adopta los resultados del nuevo estudio de Microzonificación Sísmica.

Hacia mediados de 2008, entró en funcionamiento el Laboratorio de Instrumentación Sísmica Automática de Manizales, sistema SISMan-LISA, cuyo principal objetivo es la generación de mapas automáticos de aceleración sísmica en superficie del terreno, y evaluación de daño

probable en edificaciones por efecto de un evento sísmico. El proyecto fue desarrollado por el Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales, el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, y el Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos de la Universidad de los Andes, basándose en el Sistema de Publicación Automática de Shakemaps SAPS, desarrollado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, el cual permite obtener la intensidad sísmica a nivel de superficie del terreno en la Ciudad de México, a partir de la información recolectada por una red de acelerógrafos instalada para tal fin.

Bernal (2009) desarrolló el sistema de estimación inmediata del daño post-terremoto para la ciudad de Bogotá. Este sistema determina la intensidad de movimiento fuerte en toda la extensión de la ciudad después de la ocurrencia de un sismo y calcula la relación media de daño de cada predio. El resultado es reportado en cuestión de minutos, en forma de mapas y estadísticas generales, a cuentas de correo y teléfonos celulares de los usuarios autorizados. El sistema se encuentra actualmente instalado en el campus de la Universidad de los Andes en Bogotá, pero lamentablemente no está activo.

CAPÍTULO 3. PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE ESPECTRO DE FUENTE Y SU APLICACIÓN EN COLOMBIA

Si bien son muchas las funciones de atenuación de movimiento fuerte disponibles en la literatura, cada una determinada a partir de información de una región particular y mediante suposiciones y consideraciones también particulares, no existe en la actualidad una metodología general de obtención de funciones de atenuación que sea aplicable en cualquier territorio que cuente con instrumentación sísmica adecuada y que esté basada en la solución teórica de las amplitudes espectrales. En esta tesis se propone el desarrollo de una metodología numérica para la calibración de un modelo de espectro de fuente a partir de información acelerográfica disponible. Esta metodología será aplicable a cualquier territorio donde se cuente con una muestra representativa de mediciones de movimiento sísmico.

En el marco del análisis probabilista de amenaza sísmica, las funciones de atenuación proveen los momentos de probabilidad de la intensidad de movimiento fuerte distribuida Lognormal, para magnitudes y distancias dentro de su rango de validez. Deben representar de manera adecuada los parámetros sismológicos asociados a la ruptura, los procesos de transformación que sufren las ondas sísmicas al viajar por la corteza terrestre y, adicionalmente, deben estar dadas en términos de variables físicas con relevancia en ingeniería, como lo son la aceleración máxima del terreno (PGA), y la aceleración espectral (S_a).

Los parámetros asociados a la fuente, trayectoria y atenuación local, que son relevantes en la atenuación del movimiento fuerte, pueden ser modelados mediante el uso de un modelo de espectro de fuente, el cual combina el escalamiento de fuente, propagación geométrica, atenuación del medio de tránsito y atenuación local, para proveer una solución teórica de las amplitudes espectrales del movimiento fuerte. Los modelos de espectro de fuente han sido ampliamente usados alrededor del mundo para desarrollar funciones de atenuación en las décadas pasadas (Ordaz y Singh, 1992; Atkinson 1995; Gallego 1999; Tavaloki y Pezeshk, 2005; Zafarani y Soghrat, 2012).

En la formulación del espectro de fuente, las fuentes sísmicas son consideradas como discontinuidades en un medio homogéneo e isotrópico, y los terremotos se modelan como dislocaciones de cortante puro. Usando estas suposiciones básicas, la forma del Espectro de Amplitudes de Fourier (EAF) a nivel de la roca firme puede ser calculada para cualquier ubicación. Una vez se ha calculado el EAF, la esperanza matemática de los valores máximos del movimiento fuerte, en el dominio del tiempo, se calcula aplicando las herramientas dadas en la teoría de vibraciones aleatorias. El enfoque mencionado permite el cálculo de la esperanza matemática de parámetros pico del movimiento fuerte, como lo es el PGA, en cualquier ubicación, dado un momento sísmico (el cual está asociado a la magnitud) y una distancia hipocentral. Cuando se repite el cálculo para muchas magnitudes y distancias hipocentrales, se obtiene una función de atenuación.

El modelo de espectro de fuente depende de un número importante de variables que definen el proceso de ruptura de la corteza y la calidad del medio de tránsito de las ondas sísmicas, por lo tanto su uso para generar funciones de atenuación no es directo. Dada la alta no linealidad de la solución de la esperanza matemática del movimiento fuerte, un procedimiento numérico de calibración fue desarrollado, con el fin de determinar el conjunto de parámetros sismológicos que mejor se ajustan a las intensidades reales medidas mediante una red de acelerógrafos. En esta tesis, el primer parámetro objetivo de calibración es PGA. A la aceleración espectral se le da un tratamiento un poco diferente, el cual se presenta más adelante en este capítulo.

3.1 ESPERANZA MATEMÁTICA DE PGA

Para cualquier magnitud y distancia hipocentral, el EAF radiado, de ondas SH, es calculado y la esperanza matemática de PGA ($E\{PGA\}$) es determinada aplicando teoría de vibraciones aleatorias. En esa tesis se usa como base el modelo de espectro de fuente propuesto por Singh et.al. (1989).

3.1.1 ESPECTRO DE AMPLITUDES DE FOURIER DE ACELERACIÓN

El modelo de espectro radiado de ondas SH propuesto por Singh et.al. (1989) considera todos los procesos relevantes en la atenuación del movimiento fuerte. Está basado en la formulación del espectro de fuente de Brune (Brune 1970), con términos adicionales que dan cuenta de la anelasticidad del medio de tránsito, atenuación local y el tipo de ondas predominante en la atenuación geométrica. Singh et. al. (1989) define espectros de fuente puntual y fuente finita para campo lejano y campo cercano, respectivamente.

3.1.1.1 Modelo de fuente puntual

El espectro de amplitudes de Fourier de aceleración $A(f,R,M_0)$, asumiendo un modelo de fuente ω^{-2} , puede escribirse como:

$$A(f, R, M_0) = C \cdot S(f, M_0) \cdot G(R) \cdot F_Q(f, R) \cdot F_\kappa(f, R) \quad (\text{Ec. 3-1})$$

en donde f es la frecuencia, R la distancia hipocentral, M_0 el momento sísmico, C es una constante relacionada con el medio de tránsito de las ondas sísmicas, $S(f, M_0)$ es el término de fuente, $G(R)$ es el término de la propagación geométrica, $F_Q(f, R)$ es el filtro de anelasticidad y $F_\kappa(f, R)$ es el filtro de atenuación local o filtro kappa.

El término constante es,

$$C = \frac{R_{\theta\phi} (2\pi)^2 F \cdot P \cdot A_{up}}{4\pi\rho\beta^3} \quad (\text{Ec. 3-2})$$

en donde $R_{\theta\phi}$ es el patrón de radiación, F es un factor de amplificación por superficie libre, P es un factor de partición de la energía en dos componentes ortogonales, ρ es la densidad del medio y β es su velocidad de onda de cortante. A_{up} es un factor de corrección por la amplificación inducida en las ondas S por su propagación hacia arriba a través de capas de material con velocidad de onda de cortante progresivamente menor (Boore, 1986). A pesar de ser dependiente de la frecuencia, es aproximadamente 2 para $f > 1\text{Hz}$. En este trabajo se asumió $A_{up} = 2$ para todas las frecuencias.

El término de fuente, para una fuente ω^{-2} , está dado por (Brune 1970),

$$S(f, M_0) = \frac{M_0 \cdot f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (\text{Ec. 3-3})$$

$$f_c = 4.9 \cdot 10^6 \beta \cdot \sqrt[3]{\frac{\Delta\sigma}{M_0}} \quad (\text{Ec. 3-4})$$

en donde $\Delta\sigma$ es la caída de esfuerzos y f_c es la frecuencia de esquina. La Figura 3-1 presenta de manera gráfica el término de fuente como función de la frecuencia y la magnitud. Se presenta también la frecuencia de esquina obtenida para cada magnitud, asumiendo un valor constante de $\Delta\sigma = 210$ mbar.

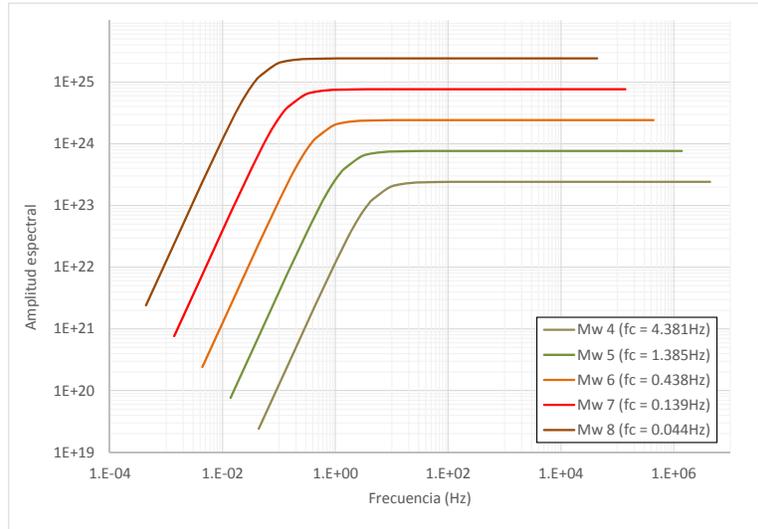


Figura 3-1. Amplitud dada por el término de fuente como función de la magnitud y la distancia.

El término de propagación geométrica es,

$$G(R) = \begin{cases} 1/R & \text{for } R \leq R_x \\ 1/\sqrt{R \cdot R_x} & \text{for } R > R_x \end{cases} \quad (\text{Ec. 3-5})$$

Este término da cuenta de la predominancia de ondas de cuerpo en la propagación cuando $R \leq R_x$, y de ondas de superficie para $R > R_x$. Por lo tanto, R_x es la distancia en la cual se espera que cambie el tipo de ondas predominantes. Las ondas superficiales son predominantes para distancias hipocentrales mayores a 100 Km. La Figura 3-2 presenta de manera gráfica el término de atenuación geométrica como función de la distancia y para varios valores de R_x .

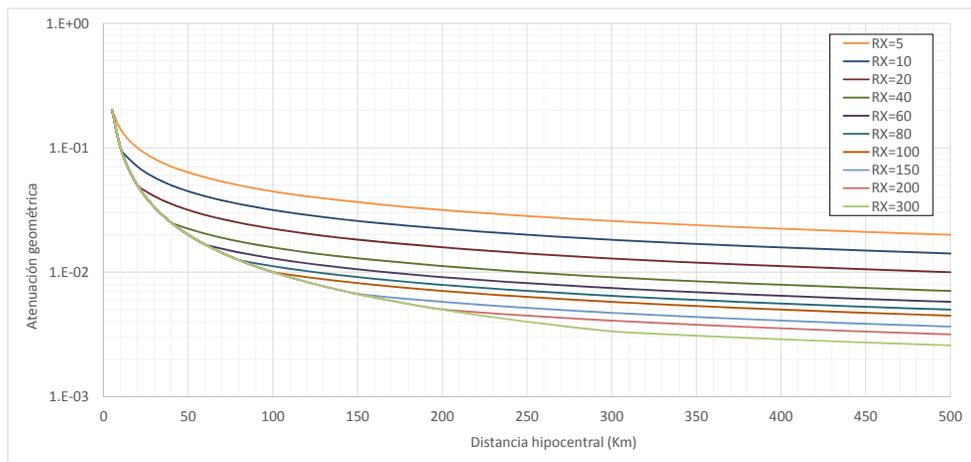


Figura 3-2. Atenuación geométrica como función de la distancia hipocentral y R_x .

El filtro de anelasticidad es,

$$F_Q(f, R) = \exp\left(\frac{-\pi f R}{\beta Q(f)}\right) \quad (\text{Ec. 3-6})$$

en donde $Q(f)$ es el factor de calidad de las rocas Q (Knopoff, 1964) dependiente de la frecuencia. En este trabajo se asume una dependencia de Q con la frecuencia de la forma $Q = Q_0 \cdot f^\varepsilon$, la cual es una versión generalizada de la función asumida en trabajos previos (Castro et al. 1990; Ordaz y Singh 1992; Atkinson 1995; Tavaloki y Pezeshk 2005; Singh et al. 2007; Hassani et al. 2011). Es importante anotar que para valores de $\varepsilon < 1$, F_Q funciona como un filtro pasa-bajas, lo cual es su intención. En el caso en que $\varepsilon = 1$, Q sería proporcional a la frecuencia y el filtro F_Q resultaría siendo constante para una distancia hipocentral dada. Valores de $\varepsilon > 1$ resultan en un F_Q pasa-altas, lo cual es inconsistente dado que el espectro radiado no sería de tipo ω^{-2} . Por lo tanto, ε debe siempre ser menor a 1. La Figura 3-3 presenta esta situación de manera gráfica. Se muestran los valores del filtro F_Q para $\varepsilon = 0.7, 1$ y 1.3 y para una distancia hipocentral fija de 50Km. El caso $\varepsilon = 1.3$ presentado en la Figura 3-3 es inconsistente con la formulación ω^{-2} del espectro de fuente.

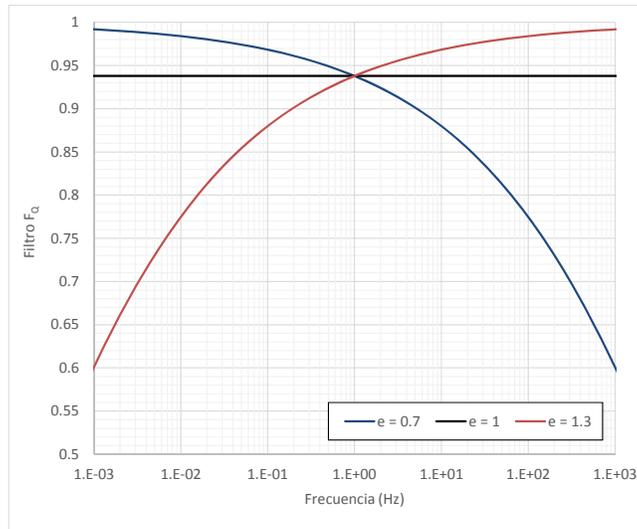


Figura 3-3. Filtro F_Q como función de la frecuencia y para valores arbitrarios de ε .

El filtro de atenuación local (o filtro kappa) es,

$$F_\kappa = \exp(-\pi f \kappa) \quad (\text{Ec. 3-7})$$

El filtro de atenuación local está asociado al hecho que las amplitudes de alta frecuencia se atenúan mucho más rápido de lo predicho por la anelasticidad y atenuación geométrica, debido principalmente a condiciones particulares en cercanía a la superficie, que pueden variar de ubicación en ubicación. Este filtro da cuenta de la disminución en la amplitud espectral para $f > f_{max}$, siendo f_{max} la frecuencia de corte introducida por Hanks en 1982. La Figura 3-4 muestra la variación del filtro F_κ con la frecuencia, para varios valores de κ .

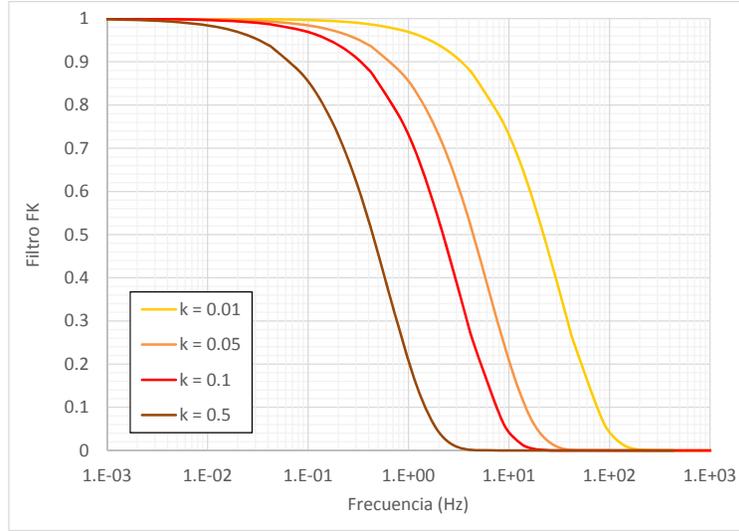


Figura 3-4. Filtro F_{κ} como función de la frecuencia y para valores arbitrarios de κ .

Gallego y Ordaz (1999) emplean en su formulación del espectro de fuente, un κ dependiente de la distancia hipocentral, de la siguiente forma

$$\kappa = \kappa_1 + \frac{R}{Q_1} \tag{Ec. 3-8}$$

en donde κ_1 y Q_1 son constantes que dependen del medio de tránsito de las ondas. En esta formulación κ es proporcional a la distancia hipocentral, presentando diferencias de uno o dos órdenes de magnitud entre distancias muy cortas y muy largas. Estas diferencias pueden inducir una sobreestimación de la amenaza para distancias cortas, y una subestimación para distancias largas. Por esta razón se prefirió mantener un κ constante como en la formulación original del espectro de fuente de Singh et.al. (1989).

Aplicando las definiciones anteriores a la ecuación 24 se obtiene, para $R \leq R_x$ (predominancia de ondas de cuerpo)

$$A_{puntual}(f, R, M_0) = C \cdot \frac{M_0 \cdot f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot \frac{1}{R} \cdot \exp\left(\frac{-\pi f R}{\beta Q_0 f^\varepsilon}\right) \cdot \exp(-\pi f \kappa) \tag{Ec. 3-9}$$

y para $R > R_x$ (predominancia de ondas de superficie)

$$A_{puntual}(f, R, M_0) = C \cdot \frac{M_0 \cdot f^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{R \cdot R_x}} \cdot \exp\left(\frac{-\pi f R}{\beta Q_0 f^\varepsilon}\right) \cdot \exp(-\pi f \kappa) \tag{Ec. 3-10}$$

La Figura 3-5 presenta varios EAF teóricos calculados a manera de ejemplo, y su variación con la magnitud. Los espectros mostrados son para: $R = 16$ Km, $R_x = 100$ Km, $C=233$, $\Delta\sigma = 210$ mbar, $\beta=3,5$ Km/s, $\rho = 2.5$ Ton/m³, $Q_0 = 700$, $\varepsilon = 0.9$ y $\kappa = 0.015$.

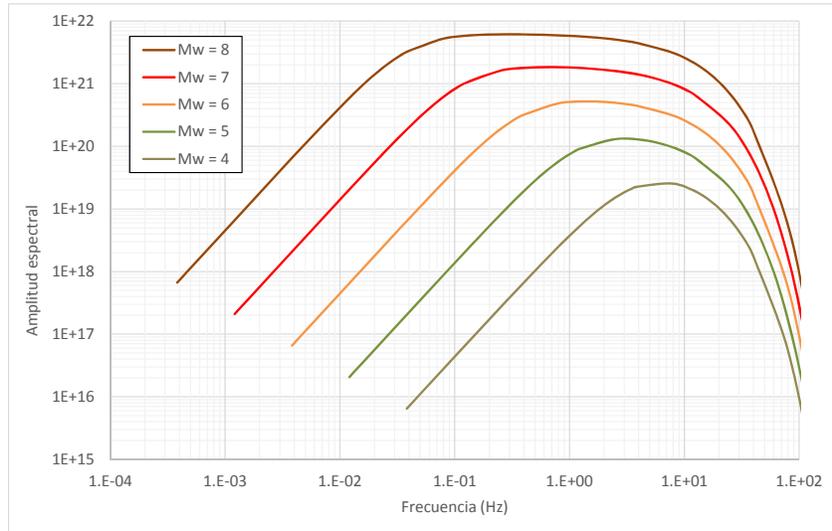


Figura 3-5. Espectros de amplitudes de Fourier teóricos calculados con el modelo de fuente puntual

3.1.1.2 Modelo de fuente finita

Con el fin de considerar que en el campo cercano el rompimiento no puede ser considerado puntual, Singh et.al. (1989) proponen un modelo de fuente finita que está basado en la definición de una zona de ruptura de geometría circular, formada por muchos diferenciales de área, cada uno de los cuales puede modelarse como fuente puntual. El espectro de campo cercano resultante, calculado en un punto localizado sobre el eje del círculo de ruptura es

$$A_{finita}(f, R, M_0)^2 = 2C^2 (M_0 f_c^2)^2 \frac{\exp(-2\pi f \kappa)}{r_0^2} \left[E1(\alpha R) - E1(\alpha \sqrt{r_0^2 + R^2}) \right] \quad (\text{Ec. 3-11})$$

en donde $\alpha = 2\pi/\beta Q_0$, r_0 es el radio del área de ruptura y $E1$ es la integral exponencial (Abramowitz y Stegun, 1964). El modelo de fuente puntual es válido únicamente para $f \geq f_c$. Para frecuencias menores, el modelo indica amplitudes espectrales casi constantes. Esta característica hace que sea imposible aplicar el modelo de fuente finita solo. La banda de baja frecuencia del espectro radiado ($f < f_c$) estará siempre definida por el modelo de fuente puntual. Esto tiene sentido dado que el espectro es de tipo $w-2$ incluso para el campo cercano. Por otra parte, el modelo de fuente puntual predice amplitudes espectrales muy grandes para la banda de frecuencias centrales ($f_c < f < f_{max}$), para grandes momentos sísmicos. Esta situación se corrige en el modelo de fuente finita dado que este modelo se satura dada la naturaleza finita del rompimiento. En este modelo, todos los diferenciales de área que componen la zona de ruptura aportan amplitud al espectro radiado, pero aquellos ubicados cerca del perímetro de la zona aportan menos que los ubicados cerca al centro. Por esta razón, se define el espectro radiado como el mínimo entre los espectros calculados con los modelos de fuente finita y puntual.

$$A(f, R, M_0) = \text{Min}\{A_{puntual}(f, R, M_0), A_{finita}(f, R, M_0)\} \quad (\text{Ec. 3-12})$$

3.1.2 VALOR ESPERADO DE PGA

Dada la naturaleza aleatoria de los registros de movimiento fuerte, la teoría de vibraciones aleatorias puede ser usada para determinar el valor esperado de PGA ($E\{PGA\}$) como función del EAF de aceleración. De los trabajos de Cartwright y Longuet-Higgins (1956) y Davenport (1964) se puede establecer que

$$E\{PGA\} = a_{rms} \cdot FP \quad (\text{Ec. 3-13})$$

en donde a_{rms} es la aceleración cuadrática media y FP es el valor esperado de la máxima razón PGA/a_{rms} . a_{rms} y FP se calculan como sigue

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{m_0}{T_d}} \quad (\text{Ec. 3-14})$$

$$FP = \sqrt{2 \ln \left(\frac{T_d}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \right)} + \frac{\gamma}{\sqrt{2 \ln \left(\frac{T_d}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{m_2}{m_0}} \right)}} \quad (\text{Ec. 3-15})$$

en donde T_d es la duración de la fase intensa, γ es la constante de Euler ($\gamma = 0.577\dots$) y m_n son los momentos de orden n del EAF,

$$m_n = \frac{2^{n+1} \pi^n}{T_d} \int_{-\infty}^{\infty} f^n A(f, R, M_0)^2 df \quad (\text{Ec. 3-16})$$

De acuerdo con Herman (1985), la duración de la fase intensa puede obtenerse como

$$T_d = \frac{1}{f_c} + 0.05R \quad (\text{Ec. 3-17})$$

3.1.3 PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA PGA

La metodología presentada permite el cálculo de la esperanza matemática de PGA como función del EAF de aceleración radiado. $E\{PGA\}$ puede entonces ser expresado como una función de todos los parámetros involucrados en su formulación.

$$E\{PGA\} = f(M_0, R, R_x, \Delta\sigma, Q_0, \varepsilon, \kappa, \rho, \beta, R_{\theta\phi}) \quad (\text{Ec. 3-18})$$

En esta tesis, los parámetros de la función presentada en la Ec. 18 son las variables de calibración. Sin embargo, no todas las variables en la Ec. 18 son susceptibles de calibración. Dado que la magnitud y la distancia son conocidas, M_0 y R son removidos del conjunto de variables. M_0 es función de la magnitud de momento (M_w) como se indica en Hanks y Kanamori (1979). Para el desarrollo de esta tesis, se asumieron los valores $\rho = 2.5 \text{ Ton/m}^3$ y $\beta = 3.5 \text{ Km/s}$. R_x fue definido por Gallego y Ordaz (1999) como 100 Km para el territorio colombiano, valor que se mantiene en este trabajo. El conjunto final de parámetros sismológicos es: $\Delta\sigma$, ε , Q_0 , κ , y $R_{\theta\phi}$. La cantidad $E\{PGA\}$ está entonces definida mediante una función altamente no lineal en un espacio de 6 dimensiones, por lo cual la aplicación de métodos estadísticos clásicos de ajuste es impráctica. Por lo tanto, en este trabajo se desarrolló un algoritmo genético con el fin de buscar el conjunto óptimo de parámetros sismológicos que mejor se ajusten a los valores de PGA observados en los registros acelerográficos.

En el algoritmo genético implementado en esta tesis, los individuos corresponden a diferentes modelos de atenuación de movimiento fuerte. El genotipo de estos individuos es el conjunto de parámetros sismológicos seleccionados para la calibración. La evolución inicia con una población de individuos generados aleatoriamente, y sigue un proceso iterativo en el cual los individuos son

cruzados y mutados (es decir, su genotipo es modificado) para dar vida a la población de la siguiente generación. En cada generación, el ajuste de cada individuo de la población (es decir, el sesgo que presenta a los valores observados de PGA) es evaluado. En este estudio se implementó un enfoque de Evolución Forzada (EF), en el cual el individuo con el mejor ajuste (al cual se le denomina “campeón”) es cruzado con todos los demás individuos de su generación, creando así la siguiente generación. Este enfoque garantiza que el ajuste obtenido en cada generación es, al menos, tan bueno como el de la generación anterior. La nueva generación de individuos es usada en la siguiente iteración del algoritmo. El algoritmo termina cuando se alcanza un máximo número de generaciones, o cuando se obtiene un ajuste suficientemente bueno.

3.1.3.1 Estructura del algoritmo

Inicialización

Un conjunto de cientos o miles de individuos es creado como población inicial. Todos los individuos son creados mediante la selección aleatoria de los valores de los parámetros sísmológicos que componen su genotipo, dentro de rangos predefinidos. Estos rangos permiten restringir los valores de estos parámetros solamente a valores con un sentido físico lógico.

Selección

Dentro de cada generación, el ajuste de los individuos es determinado por su capacidad de reducir el sesgo respecto a los valores observados de PGA. Para cada individuo, la cantidad $E\{PGA\}$ es calculada junto con los residuales para cada registro acelerográfico. Los residuales (Re) se calculan como sigue

$$Re = \ln \left(\frac{a_{rec}}{E\{PGA\}} \right) \quad (Ec. 3-19)$$

en donde a_{rec} es la aceleración nominal registrada en cada acelerograma,

$$a_{rec} = \sqrt{\frac{a_x^2 + a_y^2}{2}} \quad (Ec. 3-20)$$

en donde a_x es la componente ortogonal x del movimiento fuerte (típicamente la componente E-W) y a_y es la componente y (típicamente la N-S). La componente vertical es descartada en este procedimiento.

En seguida, para cada individuo se calcula el sesgo de la siguiente manera

$$sesgo = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Re_i \quad (Ec. 3-21)$$

El individuo con el menor sesgo será declarado campeón y será cruzado con todos los otros individuos de su generación.

Cruce y mutación

Las operaciones de cruce y mutación son ejecutadas luego de la selección del individuo campeón. Estas operaciones permiten la creación de nuevos individuos para la siguiente generación. El cruce se lleva a cabo por medio de una mezcla aleatoria de los parámetros sísmológicos de los individuos “padres” (uno de los cuales es siempre el campeón), de manera que el individuo “hijo”

resultante tiene en su genotipo información de ambos padres. El tamaño de la población se mantiene siempre constante.

Dada la alta no linealidad del problema, no es posible asegurar que el individuo campeón corresponda a uno con el mínimo sesgo global. Por lo tanto, los individuos son aleatoriamente mutados durante la evolución con el fin de evitar el estancamiento en un mínimo sesgo local.

Finalización

Un mínimo sesgo aceptable y un máximo número de generaciones deben ser definidos con el fin de limitar el número total de iteraciones. Cuando alguno de los dos se alcanza, el algoritmo finaliza. El individuo campeón de la última generación contiene la combinación óptima de parámetros sismológicos que definen el modelo de espectro de fuente y proveerá el menor sesgo.

3.2 EXPANSIÓN A ORDENADAS ESPECTRALES

El procedimiento de cálculo puede ser expandido para calcular funciones de atenuación de la aceleración espectral, mediante la multiplicación del EAF de aceleración teórico por la función de transferencia de un oscilador de un grado de libertad (OIGDL). El espectro de respuesta de aceleración es de gran importancia para fines de ingeniería, dado que provee la máxima aceleración inducida sobre un OIGDL de comportamiento elástico durante la ocurrencia de un terremoto.

La función de transferencia de un OIGDL de periodo de vibración T y coeficiente de amortiguamiento ζ está dada por,

$$H(f, T, \zeta) = \frac{1}{1 - (f \cdot T)^2 + 2\zeta(f \cdot T)} \quad (\text{Ec. 3-22})$$

El EAF de aceleración de la respuesta del OIGDL (A_{osc}) se calcula multiplicando su función de transferencia por el EAF radiado,

$$A_{osc}(f, R, M_0, T, \zeta) = A(f, R, M_0) \cdot H(f, T, \zeta) \quad (\text{Ec. 3-23})$$

El valor esperado de la aceleración espectral se calcula de A_{osc} usando teoría de vibraciones aleatorias, de la misma manera que para PGA, con una modificación para dar cuenta del cambio en la duración de la fase intensa. T_d es reemplazado en la ecuación 38 por la duración de la respuesta del OIGDL (T_r). T_r se calcula según lo indicado por Joyner y Boore (1988).

$$T_r = T_d + \frac{\left(\frac{T_d}{T}\right)^3}{\frac{2\zeta\pi}{T} \left(\left(\frac{T_d}{T}\right)^3 + \frac{1}{3}\right)} \quad (\text{Ec. 3-24})$$

3.2.1 PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA ORDENADAS ESPECTRALES

La metodología presentada permite el cálculo de la esperanza matemática de la aceleración espectral como función del EAF de aceleración radiado, modificado por la función de transferencia de un OIGDL con periodo fundamental de vibración T . El valor esperado de la

aceleración espectral correspondiente, $Sa(T)$, puede ser expresado como:

$$E\{Sa(T)\} = f(M_0, R, R_x, \Delta\sigma, Q_0, \varepsilon, \kappa, \rho, \beta, R_{\theta\phi}, T) \quad (\text{Ec. 3-25})$$

Los términos asociados al EAF de la aceleración espectral son los mismos asociados a PGA (constante, de fuente, propagación geométrica, atenuación anelástica y atenuación local) más el término asociado a la respuesta elástica de un OIGDL. El único término que tiene una dependencia directa con el periodo estructural es el término de respuesta de un OIGDL. Este término no cuenta con parámetros libres que puedan ser susceptibles de calibración. Por lo tanto, debe seleccionarse de los parámetros libres del modelo sísmológico, aquellos que puedan ser empleados para ajustar el modelo a las ordenadas espectrales.

Dentro del conjunto de parámetros sísmológicos, se seleccionó Q_0 como parámetro susceptible de calibración para ordenadas espectrales. Esta selección tiene que ver con la clara dependencia de Q con la frecuencia, así mismo como la independencia de todos los demás parámetros ($M_0, R, R_x, \Delta\sigma, \varepsilon, \kappa, \rho, \beta$ y $R_{\theta\phi}$) con la frecuencia. Se consideró entonces que los parámetros sísmológicos no dependientes de la frecuencia, quedarían establecidos por el resultado del procedimiento de calibración sobre PGA. Esto implica entonces que en el cálculo del valor esperado de las aceleraciones espectrales, los parámetros $R_x, \Delta\sigma, \varepsilon, \kappa, \rho, \beta$ y $R_{\theta\phi}$ son constantes, es decir:

$$E\{Sa(T)\} = f(M_0, R, Q_0, T) \quad (\text{Ec. 3-26})$$

Dado que M_0, R y T son cantidades conocidas, el único parámetro libre es Q_0 . De esta manera, se aplica el mismo algoritmo de ajuste que para la calibración de PGA sobre $Sa(T)$. Vale la pena hacer notar que la ejecución del algoritmo genético en este caso resulta en una búsqueda aleatoria de valores de Q_0 .

3.3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA EN COLOMBIA

Con el fin de implementar y probar la metodología propuesta, se presenta en esta sección la construcción de funciones de atenuación para el territorio colombiano, calibradas con registros acelerográficos de sismos ocurridos en el país.

El territorio colombiano constituye una amplia región de interacción tectónica, en la cual interactúan las placas Caribe, Suramérica y Nazca. La totalidad del territorio se encuentra ubicado sobre la placa Suramérica. Al occidente, la placa Nazca subduce la placa Suramérica a lo largo de la Costa Pacífica colombiana, teniendo asociado a este movimiento sismos de alta magnitud. Las deformaciones inducidas en la corteza por efecto de la interacción entre las placas Nazca y Suramérica, son absorbidas por un conjunto de sistemas de fallas corticales, dentro de los cuales resaltan el sistema Romeral, de tipo transcurrente, y el sistema Frontal de la Cordillera Oriental ubicado en el piedemonte llanero, y de tipo inverso (falla de cabalgamiento). Al norte, el principal rasgo sismotectónico lo constituye la zona de compresión entre las placas Suramérica y Caribe, la cual induce deformaciones que son absorbidas por movimientos transcurrentes de los sistemas Oca en Colombia y San Sebastián en Venezuela.

3.3.1 BASE DE DATOS DE MOVIMIENTO FUERTE

Los registros de movimiento fuerte fueron obtenidos de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC), operada por el Servicio Geológico Colombiano. La base de datos contiene un total de 284 acelerogramas crudos (no corregidos) registrados a nivel de roca firme para un periodo de 14 años desde 1994 a 2008, para terremotos con magnitud de momento M_w superior a 4.4. Registros posteriores no han sido incluidos en este estudio, pero no han ocurrido sismos importantes en Colombia desde entonces.

Los 284 acelerogramas fueron sometidos a un procesamiento que incluyó: corrección de instrumento (ganancia) y de línea base (fase 1 del procesamiento) y filtrado pasabanda y diezmado a un intervalo de tiempo uniforme (fase 2 del procesamiento). Después de este proceso, la base de datos fue depurada con el fin de descartar registros erróneos o de muy bajo PGA. La base de datos definitiva cuenta con 206 registros acelerográficos. Finalmente, los registros se dividieron en dos conjuntos: sismos corticales y sismos de subducción. Los grupos quedaron conformados por 87 acelerogramas asociados a 22 terremotos corticales y 119 acelerogramas asociados a 15 terremotos de subducción (ver Tabla 3-1). La Figura 3-6 muestra la ubicación de los epicentros de los terremotos usados en la calibración, junto con la ubicación de los acelerógrafos de la RNAC.

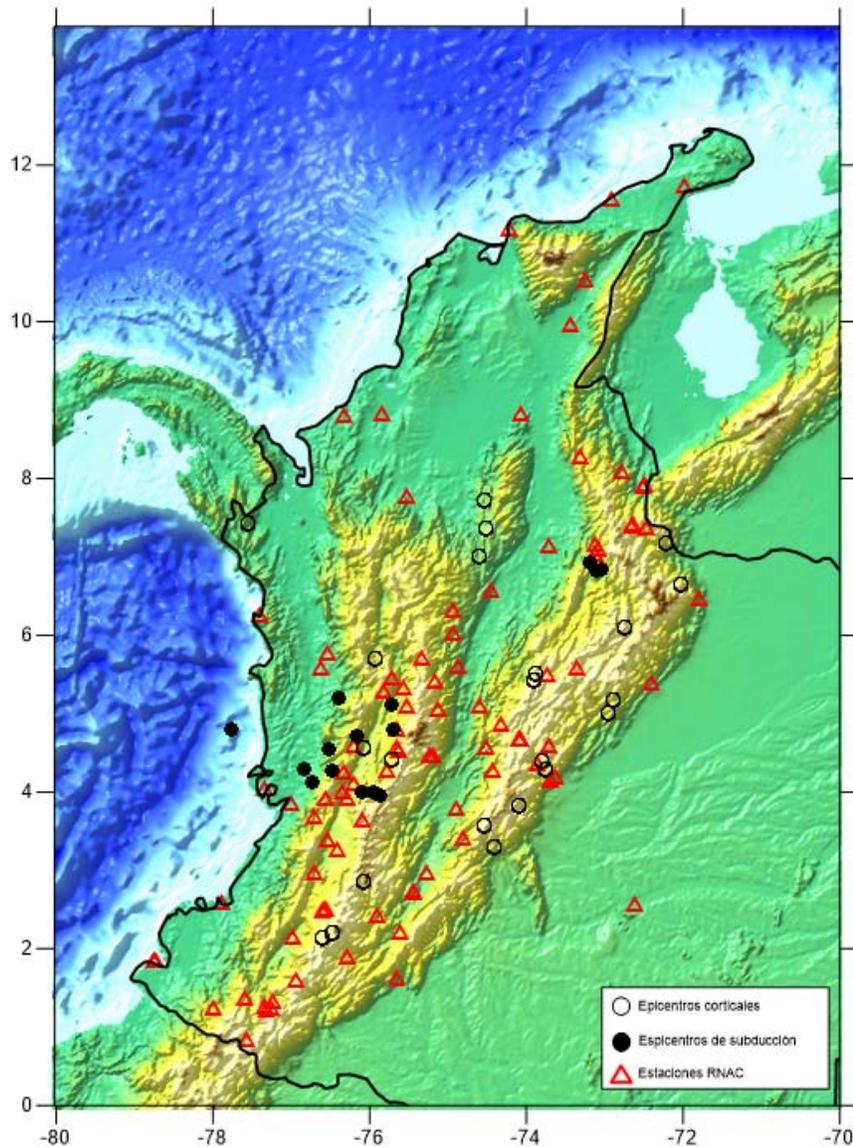


Figura 3-6. Ubicación geográfica de los epicentros de los sismos usados en la calibración

Tabla 3-1. Resumen de la base de datos de acelerogramas

Nombre del sismo	Tipo	Fecha	Mw	Distancia hipocentral [Km]	Profundidad [Km]	Número de acelerogramas
Páez	Cortical	06/06/1994	6.1	297	1	1
Santa Isabel	Cortical	9/19/1994	4.6	163	1	2
Tauramena	Cortical	1/19/1995	6.2	95	25	5
Calima	Subducción	02/08/1995	6.4	191	102	7
Risaralda	Subducción	8/19/1995	6.4	112	110	4
Zaragoza	Cortical	06/11/1996	5.1	204	5	4
Sipi	Subducción	09/11/1996	4.6	185	100	10
Juradó	Cortical	11/04/1996	6.1	308	5	4
El Dovio	Subducción	11/17/1996	4.5	149	110	11
Nido de Bucaramanga	Subducción	01/01/1997	5.8	337	160	5
Sipi	Subducción	2/19/1997	5.6	186	120	6
Nido de Bucaramanga	Subducción	06/11/1997	5.8	347	170	3
Cubarral	Cortical	7/17/1997	4.8	93	5	24
Génova	Subducción	09/02/1997	6.8	298	230	12
Argelia	Subducción	12/10/1997	4.4	165	100	1
Génova	Subducción	12/11/1997	6.4	279	220	1
Chameza	Cortical	02/10/1998	4.5	138	5	6
Landazuri	Cortical	03/06/1998	4.8	123	5	2
Cimitarra	Cortical	03/08/1998	4.9	130	5	25
Armenia	Cortical	1/25/1999	5.8	141	5	1
Guayabetal	Cortical	06/01/1999	4.6	126	5	2
Sativasur	Cortical	7/17/1999	5	114	5	7
Trujillo	Subducción	7/19/1999	4.9	137	130	1
Betulia	Subducción	11/08/1999	6.2	339	160	8
Fortul	Cortical	1/17/2000	5.3	126	5	2
El Bagre	Cortical	3/28/2000	4.7	179	5	5
Tuluá	Subducción	9/22/2001	5.6	195	180	1
La Uribe	Cortical	11/23/2002	5	107	5	9
Colombia	Cortical	1/22/2003	4.6	164	5	1
Sotará	Cortical	8/18/2004	4.6	31	5	1
Océano Pacífico	Subducción	11/15/2004	6.6	374	24	2
Toro	Cortical	03/08/2005	4.6	82	5	1
Tadó	Subducción	4/21/2005	4.7	110	90	4
Puracé	Cortical	03/06/2007	4.4	88	5	1
Andes	Cortical	4/24/2007	4.7	53	15	14
Cubará	Cortical	6/20/2007	5.1	94	5	11
Quetame	Cortical	5/28/2008	5.1	80	1	2

La magnitud fue expresada de manera uniforme en escala de magnitud de momento M_w , y la distancia hipocentral fue usada como distancia fuente-sitio. La distribución de magnitudes y distancias se presenta en la Figura 3-7. Las magnitudes van de 4.4 a 6.8 M_w , y las distancias hipocentrales van de 88 a 619 Km. La Figura 3-8 muestra un histograma de las magnitudes sobre rangos uniformes. La Figura 3-9 presenta un histograma de las distancias hipocentrales. Estos histogramas muestran que el número de registros puede asumirse como distribuido uniformemente en las magnitudes pero no en las distancias. El intervalo de distancias central (de 100 a 300 Km) tiene más del 65% de todos los registros. Para distancias mayores a 400Km, solamente se cuenta con 13 acelerogramas. La estimación del movimiento fuerte para distancias mayores a 400 Km es de gran importancia en el caso Colombiano, dada la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran magnitud en la zona de subducción de la costa pacífica, que afecte la ciudad de Bogotá debido a los importantes efectos de sitio que ahí se presentan. Por otra parte, la máxima magnitud disponible es 6.8 M_w , que es un valor bajo comparado con las máximas magnitudes esperadas en las fuentes sismogénicas colombianas (AIS 2010, Salgado et.al. 2010). Estos vacíos en los datos limitan la aplicabilidad de técnicas de regresión para la generación de funciones de atenuación en Colombia. El procedimiento aquí propuesto parece proveer una solución práctica en este caso.

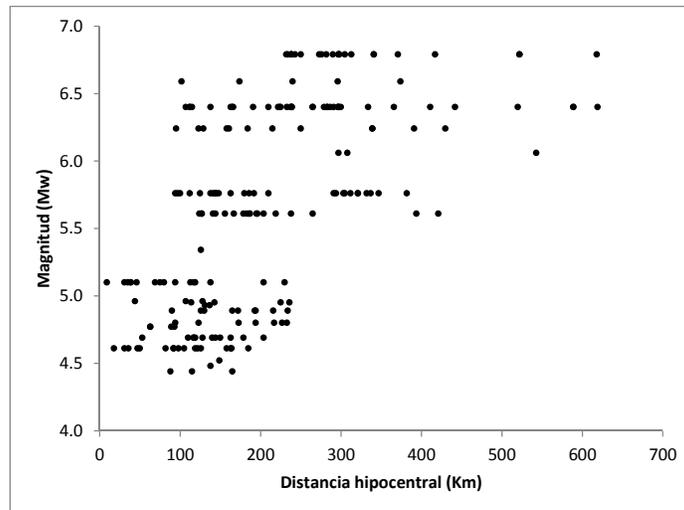


Figura 3-7. Distribución de magnitud y distancia de los acelerogramas empelados

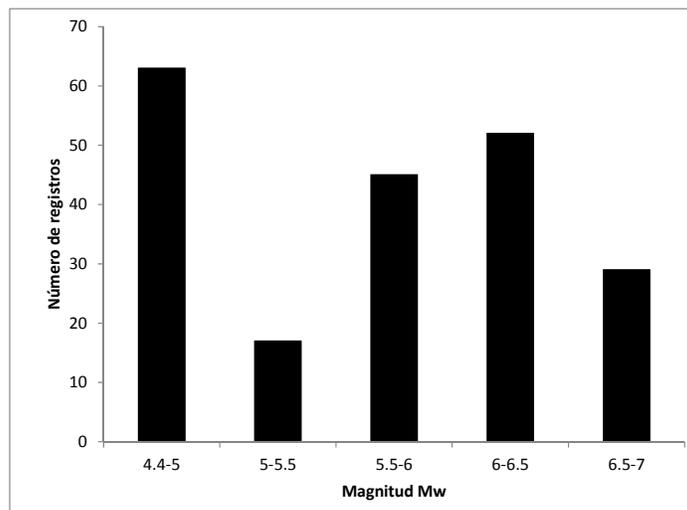


Figura 3-8. Número de registros por rango de magnitud

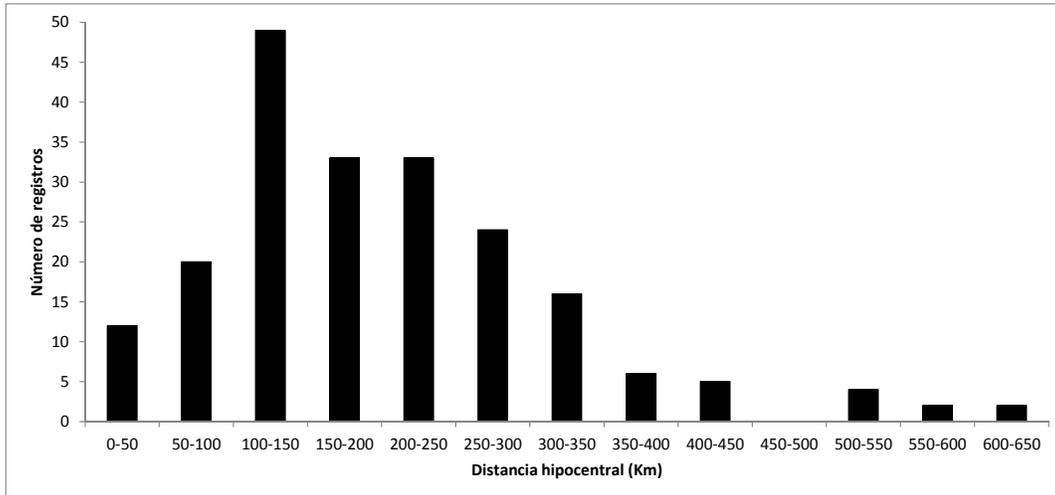


Figura 3-9. Número de registros por rango de distancia

3.3.2 FUNCIONES DE ATENUACIÓN DE PGA PARA COLOMBIA

El procedimiento de calibración propuesto ha sido aplicado para obtener el conjunto de parámetros sismológicos del modelo de espectro de fuente que mejor se ajustan a los valores de PGA observados. Se calibraron funciones de atenuación para sismos corticales y de subducción por separado. La Tabla 3-2 presenta los rangos iniciales para los parámetros sismológicos, definidos previamente a la calibración.

Tabla 3-2. Rangos iniciales para los parámetros sismológicos

Parámetro	Unidades	Mínimo	Máximo
$\Delta\sigma$	Bar	50	250
ε		0.8	1
Q_o	-	50	800
k	-	0.005	0.04
$R_{\theta\phi}$	-	0.55	0.65

Los parámetros sismológicos resultantes se presentan en la Tabla 3-3, junto con el sesgo y desviación estándar finales. Los valores de los parámetros son lógicos desde el punto de vista de su significado físico. Los residuales se presentan en la Figura 3-10 para ambos modelos (cortical y subducción), mostrando su variación con la distancia hipocentral y con la magnitud. La Figura 3-10 presenta adicionalmente el sesgo y la desviación obtenidos para cada modelo. Los sesgos finales son muy cercanos a cero, lo cual indica en términos prácticos que la estimación de PGA usando el procedimiento propuesto se puede considerar como no sesgada, lo cual es una característica muy deseable en las funciones de atenuación. La Figura 3-11 muestra la relación entre el PGA calculado ($E\{PGA\}$) y la intensidad nominal o PGA observado (a_{rec}). Los resultados muestran un muy buen ajuste entre los PGA calculados y observados.

Tabla 3-3. Parámetros sismológicos resultantes, sesgo y desviación estándar para cada modelo

Mecanismo focal	$\Delta\sigma$ [bar]	Q_o	ε	k	$R_{\theta\phi}$	Sesgo	Desviación estándar
Cortical	235.9	723.1	0.9	0.0333	0.642	0.0009	0.63
Subducción	210.3	477.9	0.91	0.0346	0.623	0.0008	0.72

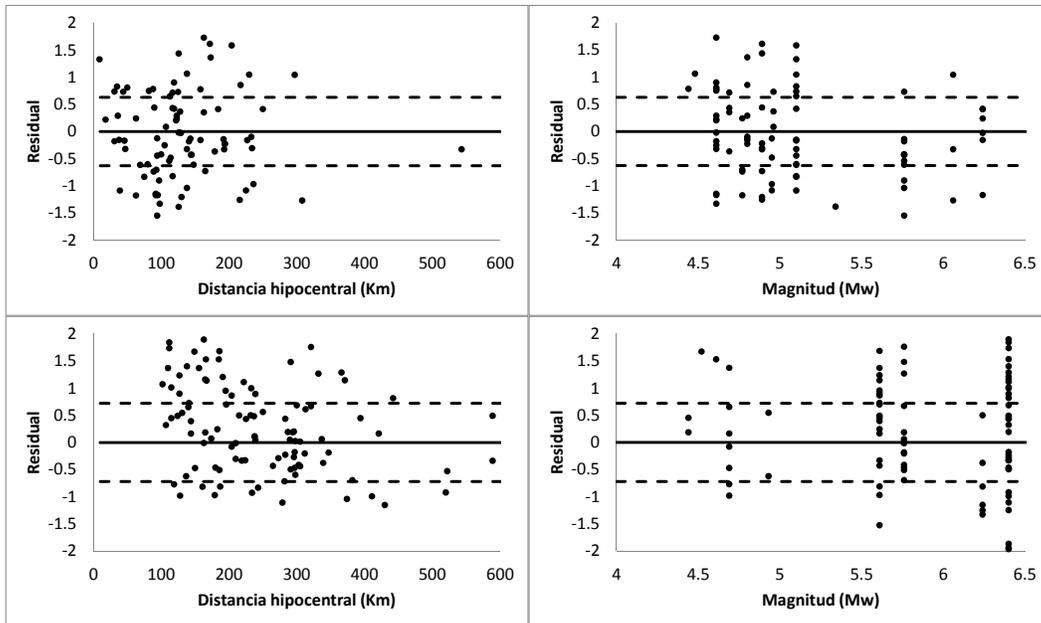


Figura 3-10. Residuales para sismos corticales (arriba) y de subducción (abajo)

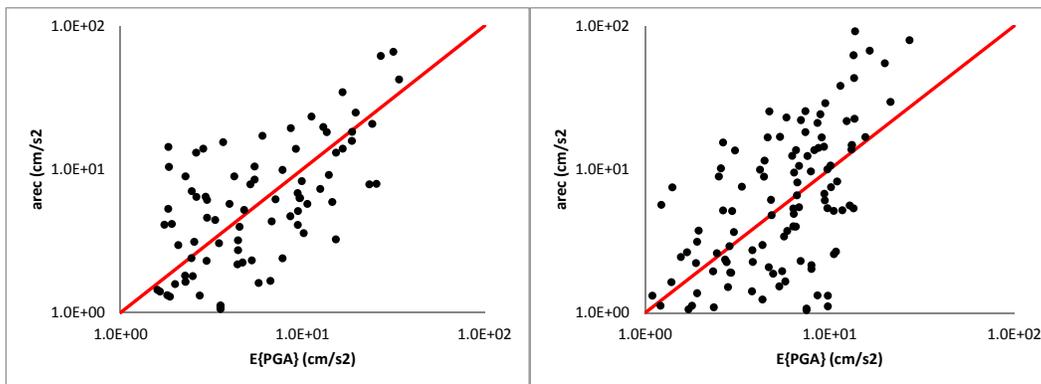


Figura 3-11. PGA calculado vs. observado para sismos corticales (izquierda) y de subducción (derecha). La línea roja indica el caso en el que ambas cantidades son iguales.

La Figura 3-12 y Figura 3-13 presentan las funciones de atenuación obtenidas en términos de PGA y calculadas con los parámetros de la Tabla 3-3, para sismos corticales y de subducción, respectivamente. Estas funciones de atenuación han sido definidas para distancias hipocentrales entre 5 y 500 Km y magnitudes entre 4 y 8 Mw.

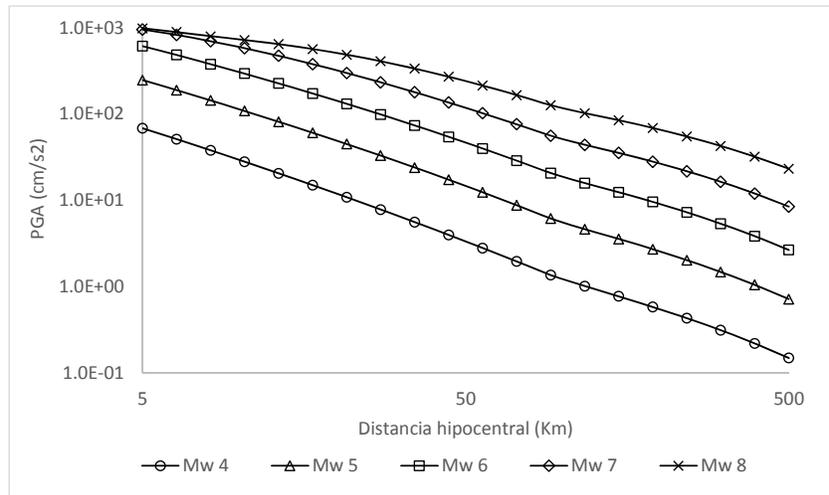


Figura 3-12. Función de atenuación para sismos corticales

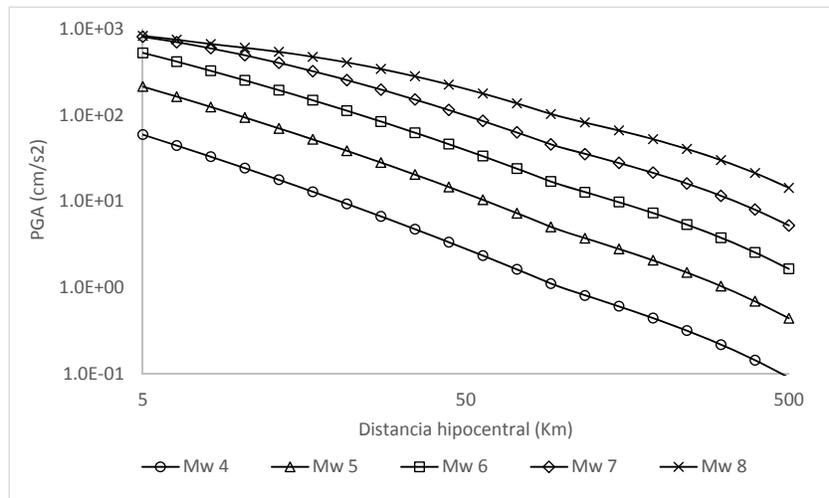


Figura 3-13. Función de atenuación para sismos de subducción

3.3.3 FUNCIONES DE ATENUACIÓN DE LA ACELERACIÓN ESPECTRAL PARA COLOMBIA

El procedimiento de calibración propuesto en esta tesis, se ejecutó para obtener funciones de atenuación de la aceleración espectral para OIGDL con 0.05, 0.1, 0.15, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, y 3.0 segundos de periodo fundamental de vibración, y $\zeta = 5\%$. El rango de variación de Q_0 es el mismo presentado en la Tabla 3-2. Se calibraron funciones de atenuación para sismos corticales y de subducción. Los valores de Q_0 obtenidos en cada caso, junto con el correspondiente sesgo y desviación estándar, se presentan en la Tabla 3-4. Los valores obtenidos para Q_0 se presentan de manera gráfica, como función del periodo estructural, en la Figura 3-14.

Dentro de este trabajo de tesis, en definitiva, se obtuvieron dos modelos de atenuación finales, uno por cada tipo de terremotos, los cuales se generan mediante el ensamblaje de los modelos de atenuación particulares de cada periodo estructural y PGA. Estos modelos de atenuación tienen, en todos los casos, sesgos cercanos a cero, lo cual indica que son insesgados en todas las ordenadas espectrales. Adicionalmente, sus desviaciones estándar están dentro de los valores normales reportados en la literatura.

Tabla 3-4. Valores resultantes de Q_0 , sesgo y desviación estándar por tipo de terremotos

T (seg)	Cortical			Subducción		
	Q_0	Sesgo	Desviación estándar	Q_0	Sesgo	Desviación estándar
0.05	241.2	-0.0027	0.76	355.9	0.0172	0.72
0.10	257.8	0.0053	0.78	356.9	0.0143	0.76
0.15	344.3	0.0154	0.78	406.9	0.0208	0.75
0.30	578.3	0.0015	0.72	382.2	0.0232	0.72
0.50	390.4	0.0009	0.68	253.2	0.0075	0.70
1.00	319.2	-0.0010	0.66	165.5	0.0483	0.70
1.50	302.3	-0.0008	0.64	146.8	-0.0492	0.72
2.00	371.2	-0.0046	0.67	149.6	-0.1402	0.74
2.50	510.9	0.0033	0.70	124.8	0.0334	0.71
3.00	954.9	-0.0003	0.72	132.8	-0.0540	0.73

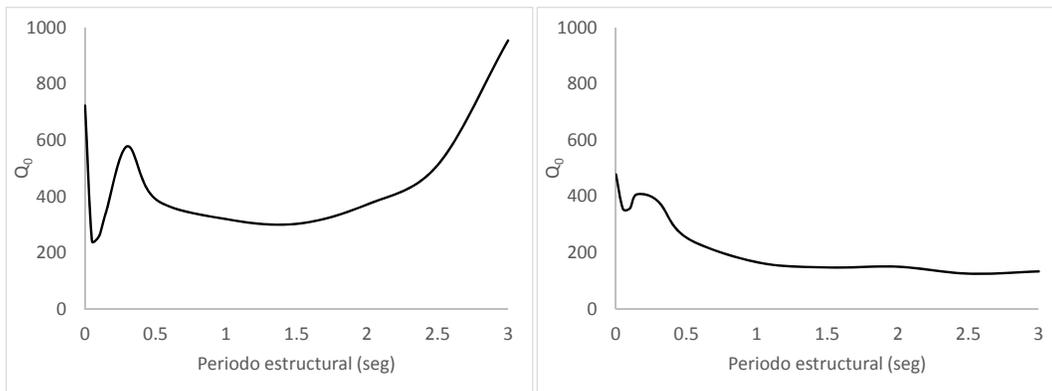


Figura 3-14. Valores de Q_0 como función del periodo estructural, para sismos corticales (izquierda) y de subducción (derecha).

La Figura 3-15 presenta dos ejemplos de espectros de respuesta ($\zeta = 5\%$) para magnitudes y distancias hipocentrales arbitrarias, para el modelo de sismos corticales, y la Figura 3-16 presenta los espectros de respuesta para el modelo de sismos de subducción.

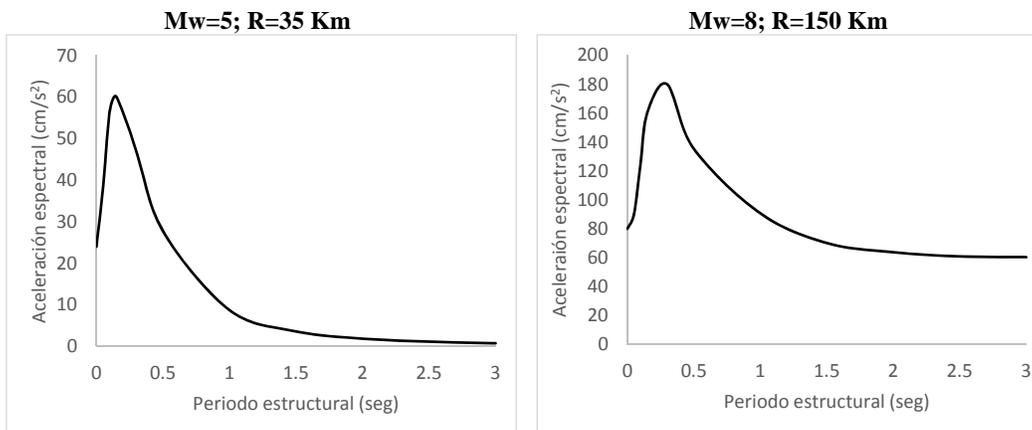


Figura 3-15. Espectros de respuesta calculados con las funciones de atenuación para sismos corticales obtenidas para Colombia

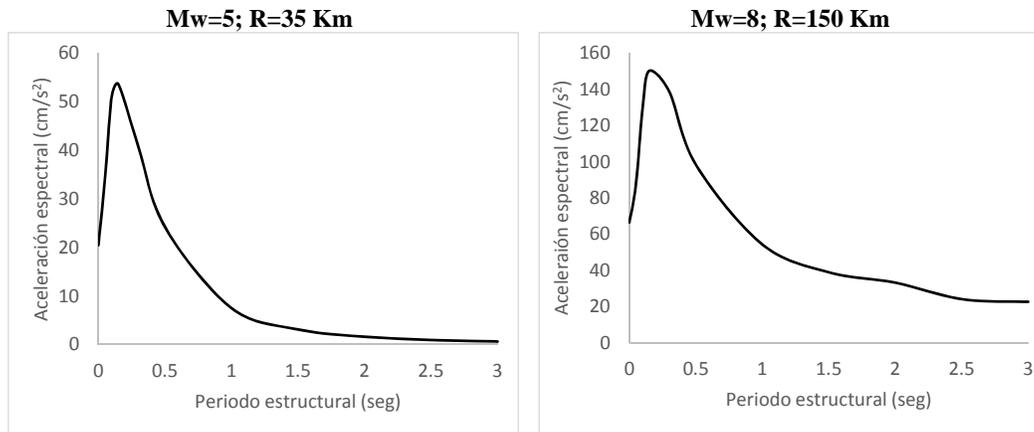


Figura 3-16. Espectros de respuesta calculados con las funciones de atenuación para sismos de subducción obtenidas para Colombia

Dado que no existe una expresión simple para calcular PGA o aceleraciones espectrales, usando los resultados de esta tesis, el Anexo A contiene tablas de valores de PGA y aceleración espectral para diferentes combinaciones de magnitud M_w y distancia hipocentral, y para los periodos estructurales definidos en este trabajo. Es posible construir funciones de atenuación para PGA o aceleración espectral para combinaciones diferentes de magnitud, distancia o periodo estructural, usando el programa Strong Motion Analyst, desarrollado en paralelo con este trabajo de tesis, y el cual es un software académico de libre uso que implementa los procedimientos acá contenidos y los parámetros sismológicos resultantes. El Anexo E presenta una breve descripción de este programa.

3.3.4 COMPARACIÓN CON FUNCIONES DE ATENUACIÓN PREVIAMENTE APLICADAS AL CASO COLOMBIANO

Las funciones de atenuación obtenidas son comparadas con las que fueron usadas en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS 2010, Salgado et.a. 2010). Esas funciones de atenuación son: Campbell strike (Campbell, 1997) y Gallego y Ordaz (1999) para sismos corticales, y Campbell reverse (Campbell 1997) y Gallego y Ordaz (1999) para sismos de subducción; todas ellas a nivel de roca firme. Se calcularon los residuales para todas estas funciones de atenuación usando la base de datos de acelerogramas de esta tesis. Los sesgos y desviaciones estándar resultantes para PGA, se presentan en la Tabla 3-5, en comparación con los obtenidos para las funciones de atenuación desarrolladas en esta tesis.

Tabla 3-5. Sesgos y desviaciones estándar para las funciones de atenuación de PGA previamente usados en Colombia, en comparación con las obtenidas en esta tesis

Cortical			Subducción		
Función de atenuación	Sesgo	Desviación estándar	Función de atenuación	Sesgo	Desviación estándar
Campbell strike	0.018	0.79	Campbell reverse	0.02	1.56
Gallego y Ordaz	0.155	0.83	Gallego y Ordaz	1.248	1.66
Esta tesis	0.0009	0.63	Esta tesis	0.0008	0.72

La Figura 3-17 presenta los sesgos y desviaciones estándar, en función del periodo estructural, del modelo de atenuación para sismos corticales obtenido en esta tesis, en comparación con los modelos correspondientes usados en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS 2010, Salgado et.a. 2010). La Figura 3-18 presenta la misma comparación para los modelos de subducción.

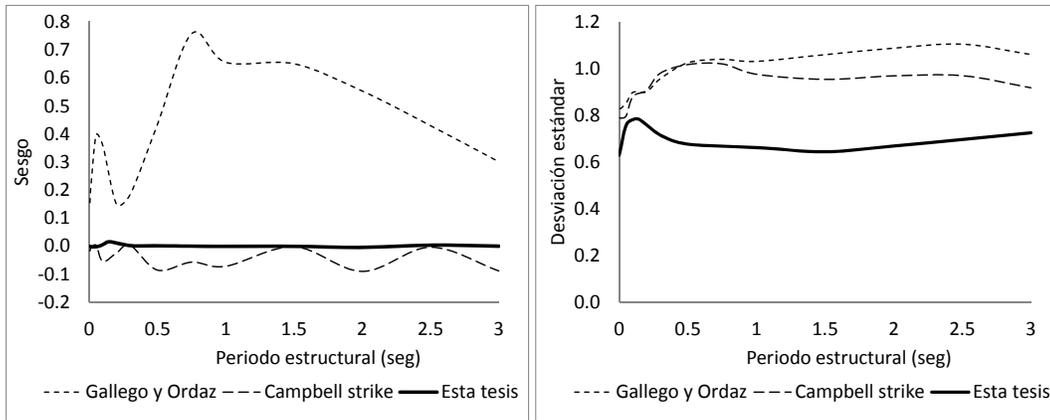


Figura 3-17. Comparación de los sesgos y desviaciones estándar de la función de atenuación obtenida para sismos corticales con aquellas usadas en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, para diferentes periodos estructurales

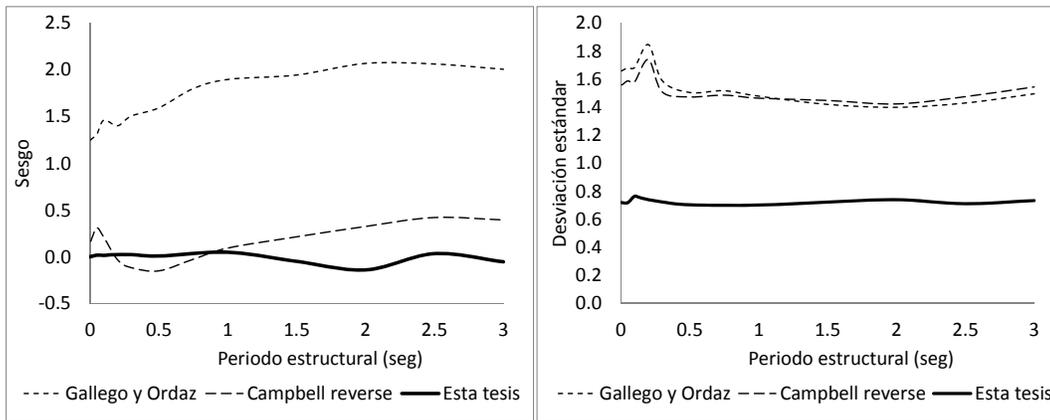


Figura 3-18. Comparación de los sesgos y desviaciones estándar de la función de atenuación obtenida para sismos de subducción con aquellas usadas en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, para diferentes periodos estructurales

La Figura 3-19 muestra la comparación de las funciones de atenuación para sismos corticales y la Figura 3-20 muestra la misma comparación para as funciones de sismos de subducción, para los modelos de PGA. En el caso de las funciones de atenuación de sismos corticales, para magnitudes mayores a 6, la función obtenida en esta tesis está siempre por encima de los otros modelos. En el caso de las funciones para sismos de subducción, la propuesta por Gallego y Ordaz (1999) predice valores de PGA muy por encima que los dado por el modelo propuesto en esta tesis, para distancias hipocentrales superiores a 80 Km.

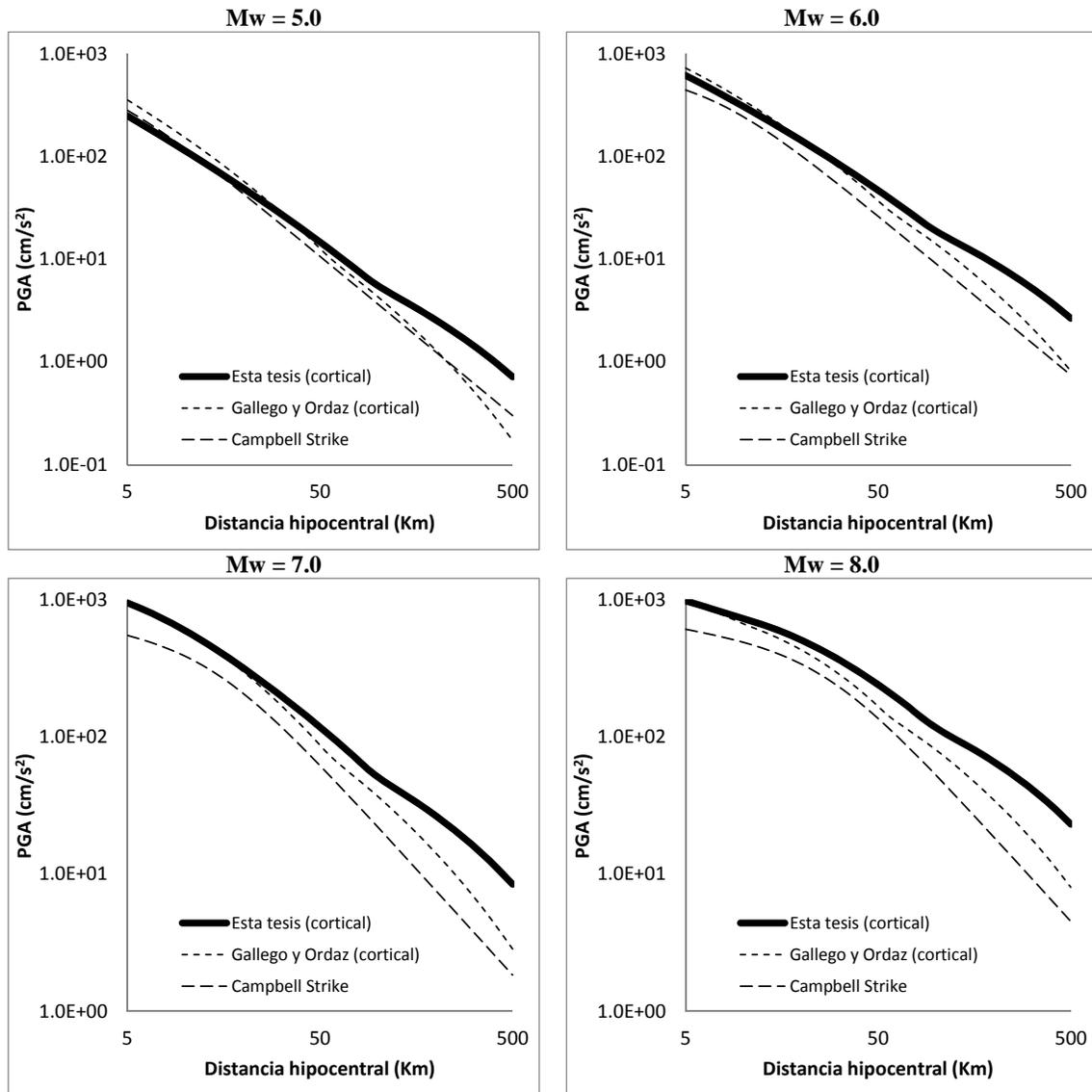


Figura 3-19. Comparación de las funciones de atenuación obtenidas para sismos corticales con aquellas usadas en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, para diferentes magnitudes

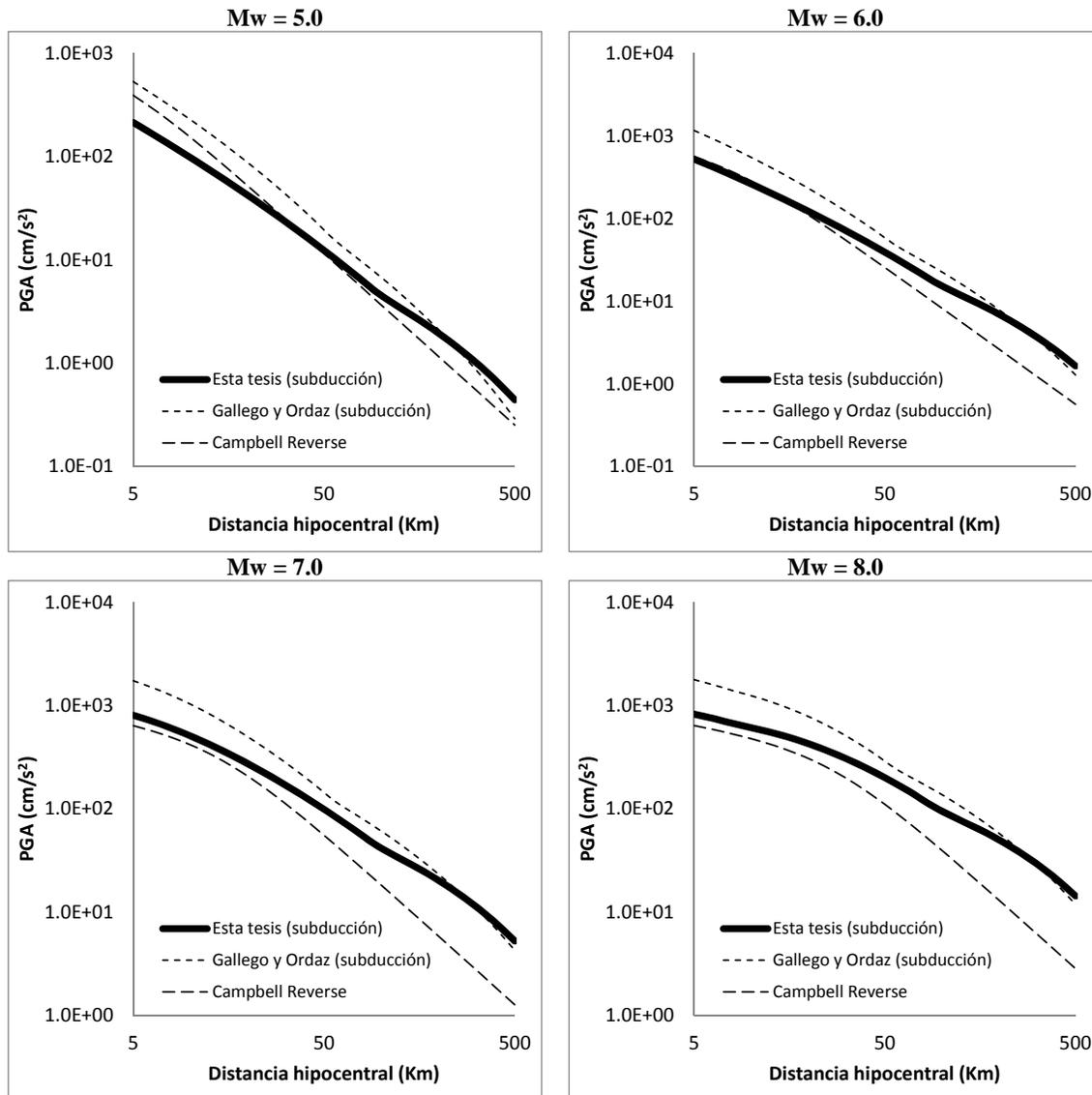


Figura 3-20. Comparación de las funciones de atenuación obtenidas para sismos de subducción con aquellas usadas en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia, para diferentes magnitudes

El modelo de espectro de fuente presentado permite entonces construir funciones de atenuación de movimiento fuerte por medio de la calibración de los parámetros sismológicos que definen la forma del EAF. Esta formulación es particularmente útil en regiones con densidad no uniforme de datos en el rango de magnitudes y distancias de aplicación. En el caso colombiano, el modelo permite estimar los momentos de probabilidad de intensidades de movimiento fuerte que son inseguras con relación a los datos acelerográficos existentes, y que tienen desviaciones estándar aceptables. Este caso de estudio constituye un ejemplo de aplicación exitosa de la metodología propuesta, la cual debe ser probada en otros territorios, con ambientes tectónicos diferentes, con el fin de comprobar su versatilidad.

3.4 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA DE COLOMBIA

Se evaluó la amenaza sísmica de Colombia a nivel de roca firme, siguiendo el procedimiento presentado en el capítulo 2 y el modelo de atenuación desarrollado en esta tesis. El modelo de fuentes empleado ha sido tomado del Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS

2010, Salgado et.al. 2010). Se tienen un total de 39 fuentes, 31 de las cuales son de tipo cortical, y 8 de subducción. En la Tabla 3-6 se presentan los parámetros de sismicidad asignados a las fuentes sismogénicas colombianas. La Figura 3-21 presenta la geometría de las fuentes de tipo cortical y la Figura 3-22 la geometría de las fuentes de tipo subducción.

Tabla 3-6. Parámetros de sismicidad asignados a las fuentes sismogénicas colombianas. Tomado de AIS, 2010.

Fuente	M_0	λ	β	$CV \beta$	M_u
Arco de Dabeiba	4	2.63	1.80	0.091	6.9
Bahía Solano	4	2.98	1.30	0.086	7.5
Benioff Intermedia Sur	4	1.85	3.85	0.070	8.0
Benioff Intermedia Centro	4	5.80	1.49	0.061	8.0
Benioff Intermedia Norte	4	2.17	1.91	0.100	8.0
Benioff Profunda	4	5.70	2.02	0.062	7.5
Boconó	4	4.93	2.03	0.066	7.4
Bucaramanga Santa Marta Norte	4	0.13	1.33	0.440	6.5
Bucaramanga Santa Marta Centro	4	0.87	2.27	0.160	6.5
Bucaramanga Santa Marta Sur	4	0.93	3.31	0.154	6.9
Cauca	4	5.00	2.62	0.066	7.5
Cimitarra	4	0.59	2.97	0.196	6.5
Compresión Caribe SE	4	0.59	1.65	0.196	6.5
Compresión Carive SW	4	0.70	2.29	0.179	6.1
Cuiza	4	0.76	1.74	0.171	6.6
Espíritu Santo	4	0.22	2.04	0.333	6.5
Fallas del Magdalena	4	0.28	1.10	0.288	7.0
Frontal Cordillera Oriental Norte	4	1.48	1.50	0.122	8.0
Frontal Cordillera Oriental Centro	4	2.61	1.50	0.091	8.0
Frontal Cordillera Oriental Sur	4	2.37	2.26	0.090	8.0
Garrapatas	4	0.26	3.00	0.302	6.5
Ibagué	4	0.26	1.58	0.302	6.9
Junín	4	0.15	2.19	0.408	7.0
Murindó	4	3.59	1.44	0.078	7.5
Nido de Bucaramanga	4	32.10	1.88	0.026	6.5
Normal Panamá Pacífico	4	2.20	1.83	0.100	7.1
Oca	4	1.63	2.06	0.116	6.5
Palestina	4	0.98	1.69	0.151	6.5
Perijá	4	0.59	3.07	0.196	6.5
Puerto Rondón	4	0.24	1.80	0.316	6.7
Romeral	4	0.54	2.03	0.119	7.6
Romeral Norte	4	0.46	1.88	0.223	6.5
Salinas	4	1.63	1.91	0.116	6.5
Suárez	4	1.33	2.47	0.129	6.5
Subducción Norte	4	3.15	1.33	0.083	8.6
Subducción Centro	4	2.46	1.29	0.094	8.6
Subducción Sur	4	16.30	1.95	0.036	8.9
Uribante-Caparro	4	0.87	1.60	0.160	7.0

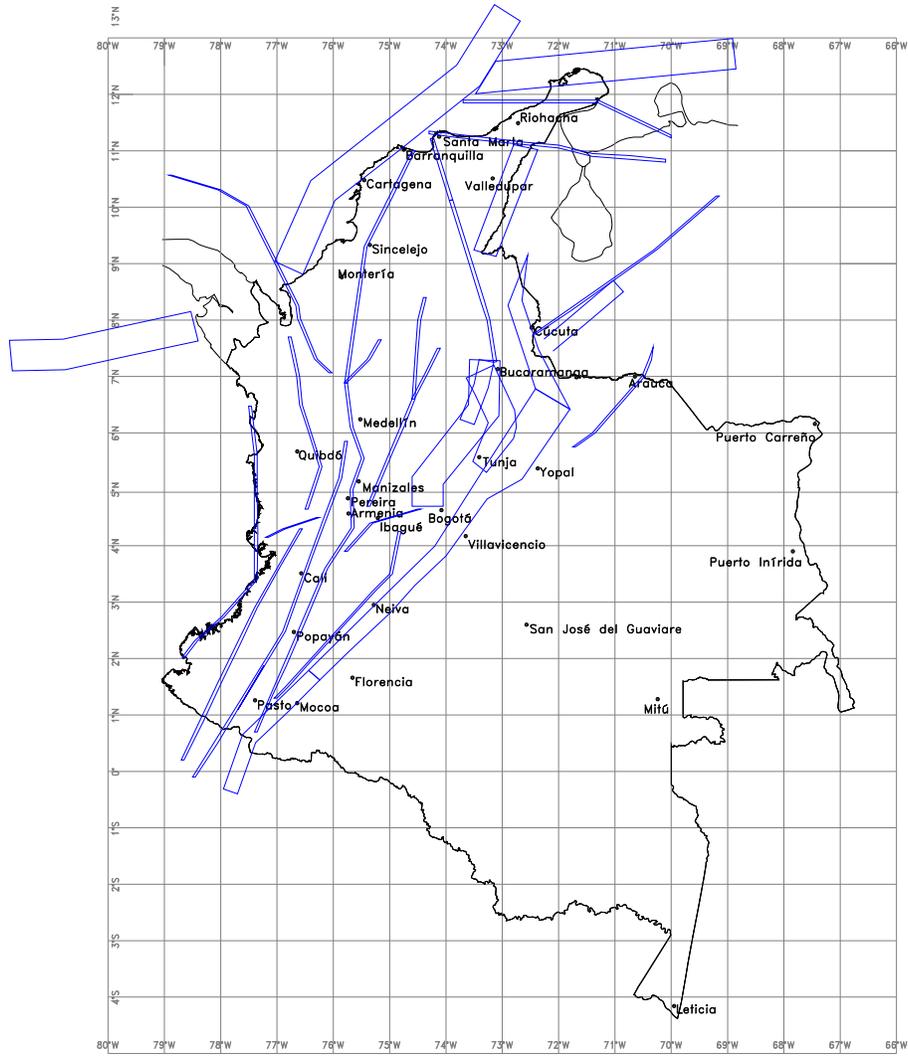


Figura 3-21. Geometría de las fuentes sísmicas corticales en Colombia. Tomado de AIS, 2010.

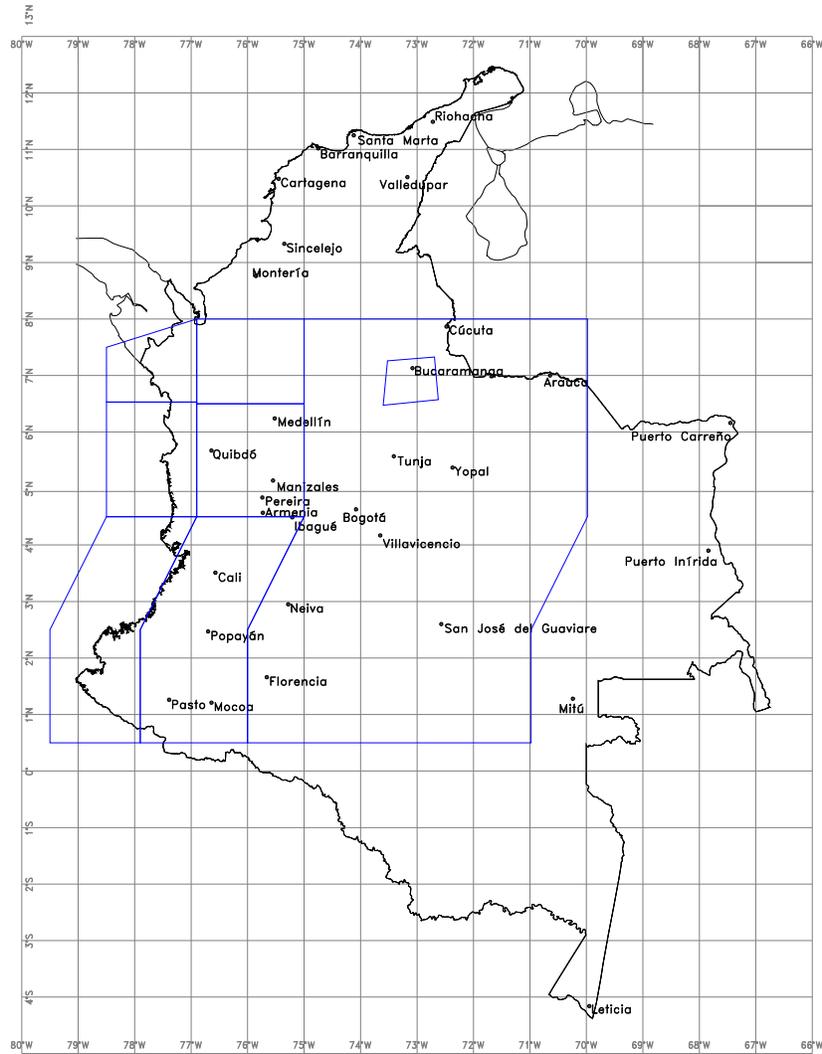


Figura 3-22. Geometría de las fuentes sismogénicas de subducción en Colombia. Tomado de AIS, 2010.

La amenaza o el peligro sísmico se expresa, entonces, en términos de la tasa de excedencia de valores dados de intensidad sísmica. Si se leen los valores de intensidad correspondientes a valores fijos de tasa de excedencia (o alternativamente periodos de retorno) en cada uno de los nodos de la malla de cálculo, es posible generar mapas de amenaza sísmica. La Figura 3-23 presenta el mapa de amenaza uniforme para Colombia, en términos del PGA, para 500 años de periodo de retorno. En el Anexo B de este documento, se presenta el conjunto de mapas de amenaza sísmica generado para Colombia, en particular mapas de amenaza uniforme en términos de PGA para 100, 250, 500, 1000 y 2500 años de periodo de retorno, y mapas en términos de la aceleración espectral, para 500 años de periodo de retorno y para periodos estructurales de 0.15, 0.3, 0.5, 1.0, y 2.0 segundos.

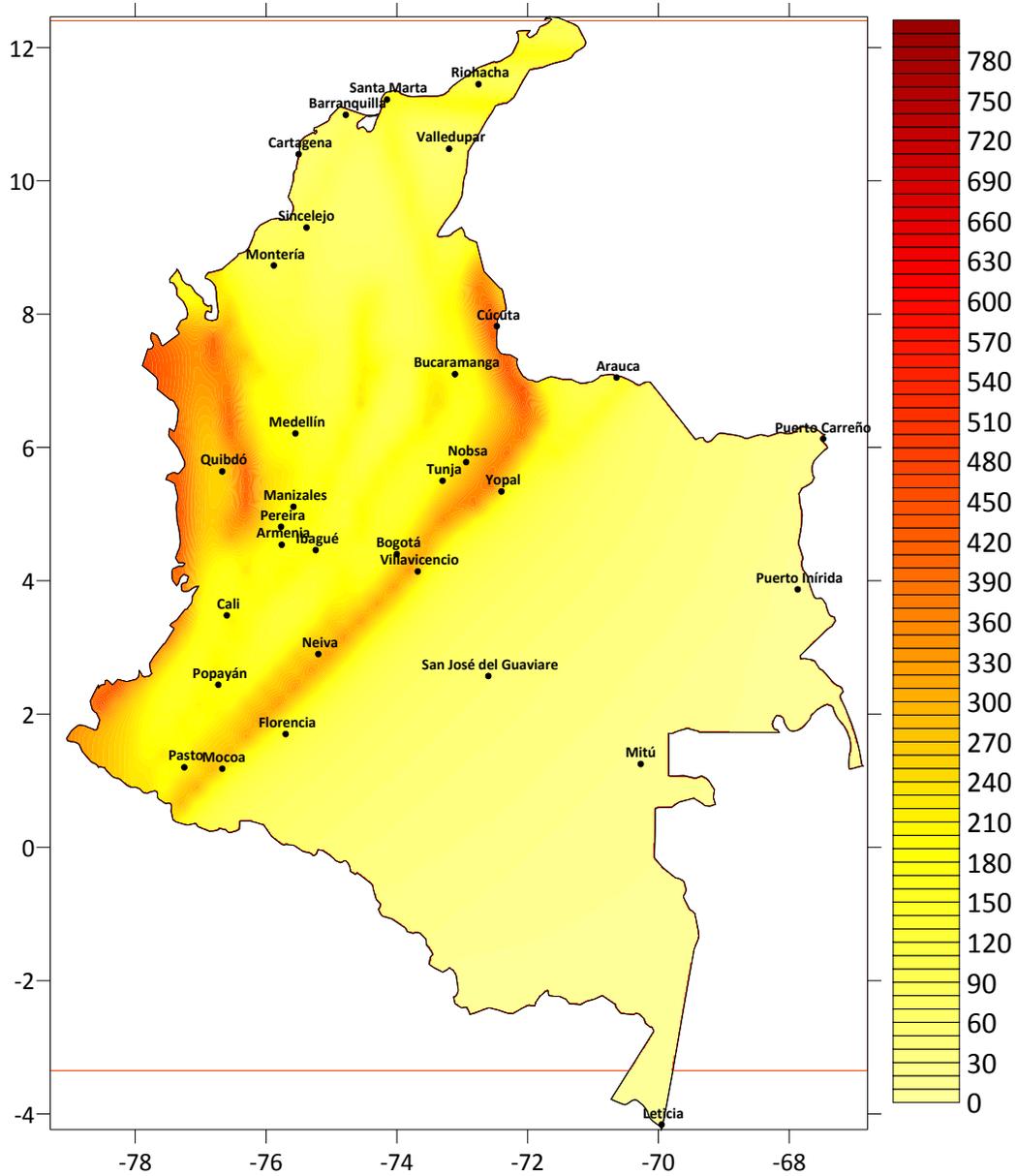


Figura 3-23. Mapa de amenaza en términos de PGA (cm/s^2) para 500 años de periodo de retorno.

Los resultados se obtienen también para ubicaciones seleccionadas dentro del área urbana de las capitales de departamento en Colombia. La Figura 3-24 muestra el valor calculado de PGA para 475 años de periodo de retorno. Por su parte la Figura 3-25 presenta una comparación entre los valores de PGA calculados en esta tesis y los exigidos en la Norma Colombiana de Construcciones Sismo Resistentes – NSR 10 (AIS, 2010) para el diseño estructural de edificaciones nuevas (coeficiente Aa). Finalmente, la Figura 3-26 y la Figura 3-27 muestran los espectros de amenaza uniforme para varias ciudades seleccionadas en Colombia.

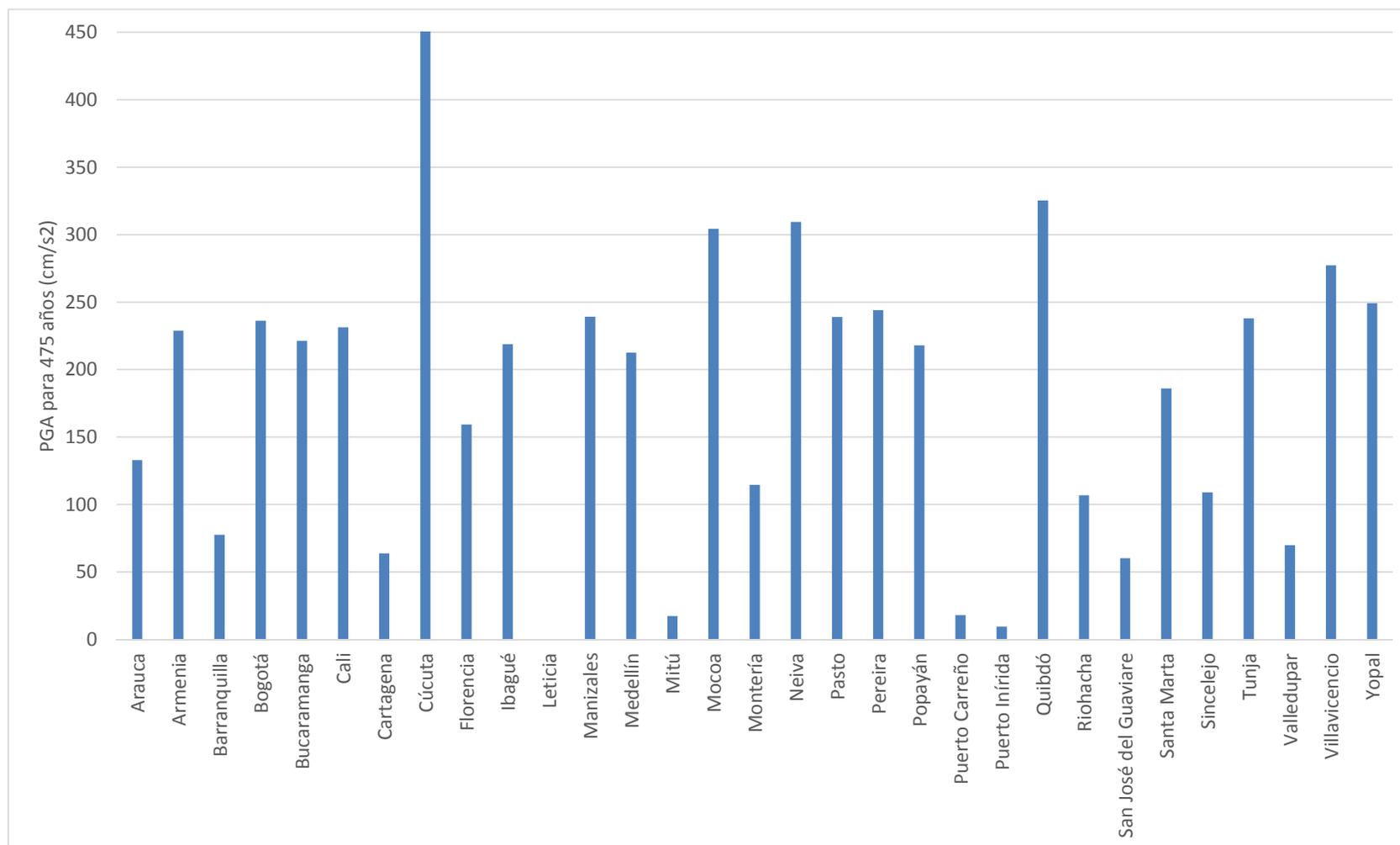


Figura 3-24. PGA para 475 años de periodo de retorno, calculado en las ciudades colombianas capitales de departamento.

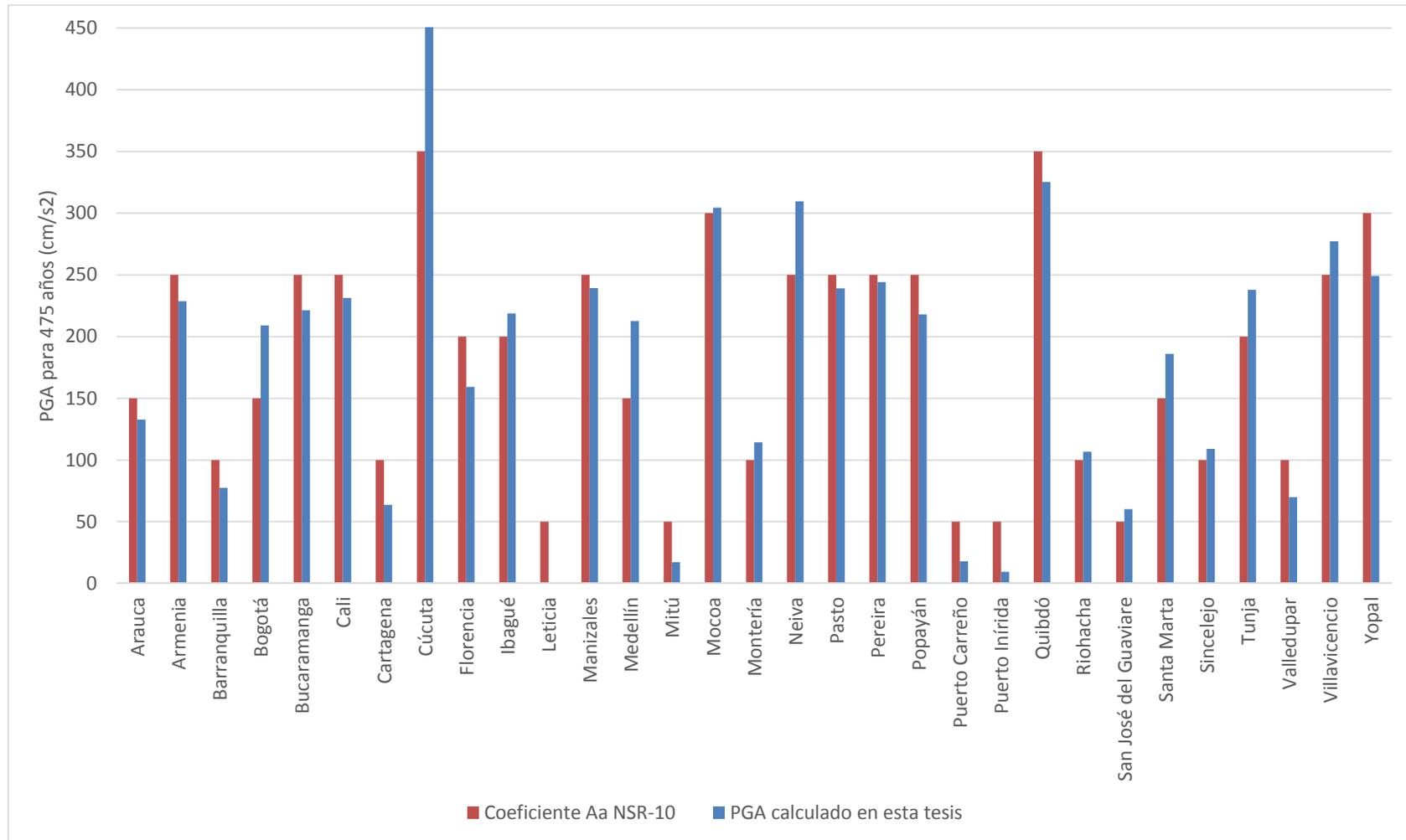


Figura 3-25. Comparación del PGA para 475 años de periodo de retorno, calculado en esta tesis, con el coeficiente Aa exigido por la NSR-10.

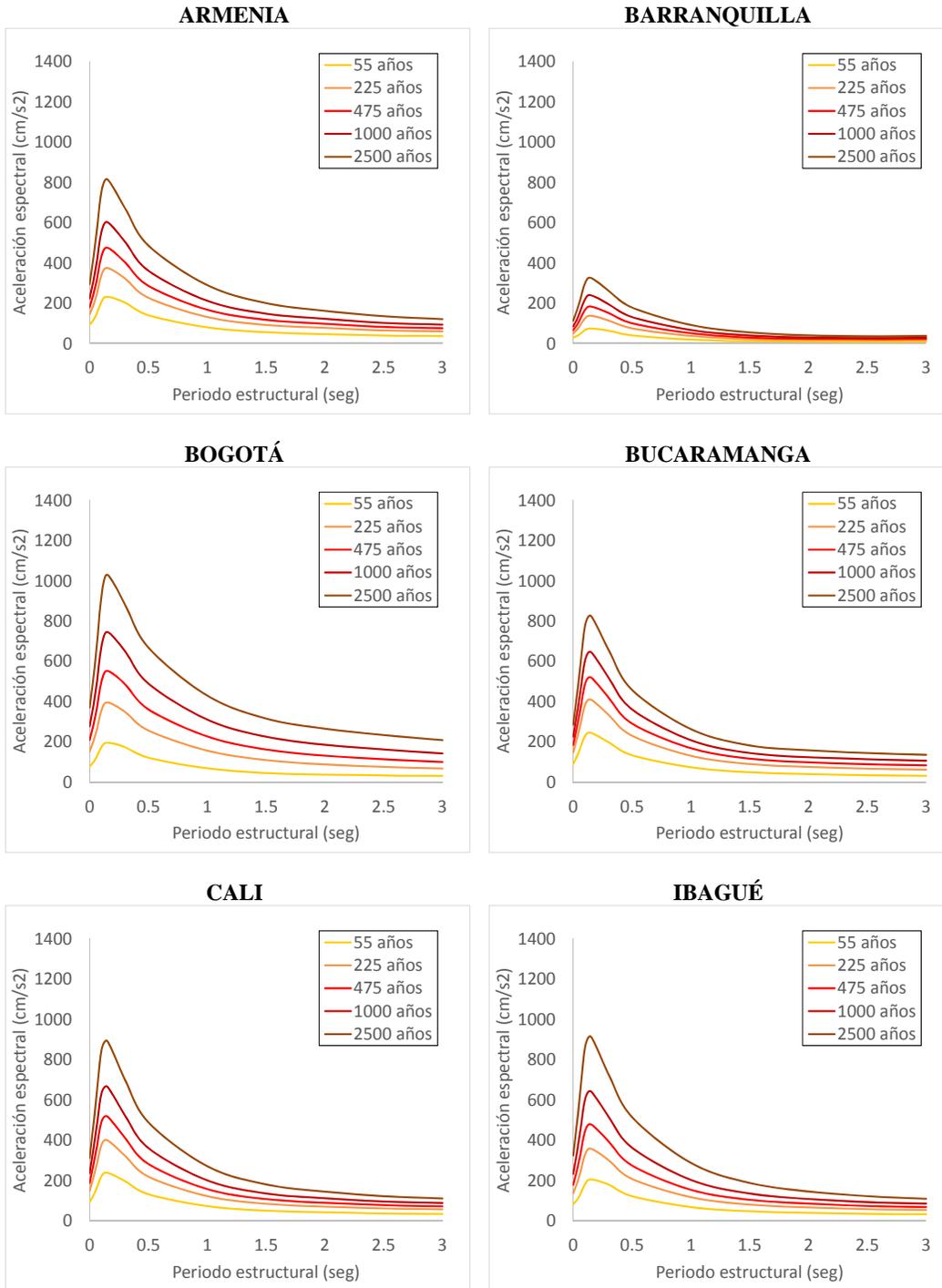


Figura 3-26. Espectros de amenaza uniforme para ciudades seleccionadas.

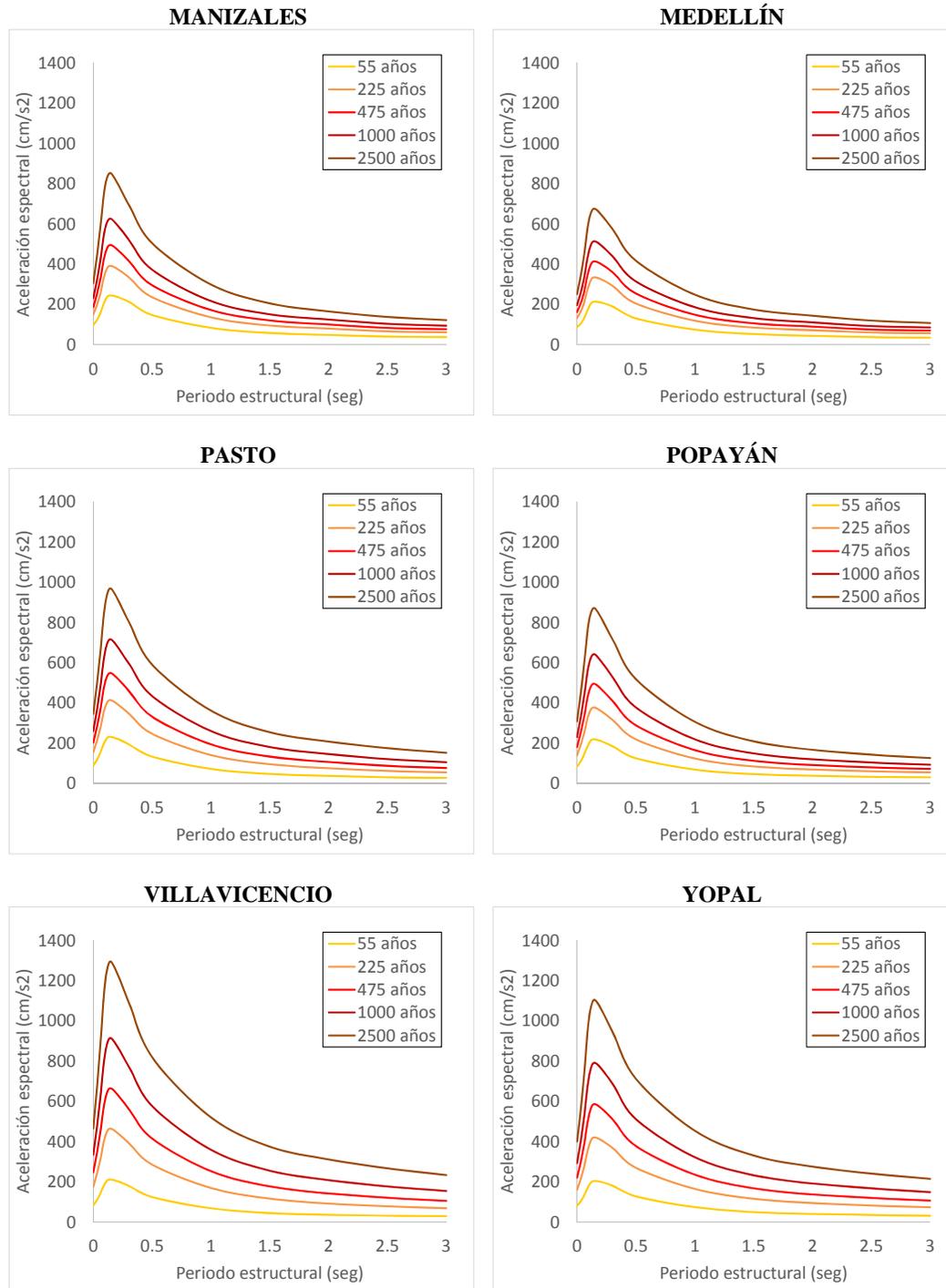


Figura 3-27. Espectros de amenaza uniforme para ciudades seleccionadas.

Los resultados presentados muestran, en términos de probabilidad, las intensidades sísmicas que puede esperarse que ocurran en cualquier ubicación dentro del territorio colombiano. Estos resultados son de gran utilidad para la definición de coeficientes sísmicos de diseño para edificaciones e infraestructura. Las normas de construcción deben basar sus requerimientos de diseño en estudios de amenaza que provean resultados como los aquí presentados. La selección del periodo de retorno de diseño está asociada con la aversión al riesgo que tiene la sociedad. En

el caso colombiano, por ejemplo, las edificaciones se diseñan, por ley, para aceleraciones sísmicas con 475 años de periodo de retorno, lo cual corresponde a una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años. Esto quiere decir que, en un lapso de tiempo de 50 años se espera que se superen, con 10% de probabilidad, las aceleraciones para las cuales la estructura funciona dentro de su rango elástico. Más allá del rango elástico, se espera que ocurran daños estructurales y no estructurales en la construcción, pero sin colapso. Es este el nivel de riesgo sísmico, desde una perspectiva de la ingeniería estructural, que la sociedad colombiana ha aceptado. Es evidente entonces la importancia de un enfoque probabilista de evaluación de la amenaza con fines de toma de decisiones.

La evaluación de la amenaza sísmica aquí presentada fue adoptada por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica para la definición de coeficientes de diseño dentro de la versión más reciente del Código Colombiano de Puentes (AIS e INVIAS, 2014). En general puede observarse que los resultados se encuentran en el mismo orden de magnitud que los valores contenidos en la norma NSR-10 (ver Figura 3-25).

3.4.1 REPRESENTACIÓN POR ESCENARIOS

Adicionalmente a los resultados anteriores, con fines de evaluación del riesgo, la amenaza sísmica debe representarse por medio de una colección de escenarios, tal y como se indica en la sección 2.1.1. de este documento. En este caso, se definieron un total de 22324 escenarios de amenaza, cada uno calculado para 11 medidas de intensidad, que corresponden a aceleraciones espectrales para periodos estructurales de 0.0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 segundos. Cada escenario, en cada medida de intensidad, contiene dos mallas de valores que corresponden a la mediana y a la desviación estándar del logaritmo natural de la aceleración. Estas mallas dan cuenta de la variación espacial de la aceleración tras la ocurrencia de un sismo.

Con el fin de incluir de manera directa el resultado de la evaluación de la amenaza en el cálculo del riesgo, manteniendo de manera rigurosa la representación por escenarios, dicho resultado debe almacenarse en el formato AME (Torres et.al. 2013), el cual es un formato raster multicapa diseñado específicamente para amenazas naturales. Los cálculos fueron realizados en el programa CRISIS 2007 (Ordaz et.al. 2007). En este caso, se emplea el formato .AME Paramétrico. Este tipo de no almacena valores de intensidad, sino que almacena parámetros para poder reconstruir los valores de intensidad asociados a un escenario, cuando el usuario lo necesite. Esto produce archivos de tamaño muy reducido, aunque la evaluación de intensidad en tiempo real es relativamente lenta. Algunos de los parámetros necesarios para reconstruir la intensidad son: la magnitud del sismo, su posición focal, las ecuaciones de atenuación que deben usarse y el tamaño de la ruptura.

En la Figura 3-28 se presentan los epicentros de los terremotos incluidos en el conjunto de escenarios. La ubicación está, por supuesto, condicionada a la geometría de las fuentes sismogénicas. A modo de ejemplo, de la Figura 3-29 a la Figura 3-31 se presenta la distribución espacial de la mediana de PGA para tres escenarios seleccionados al azar dentro del conjunto.

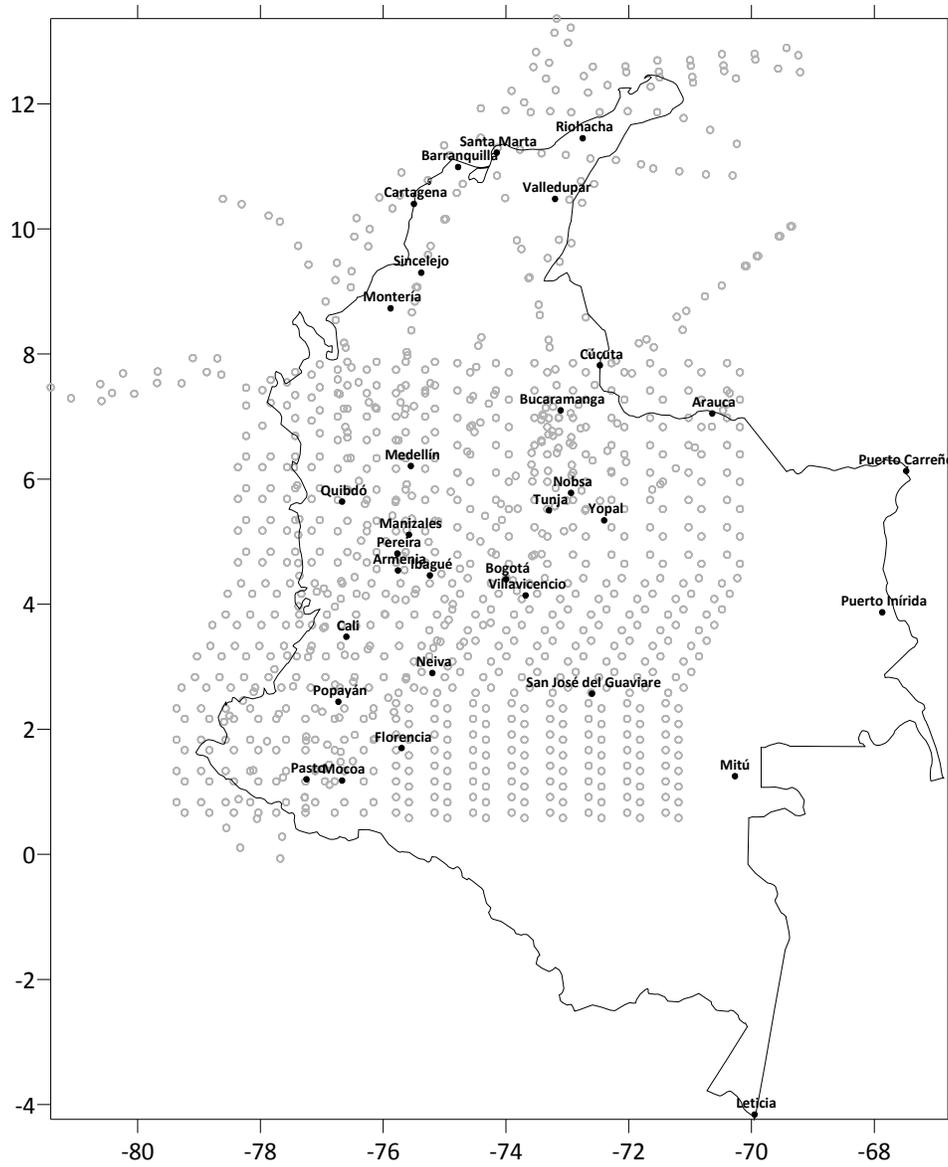


Figura 3-28. Epicentros de los terremotos incluidos en la colección de escenarios.

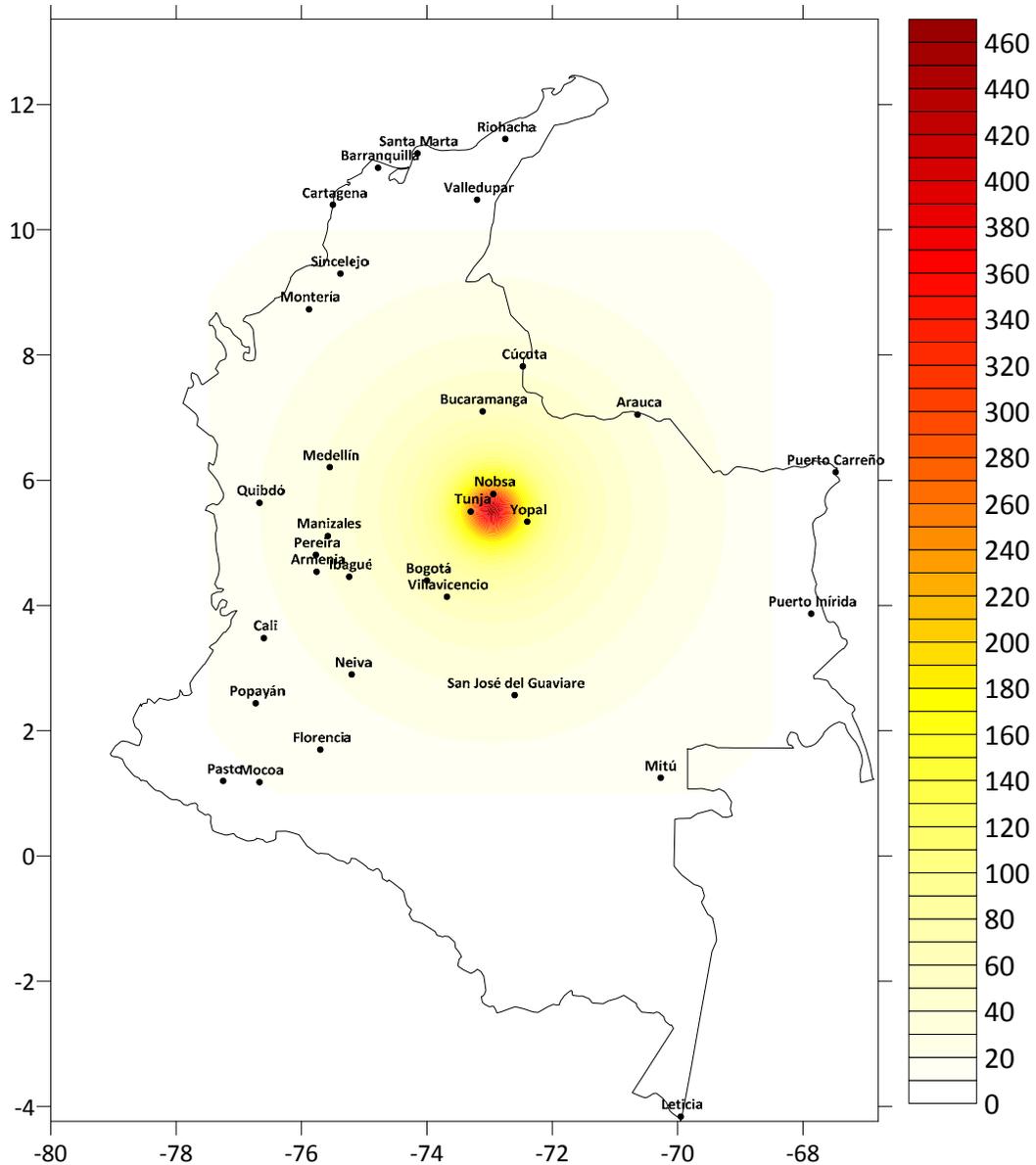


Figura 3-29. Distribución espacial de la mediana de PGA (cm/s²) para un terremoto de magnitud 7.8 ocurriendo en la falla Frontal de la Cordillera Oriental.

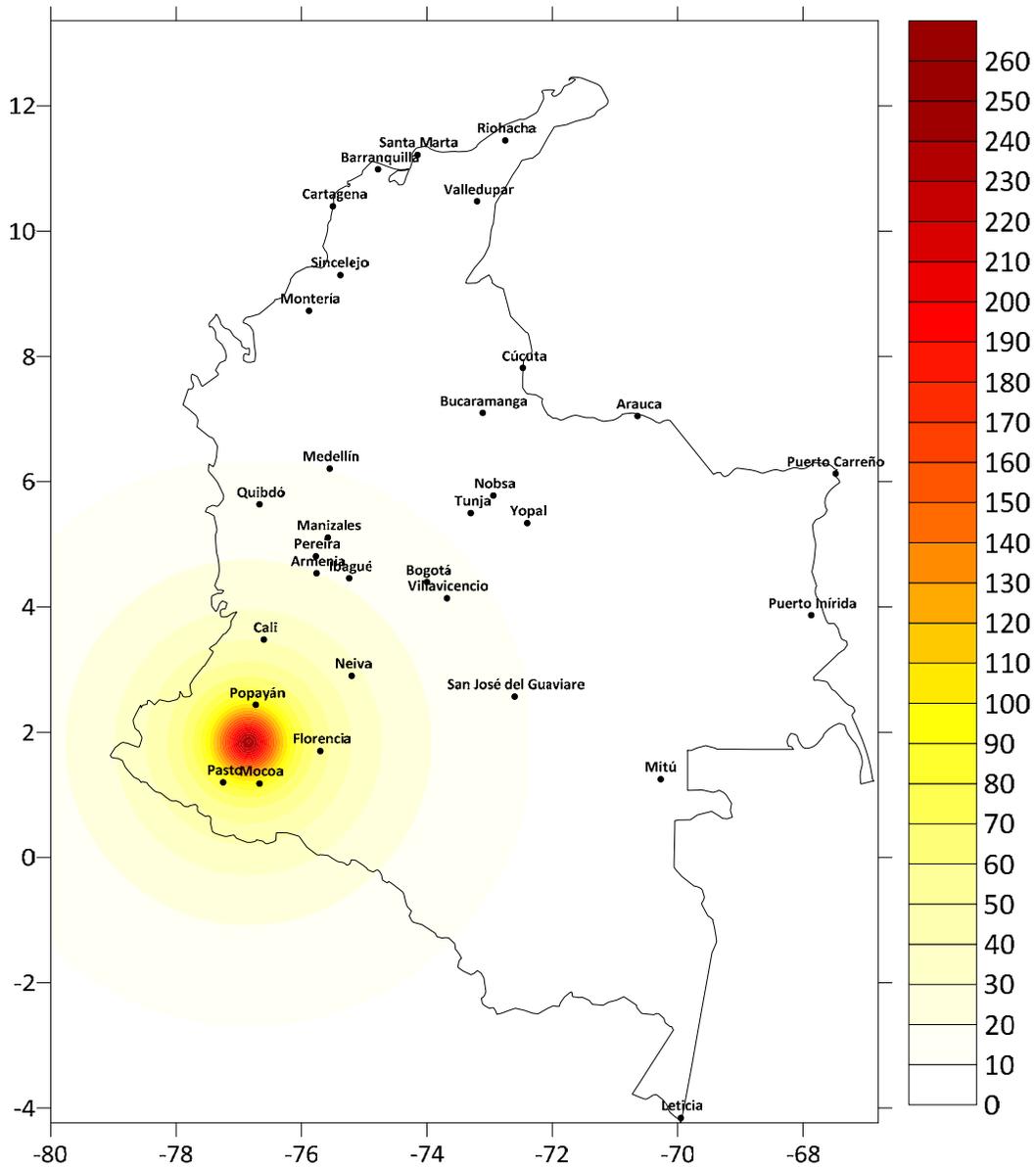


Figura 3-30. Distribución espacial de la mediana de PGA (cm/s²) para un terremoto de magnitud 7.4 ocurriendo en la falla Romeral.

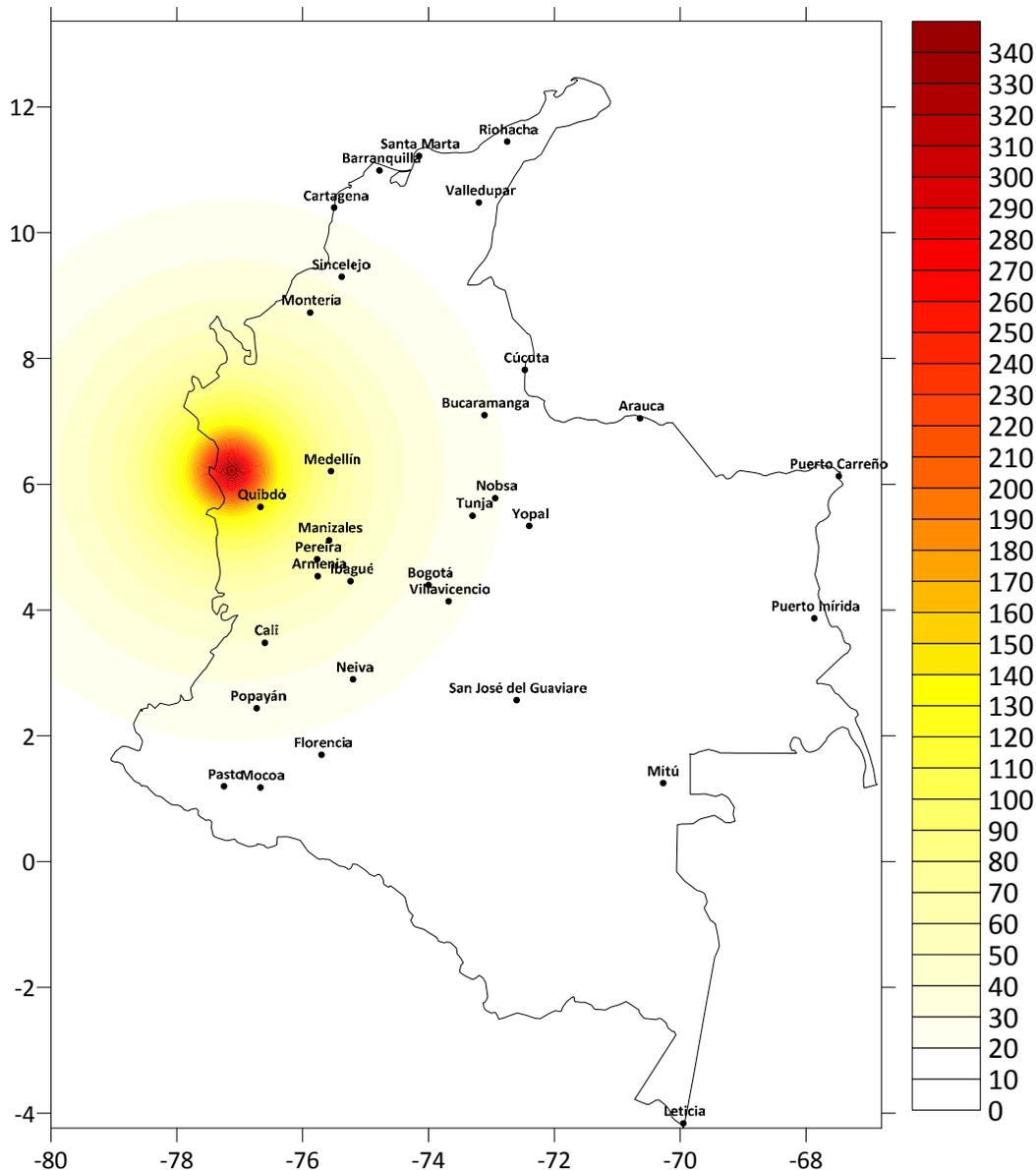


Figura 3-31. Distribución espacial de la mediana de PGA (cm/s²) para un terremoto de magnitud 8.3 ocurriendo en la zona de Subducción.

Esta representación de la amenaza por escenarios, permite proceder al cálculo del riesgo de manera directa, conociendo de antemano los elementos expuestos y su vulnerabilidad. Es posible también obtener los resultados de amenaza sísmica integrada, es decir las curvas de amenaza en cada ubicación del territorio, directamente del conjunto de escenarios sísmicos. Es, por lo tanto, una representación más integral de la amenaza del territorio colombiano, dado que provee más información acerca del potencial de ocurrencia de terremotos.

CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTO PARA LA DEFINICIÓN DE UN MODELO INTEGRAL DE EFECTOS DE SITIO EN CIUDADES

La respuesta dinámica de los suelos genera grandes diferencias tanto en amplitud como en el contenido frecuencial de registros de movimiento fuerte en superficie, en comparación con las señales a nivel de roca firme. Los cambios en las señales sísmicas generados por la propagación de onda en los estratos de suelo inciden directamente en las solicitaciones y el comportamiento de las edificaciones ante un terremoto. Por esta razón para generar diseños adecuados en el desarrollo de obras civiles en países con amenaza sísmica alta o intermedia es de vital importancia estimar los efectos de amplificación o deamplificación sísmica generados por los estratos de suelo que componen el perfil estratigráfico.

En décadas pasadas, se han desarrollado estudios de microzonificación sísmica en varias ciudades alrededor del mundo, los cuales cuantifican el efecto de los suelos blandos que conforman la geología superficial de las ciudades, en la amplificación de la intensidad de movimiento fuerte, y usualmente definen coeficientes sísmicos de diseño para la construcción de edificaciones nuevas y la rehabilitación de las existentes. Es usual entonces calcular la respuesta dinámica en sitios seleccionados dentro de la ciudad, para luego interpolar esos resultados y estimar la amenaza en toda la extensión geográfica de la ciudad. Si bien esta es una práctica adecuada, no existe en la actualidad una manera para determinar la respuesta dinámica en cualquier ubicación de la ciudad, sin recurrir a interpolaciones y sin que esto implique multiplicar los esfuerzos de recolección de información geotécnica.

En esta tesis se plantea el desarrollo de una metodología para la evaluación de efectos de sitio en ciudades, la cual está basada en la geometría de las formaciones geológicas que dan origen a los suelos blandos. El modelo de efectos de sitio que resulta de aplicar la metodología planteada, se vuelve particularmente interesante dentro de tres aspectos asociados a la gestión del riesgo sísmico: i) para el cálculo del riesgo, de manera que se incluyan los factores de amplificación del suelo en la evaluación de las pérdidas; ii) para la implementación de sistemas automáticos de estimación de daños post-terremoto, con fines de atención a emergencias, en los cuales se requiere conocer la distribución de las intensidades de movimiento fuerte en toda la ciudad (shakemap); y iii) para adelantar estudios de microzonificación sísmica que regulen el diseño y construcción de edificaciones sismo-resistentes. Esta metodología es aplicada en esta tesis a la ciudad de Bogotá, junto con sus tres aplicaciones principales.

La metodología propuesta es resumida en 7 pasos:

1. *Evaluación de la amenaza sísmica a nivel de roca firme:* La amenaza sísmica, a nivel de roca firme, debe evaluarse de manera detallada para la ciudad. Para esta evaluación se emplean funciones de atenuación basadas en formulaciones del espectro de fuente radiado y un modelo de fuentes y sismicidad adecuado para la ciudad.
2. *Definición de la geometría de los contactos geológicos:* Con base en la información geológica y geofísica disponible, se define la topografía de los contactos geológicos, a partir de la cual es posible construir un modelo geométrico tridimensional que permite establecer la profundidad total de los depósitos en cada punto dentro de la ciudad, así como la profundidad de los contactos geológicos que marcan las variaciones en los materiales de los suelos.
3. *Definición de la geometría de las condiciones de borde:* Como condiciones de borde se entienden la topografía y la profundidad del nivel freático. La topografía marca la ubicación espacial de la superficie del terreno, de manera que constituye el límite superior del modelo geométrico. El nivel freático, por su parte, establece la geometría de la tabla de agua en la

ciudad, la cual es necesaria para establecer en cada localización las condiciones de saturación y confinamiento del suelo.

4. *Información geotécnica:* Es importante la recolección de información geotécnica por medio de una campaña de estudios de campo que incluya una serie de perforaciones en diferentes ubicaciones de la ciudad bajo análisis. Los estudios geotécnicos deben ser detallados de manera que se cuente con información suficiente para la caracterización de las propiedades índice, estáticas y dinámicas de los suelos.
5. *Definición de tipos de suelo de análisis:* Se define un tipo de suelo único para cada formación geológica. Los tipos de suelo representan la variación en profundidad de los momentos estadísticos de todas las propiedades geotécnicas. Estas propiedades son modeladas como variables aleatorias de distribución normal. Los momentos estadísticos son obtenidos de análisis estadísticos sobre la información geotécnica disponible. Adicionalmente, para cada propiedad geotécnica se calcula la matriz de correlación, la cual da cuenta de la correlación en profundidad de los valores de la propiedad.
6. *Definición de la malla de cálculo:* Una malla de cálculo se define sobre la ciudad. La malla de cálculo debe estar contenida por la extensión de la capa de información geológica más pequeña.
7. *Construcción de estratigrafías sintéticas:* En cada nodo de la malla de cálculo, se construye un conjunto de estratigrafías sintéticas, con base en la geometría de las formaciones geológicas y en la información geotécnica de la ciudad. Cada elemento del conjunto es una estratigrafía simulada del sitio, caracterizada por una secuencia de valores de propiedades geotécnicas generados aleatoriamente. Dado que las propiedades geotécnicas están correlacionadas en profundidad, la secuencia de valores generados aleatoriamente es multiplicada por la matriz triangular resultante de aplicar la descomposición de Cholesky a la matriz de correlación, resultando una secuencia de valores correlacionados.

En función de la aplicación específica que se le dé al modelo, se requiere de pasos complementarios, que se listan a continuación. Las posibles aplicaciones son: i) la obtención de funciones de transferencia del espectro de respuesta para análisis de riesgo (pasos 8 y 9), ii) el desarrollo de un sistema de generación de shakemaps con fines de respuesta a emergencias (paso 8), y iii) la microzonificación sísmica de la ciudad y obtención de espectros elásticos de diseño sismo-resistente (pasos 8 al 11).

8. *Evaluación de la respuesta dinámica:* Se generan EAF teóricos de aceleración para un rango de magnitudes y distancias hipocentrales, haciendo uso de un modelo de espectro de fuente. Luego, para cada estratigrafía sintética se calcula la respuesta dinámica no lineal unidimensional, siguiendo la metodología lineal equivalente. El resultado son los EAF de aceleración a nivel de superficie del terreno, en cada nodo de la malla.
9. *Cálculo de funciones de transferencia:* Para varios niveles de PGA en la base de cada estratigrafía sintética, se calcula la relación entre el espectro de respuesta en superficie y en roca, para diferentes valores de periodo estructural y un coeficiente de amortiguamiento del 5%. Con esto se construye una capa de efectos de sitio para el análisis de riesgo que permite incorporar la respuesta dinámica del suelo en la evaluación de pérdidas económicas.
10. *Cálculo de funciones de atenuación:* Para cada nodo de la malla, se calcula una función de atenuación usando los EAF calculados en el paso anterior. Estos EAF son modificados por la función de transferencia de un oscilador de un grado de libertad, de manera que, usando teoría de vibraciones aleatorias, es posible construir funciones de atenuación en términos del espectro de respuesta de aceleración.

11. *Cálculo de la amenaza sísmica en cada sitio:* Se calcula un espectro de amenaza uniforme en cada nodo de la malla, haciendo uso de las funciones de atenuación particulares para cada sitio, de manera que se obtiene la intensidad de movimiento fuerte asociada a 475 años de periodo de retorno (o para cualquier otro periodo de retorno), para cada diferentes periodos fundamentales de vibración de las estructuras. Para este cálculo se usa el mismo modelo de fuentes y sismicidad que para el paso 1.
12. *Armonización de los espectros:* A partir de los espectros de amenaza uniforme, se definen espectros de diseño compatibles con la normativa aplicable, y se obtienen los valores de los parámetros asociados al suelo de los espectros de diseño, para cada nodo de la malla de cálculo. Esto deriva en una representación espacial de los parámetros que controlan la forma final de los espectros de diseño de edificaciones nuevas.

4.1 ASPECTOS METODOLÓGICOS FUNDAMENTALES

En la aplicación de la metodología propuesta, existen aspectos de carácter fundamental que deben ser tratados con cuidado. Estos aspectos tienen que ver con la construcción de estratigrafías sintéticas, la evaluación de la incertidumbre asociada a la respuesta del suelo, y la construcción de funciones de atenuación específicas de cada sitio.

4.1.1 CONSTRUCCIÓN DE ESTRATIGRAFÍAS SINTÉTICAS

El modelo de análisis de microzonificaciones sísmicas propuesto en esta tesis se basa principalmente en la construcción de estratigrafías sintéticas. Estas estratigrafías son la base para la evaluación de la respuesta dinámica de los suelos blandos. La correcta aplicación de esta metodología depende en gran medida de la correcta definición de las estratigrafías.

Las estratigrafías se construyen en función del modelo geológico tridimensional y de los tipos de suelo definidos para cada formación geológica. Los tipos de suelo representan la variación en profundidad de los momentos estadísticos de todas las propiedades geotécnicas. Esto quiere decir que las propiedades geotécnicas se modelan como variables aleatorias. Las propiedades geotécnicas incluidas en el modelo son:

- Contenido de humedad
- Límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico)
- Propiedades índice calculadas de los límites de Atterberg (índice de plasticidad e índice de liquidez)
- Peso específico
- Velocidad de onda de cortante

Se definen entonces los siguientes parámetros, en función de la profundidad, para cada una de las propiedades listadas: valor esperado, varianza, límite mínimo y límite máximo. Con estos parámetros se define una distribución de probabilidad normal truncada para cada propiedad. Esto permite simular estratigrafías en cada sitio de cálculo. La simulación de estratigrafías se realiza bajo tres preceptos fundamentales que se asumen ciertos:

1. Las formaciones geológicas superficiales son las que dan origen a los depósitos de suelo blando.
2. Materiales con el mismo origen geológico tienden a tener propiedades similares, que presentan variaciones importantes en la profundidad, más no con relación a la ubicación geográfica.
3. Las propiedades geotécnicas que caracterizan los suelos tienen incertidumbre. Esta incertidumbre puede ser cuantificada mediante análisis estadísticos sobre los datos de los suelos asociados a la misma formación geológica.

Dado que, siguiendo esta metodología, la gran mayoría de los puntos de cálculo corresponden a sitios no explorados aún, la simulación de estratigrafías permite cuantificar la incertidumbre asociada a los valores asignados a las propiedades geotécnicas.

Ahora bien, se sabe que las propiedades geotécnicas están correlacionadas en profundidad, dado que si bien el depósito de suelo blando se modelo como un medio estratificado, realmente los suelos que pertenecen a la misma formación geológica no presentan estratos marcados, sino variaciones suaves en el valor de sus propiedades en profundidad. Con el fin de cuantificar el nivel de correlación en profundidad, se calcula una matriz de auto correlación C para cada propiedad geotécnica.

$$C = \begin{bmatrix} \rho_{1,1} & \rho_{1,2} & \rho_{1,3} & \dots & \rho_{1,n} \\ \rho_{2,1} & \rho_{2,2} & \rho_{2,3} & \dots & \rho_{2,n} \\ \rho_{3,1} & \rho_{3,2} & \rho_{3,3} & \dots & \rho_{3,n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{n,1} & \rho_{n,2} & \rho_{n,3} & \dots & \rho_{n,n} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 4-1})$$

C es una matriz simétrica y definida positiva de $n \times n$, en donde n es el número total de intervalos en profundidad. Los elementos de la matriz son los coeficientes de correlación entre intervalos. El coeficiente de correlación entre los intervalos i y j ($\rho_{i,j}$) se determina como,

$$\rho_{i,j} = \frac{\text{Cov}(X_i, X_j)}{\sigma_{X_i} \cdot \sigma_{X_j}} \quad (\text{Ec. 4-2})$$

en donde X es el parámetro geotécnico en consideración, $\text{Cov}(X_i, X_j)$ es la covarianza del parámetro entre los intervalos i y j , y σ_{X_i} y σ_{X_j} son las desviaciones estándar del parámetro en los intervalos i y j , respectivamente. La covarianza $\text{Cov}(X_i, X_j)$ se determina como,

$$\text{Cov}(X_i, X_j) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N (X_{i_k} - \bar{X}_i) \cdot (X_{j_k} - \bar{X}_j) \quad (\text{Ec. 4-3})$$

en donde N es el número total de muestras (sondeos reales) que tienen datos en ambos intervalos i y j .

De esta manera, una propiedad geotécnica X , queda definida por:

1. Su valor esperado, como función de la profundidad $\mu_X(z)$
2. Su varianza, como función de la profundidad $\sigma^2_X(z)$
3. Sus límites de truncamiento mínimo y máximo, como función de la profundidad $L1_X(z)$, $L2_X(z)$
4. Su matriz de auto correlación C_X

Con esta información, es posible construir estratigrafías sintéticas mediante la simulación de los valores de las propiedades geotécnicas en profundidad. Los pasos para construir una estratigrafía sintética son:

1. Se determina la profundidad total de la estratigrafía según el modelo geológico.
2. Esta profundidad se subdivide en capas de igual espesor h .

3. Para cada capa, se determinan las propiedades geotécnicas mediante la generación de un número aleatorio, siguiendo su distribución de probabilidad.
4. La secuencia de números aleatorios R que definen la variación en profundidad de una propiedad geotécnica en la estratigrafía simulada, es alterada por la matriz triangular inferior L que se define como,

$$C = L \cdot L^T \quad (\text{Ec. 4-4})$$

Se genera entonces una secuencia de números aleatorios correlacionados R_c , de la siguiente manera,

$$R_c = RL \quad (\text{Ec. 4-5})$$

La matriz L se determina aplicando el método de descomposición de Cholesky a la matriz C . El método de descomposición de Cholesky se detalla en el Anexo C.

Siguiendo los pasos anteriores, puede generarse un conjunto de muchas simulaciones de estratigrafías en cada sitio de cálculo. Esto con el fin de determinar la incertidumbre asociada a la respuesta dinámica del suelo.

4.1.2 INCERTIDUMBRE EN LA RESPUESTA DINÁMICA DEL SUELO

La evaluación de la incertidumbre en la respuesta dinámica de suelos blandos es un tema que ha sido objeto de estudio desde hace varios años y que a la fecha no ha sido resuelto del todo. En esta tesis, se sigue el enfoque propuesto por Bazurro y Cornell (2004), aplicando la modificación propuesta por Stewart y Goulet (2006), en la cual, la desviación estándar del logaritmo de la aceleración espectral en superficie $Sa^s(T)$ (en donde T es el periodo de vibración estructural) se define como,

$$\sigma_{\ln Sa^s(T)} \approx \sqrt{\sigma_{\ln Sa(T)}^2 + b_1^2 \sigma_{\ln PGA}^2 + \sigma_{\ln AF(T)}^2 + 2b_1 \rho \sigma_{\ln PGA} \sigma_{\ln Sa(T)}} \quad (\text{Ec. 4-6})$$

en donde $\sigma_{\ln Sa(T)}$ es la desviación estándar de la aceleración espectral en roca (dada por la función de atenuación), $\sigma_{\ln PGA}$ es la desviación estándar de PGA en roca (dada por la función de atenuación), $\sigma_{\ln AF(T)}$ es la desviación estándar asociada a la incertidumbre en la respuesta dinámica del sitio, b_1 es la pendiente de la relación entre $\ln AF(T)$ y $\ln PGA$, y ρ es el coeficiente de correlación entre los términos de aceleración espectral y PGA en roca. De esta manera es posible introducir la incertidumbre asociada a la respuesta dinámica del suelo en la función de atenuación específica de cada sitio.

4.1.3 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA

Para cada estratigrafía sintética, se calcula la respuesta dinámica unidimensional, empleando el método de análisis lineal equivalente. Este método, propuesto por Idriss y Seed (1968) y Seed e Idriss (1970) es el más empleado en la actualidad para el cálculo de la respuesta dinámica en el rango no lineal. En este método se calcula la respuesta lineal del estrato de suelo y, por medio de un proceso iterativo, se ajustan las propiedades (rigidez a cortante y amortiguamiento) en función de los modelos constitutivos de comportamiento no lineal del suelo (curvas de degradación de la rigidez y amortiguamiento). En esta tesis la respuesta elástica se calcula haciendo uso del método de la matriz propagadora de Thompson-Haskell (Thompson 1950, Haskell 1953), mediante el cual se calculan las funciones de transferencia lineales del espectro de Fourier para un medio estratificado. Este método provee una solución eficiente computacionalmente en el dominio de la frecuencia. El método de la matriz propagadora de Thompson-Haskell se detalla en el Anexo D.

El modelo lineal equivalente consiste en una modificación del modelo de Kelvin-Voigt para tener en cuenta algunos tipos de no linealidades. La no linealidad y el comportamiento de esfuerzo deformación de los suelos es modelado como el de un material con rigidez degradante descrita por la curva de Ramberg y Osgood (1943) (ver Figura 4-1). El módulo de corte equivalente, G , es tomado como el módulo secante G_{SEC} , que depende de la amplitud de deformación cortante γ . Como se muestra en la Figura 4-1, G_{SEC} para un ciclo histerético simétrico controlado por deformación es,

$$G_{SEC} = \frac{\tau_C}{\gamma_C} \quad (\text{Ec. 4-7})$$

En donde τ_C y γ_C son el esfuerzo y la deformación cortante respectivamente. El amortiguamiento con respecto al crítico en el modelo lineal equivalente β , se calcula para obtener la misma pérdida de energía en un ciclo de carga a la que se presenta en un ciclo de histéresis del suelo.

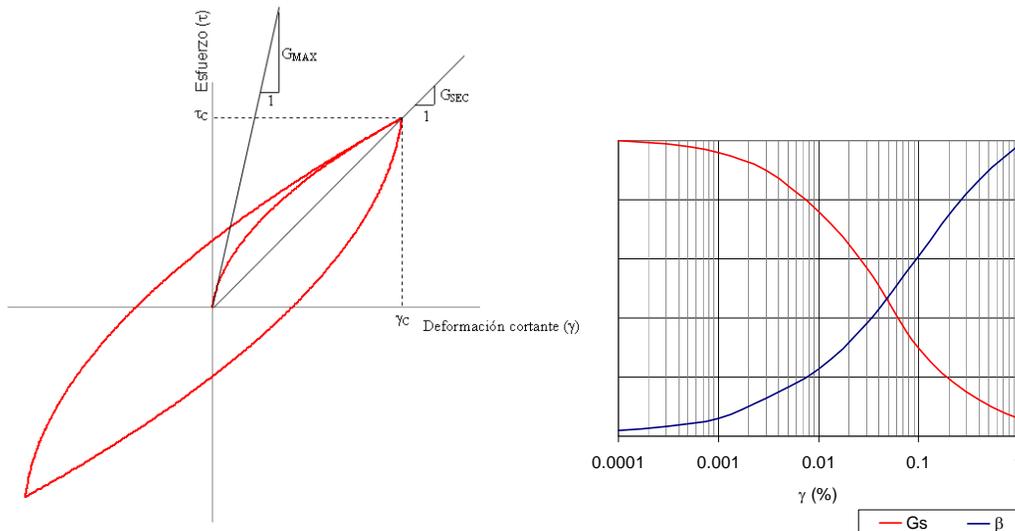


Figura 4-1. Curvas del modelo lineal equivalente

Las hipótesis generales en las que se basa el modelo lineal equivalente son las siguientes:

1. Los estratos de suelo se extienden uniformemente y hasta el infinito en dirección horizontal y la capa inferior es el semiespacio infinito.
2. La respuesta principal del depósito de suelo es la producida por la propagación vertical de ondas de cortante (SH) provenientes de la formación de roca subyacente.
3. Las propiedades no lineales del suelo se modelan a través de sistemas lineales equivalentes. Cada estrato que se modela es homogéneo e isotrópico y se caracteriza por su densidad de masa, espesor, módulo de corte y factor de amortiguamiento y por las características de degradación de estas últimas propiedades con la deformación por cortante.

Mediante el procedimiento descrito, se propagan verticalmente las ondas SH inducidas por el movimiento fuerte (EAF en la base del depósito) por una columna de material estratificado para la cual se conocen todas sus características dinámicas. El resultado es la obtención de los EAF a nivel de superficie del terreno, junto con la función de transferencia de la columna de suelo, $H_s(f)$.

De esta manera se obtienen la respuesta sísmica en cada una de las estratigrafías sintéticas definidas en el modelo.

4.1.4 FUNCIONES DE ATENUACIÓN ESPECÍFICAS DE CADA SITIO

Una vez calculada la incertidumbre asociada a la respuesta dinámica del suelo en los sitios de cálculo, es posible generar funciones de atenuación que involucren esta incertidumbre junto con las características de amplificación propias del sitio. Esto permitirá realizar un análisis de amenaza sísmica en cada ubicación con el fin de obtener espectros de amenaza uniforme.

Para este fin se emplea el modelo del EAF radiado que ha sido calibrado en esta tesis. Este modelo permite establecer el EAF teórico, dados un momento sísmico y una distancia hipocentral. Dicho EAF teórico es entonces empleado para calcular la respuesta dinámica de la columna de suelo del sitio particular, determinando de esta manera el EAF a nivel de superficie del terreno. De este último, empleando teoría de vibraciones aleatorias, se obtiene la aceleración espectral en superficie. Esta operación se repite para todo el juego de magnitudes y distancias que componen la función de atenuación a nivel de roca firme, de manera que se determina una función de atenuación para el sitio. Finalmente, para cada periodo estructural considerado, se le asocia a la función de atenuación su valor de desviación estándar calculado como se indica en la ecuación 32.

El procedimiento se repite para todos los sitios de cálculo. Estas funciones de atenuación están definidas entonces en términos de aceleraciones espectrales para varios periodos estructurales, y se debe calcular una por cada mecanismo focal de importancia en el territorio de análisis.

4.1.5 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL ESPECTRO DE RESPUESTA

Para el análisis de riesgo, es relevante conocer el factor de amplificación que la columna de suelo induce a las aceleraciones espectrales en roca firme. Con este fin, se calculan funciones de transferencia del espectro de respuesta en cada ubicación.

Con los pares magnitud-distancia definidos por las funciones de atenuación específicas de cada sitio, se establecen los espectros de respuesta correspondientes en la base y en la superficie del depósito. La función de transferencia, $AF(T)$, se define entonces como el cociente entre las aceleraciones espectrales en superficie y las aceleraciones espectrales en roca, es decir,

$$AF(T) = \frac{S_a^s(T)}{S_a(T)} \quad (\text{Ec. 4-8})$$

Esto deriva en una función de transferencia del espectro de respuesta, para cada estratigrafía simulada y para cada par magnitud-distancia.

4.2 CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE EFECTOS DE SITIO PARA BOGOTÁ

Con el fin de implementar y probar la metodología propuesta, se presenta en esta sección la construcción de un modelo de efectos de sitio para la ciudad de Bogotá, capital de Colombia. La ubicación de la ciudad en el contexto nacional se presenta en la Figura 4-2.



Figura 4-2. Ubicación de Bogotá en Colombia

Bogotá es la ciudad más grande y poblada de Colombia, con una población estimada de 7.776.845² habitantes. Tiene una longitud de 33 km de sur a norte, y 16 km de oriente a occidente. Está organizada como Distrito Capital, gozando de autonomía para la gestión de sus intereses dentro de los límites de la Constitución colombiana. A diferencia de otros Distritos en Colombia, Bogotá se considera una entidad territorial de primer orden, es decir, tiene las mismas atribuciones administrativas que la ley le confiere a los Departamentos. Está constituida por 20 localidades y es el epicentro político, económico, administrativo, industrial, artístico, cultural, deportivo y turístico del país.

Está ubicada en el centro de Colombia, dentro de la región conocida como la sabana de Bogotá, la cual hace parte del altiplano cundiboyacense, que es una formación montañosa de meseta ubicada en la cordillera Oriental de los Andes, a una altitud promedio de 2625 metros sobre el nivel del mar.

4.2.1 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA SÍSMICA A NIVEL DE ROCA FIRME

Se evaluó la amenaza sísmica a nivel de roca firme para la ciudad de Bogotá, siguiendo el procedimiento presentado en el capítulo 2 y el modelo de atenuación desarrollado en esta tesis, así como el modelo de fuentes y sismicidad empleado para el cálculo en todo el territorio colombiano (ver capítulo 3). La Figura 4-3 presenta el mapa de PGA para 475 años de periodo de retorno en Bogotá.

² Según "Estimación y proyección de población nacional, departamental y municipal total por área 1985-2020". Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE.

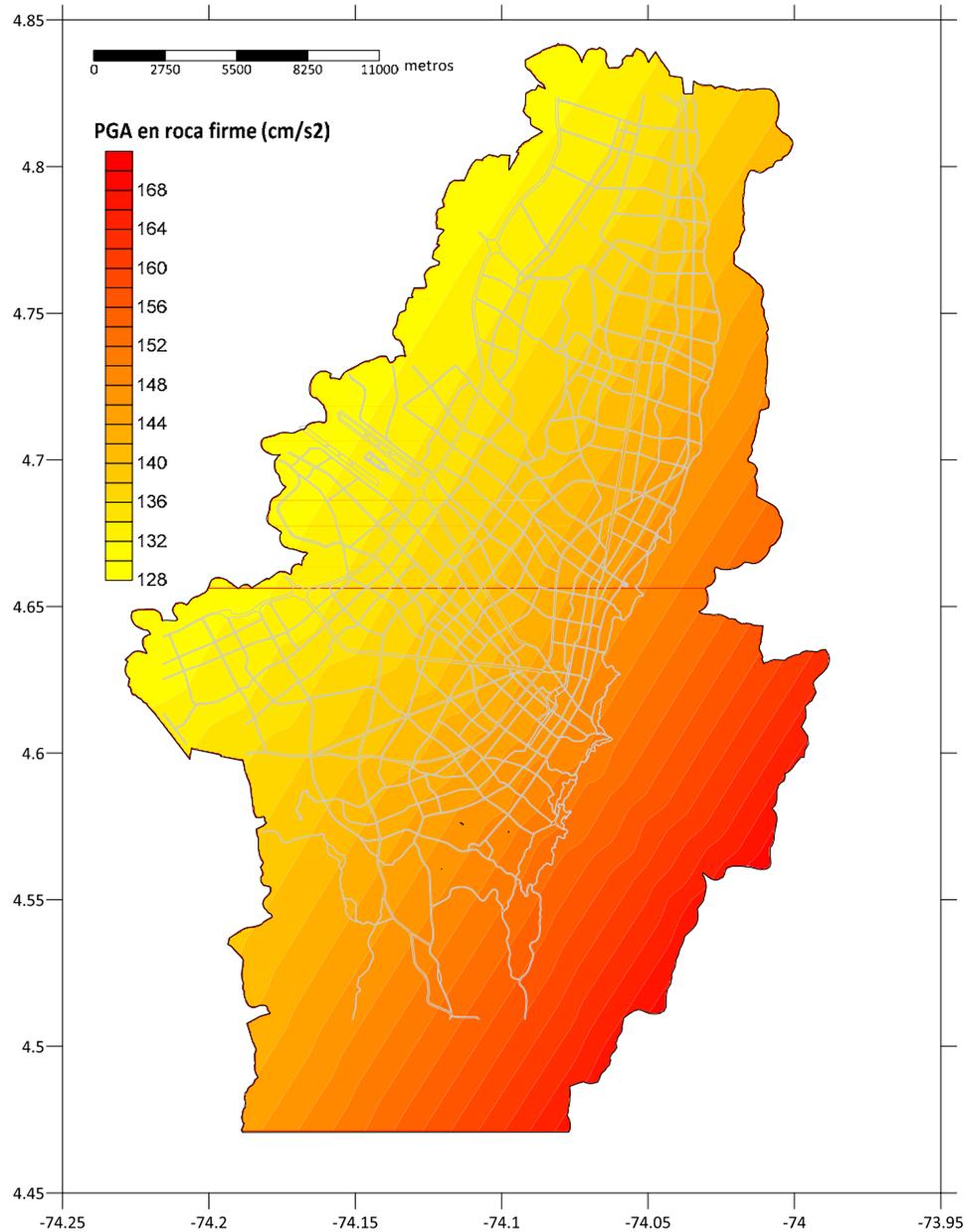


Figura 4-3. Mapa de amenaza uniforme en roca en términos PGA. 475 años de periodo de retorno

4.2.2 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA DE LOS CONTACTOS GEOLÓGICOS

En términos generales, los suelos blandos de Bogotá provienen de depósitos de tipo aluvial y lagunar, en donde se destacan las formaciones Subachoque, Río Tunjuelito, Sabana y Chía. En esta tesis, la geometría del entorno geológico se asocia principalmente a las formaciones Subachoque y Sabana, por ser las de mayor diferenciación de características geotécnicas dentro del área urbana de la ciudad.

Según Helmens y Van der Hammen (1995), la formación Subachoque está constituida por material fino, arcillas arenosas, orgánicas y turbas-lignitas, que se alternan con arenas arcillosas

y gravas. Los sedimentos provienen principalmente de un depósito fluvio-glacial, alterado por procesos fluviales y lacustres. La formación Subachoque es suprayacida por la formación Sabana, la cual constituye depósitos lacustres que afloran en toda la Sabana de Bogotá. Según Helmes y Van der Hammen (1995), esta formación está constituida principalmente por arcillas.

La geometría de los contactos geológicos de las formaciones Sabana y Subachoque se obtuvo del Modelo Geotécnico de la Sabana de Bogotá, desarrollado por la Sociedad Colombiana de Geotecnia (SCG, 2006). La Figura 4-4 presenta la geometría del contacto con roca firme, mientras que la Figura 4-5 presenta la geometría del contacto geológico Subachoque-Sabana. Por supuesto, la geometría final de la formación Sabana está dada por la topografía de la ciudad.

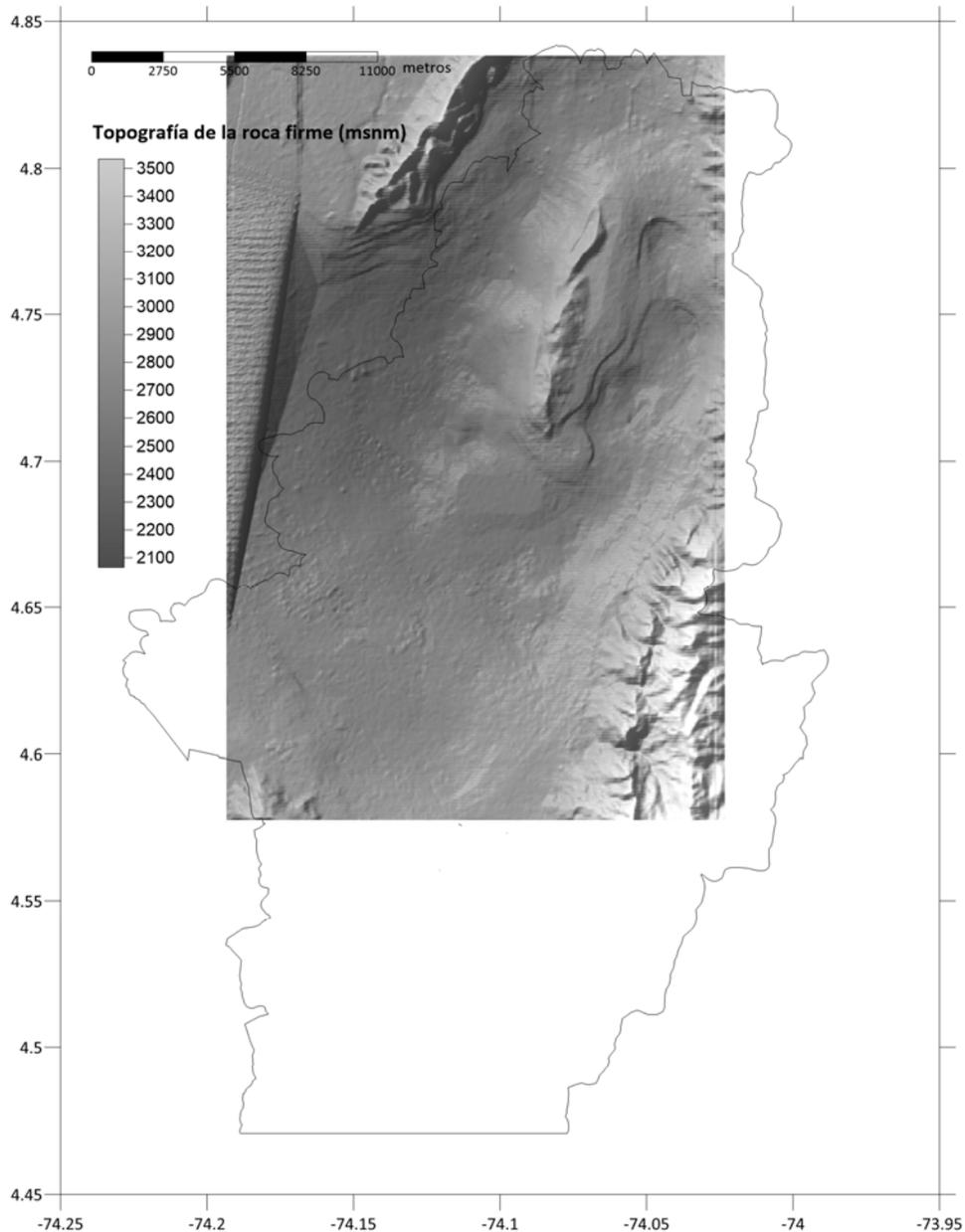


Figura 4-4. Geometría del terreno firme (roca). Escala está dada en metros sobre el nivel del mar

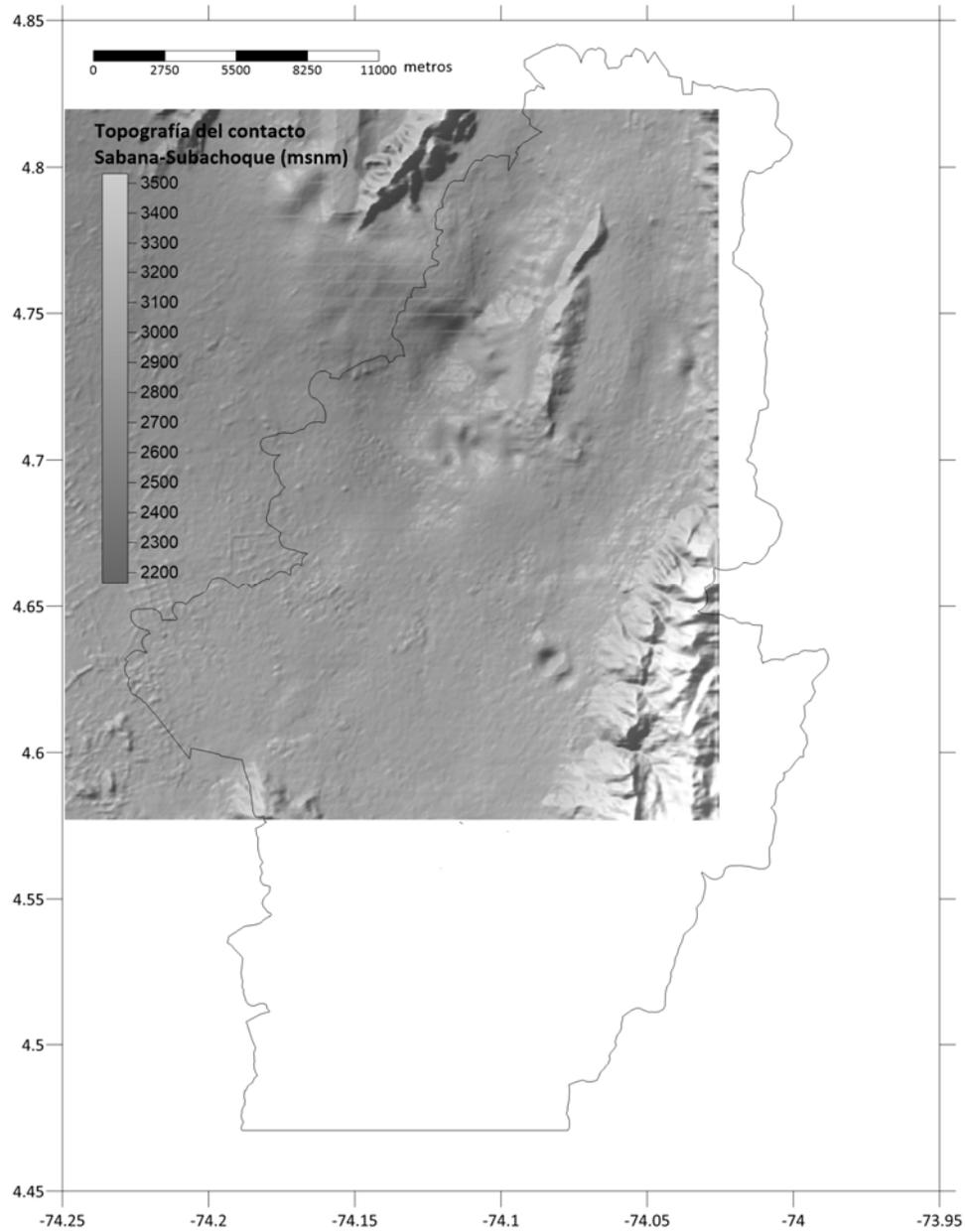


Figura 4-5. Geometría contacto Sabana-Subachoque. Escala está dada en metros sobre el nivel del mar

De la información geométrica empleada se determinó el contorno de afloramiento de roca firme en la ciudad (ver Figura 4-6).

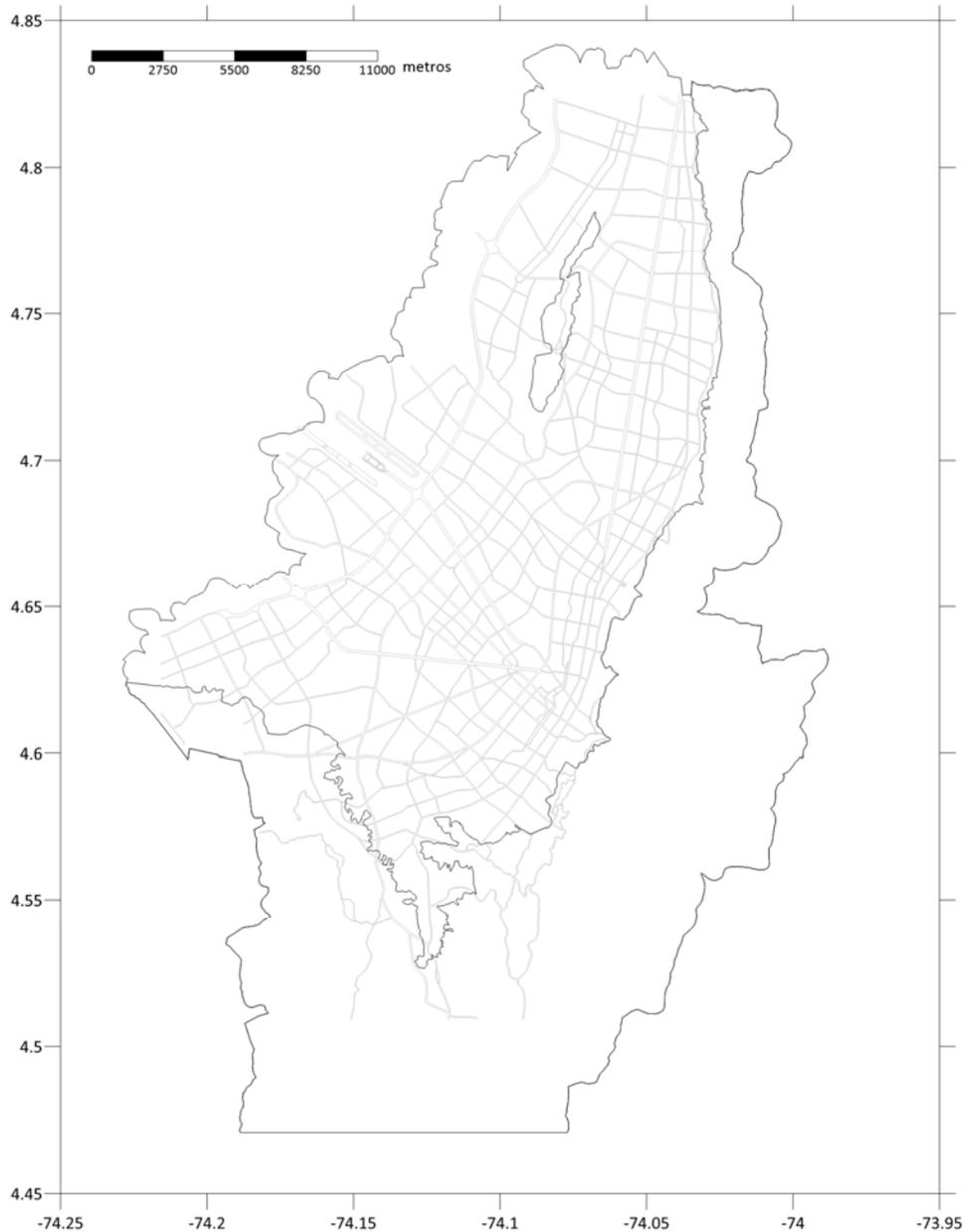


Figura 4-6. Contorno de afloramiento de roca firme.

4.2.3 CONDICIONES DE BORDE

Las condiciones de borde, como se entienden en esta metodología, corresponden al límite superficial de la geometría del depósito, es decir, la topografía, y a la localización del nivel freático. La Figura 4-7 presenta la topografía empleada en esta tesis, la cual tiene una resolución espacial de 90 m. Para el caso de la geometría de la tabla de agua, se calculó una malla de valores mediante la interpolación de los datos de profundidad medidos en los sondeos disponibles, siguiendo la metodología Krigging. La Figura 4-8 muestra la profundidad estimada el nivel freático en la ciudad, aplicada solamente a la extensión geográfica en donde hay datos disponibles.

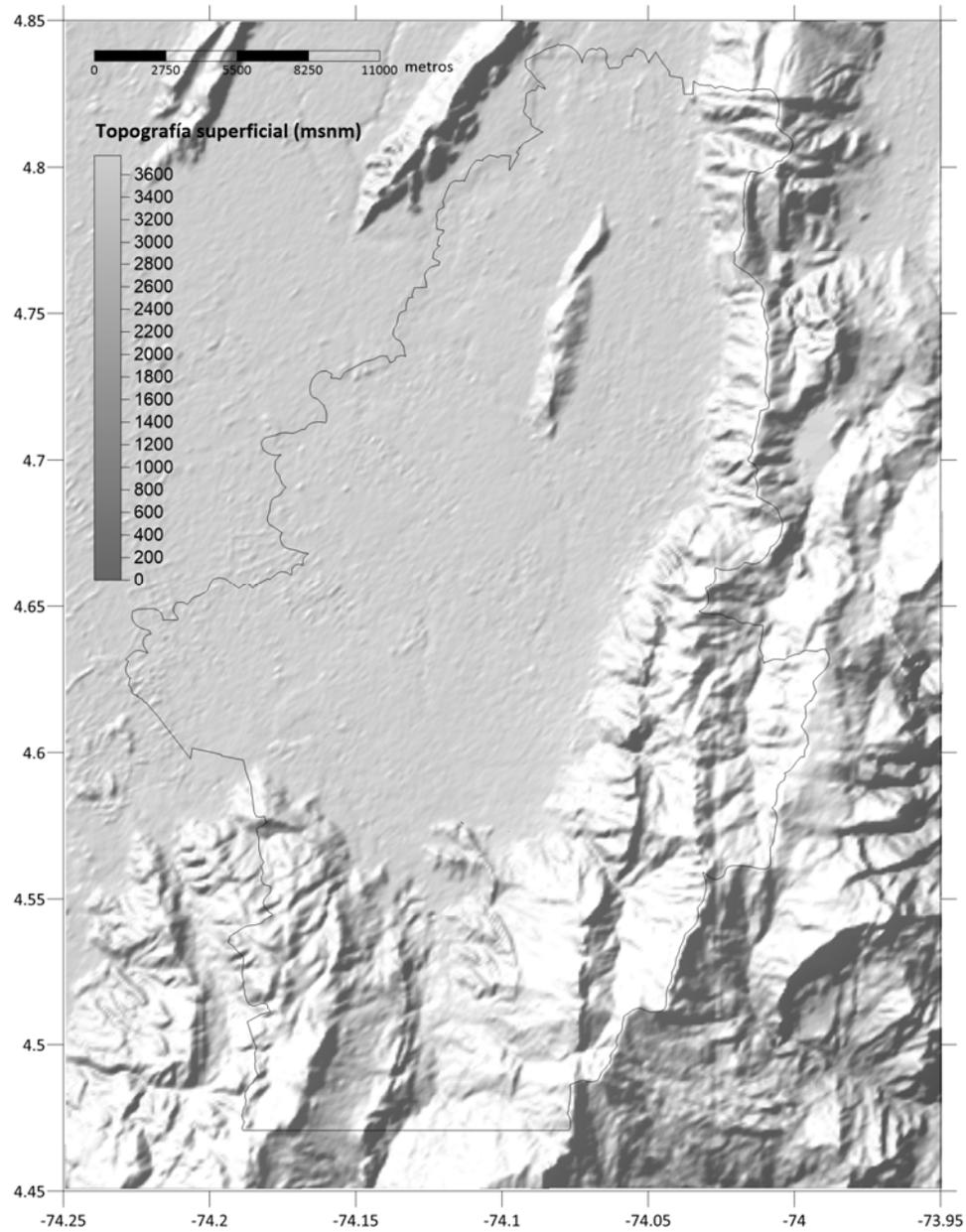


Figura 4-7. Topografía empleada. Escala está dada en metros sobre el nivel del mar.

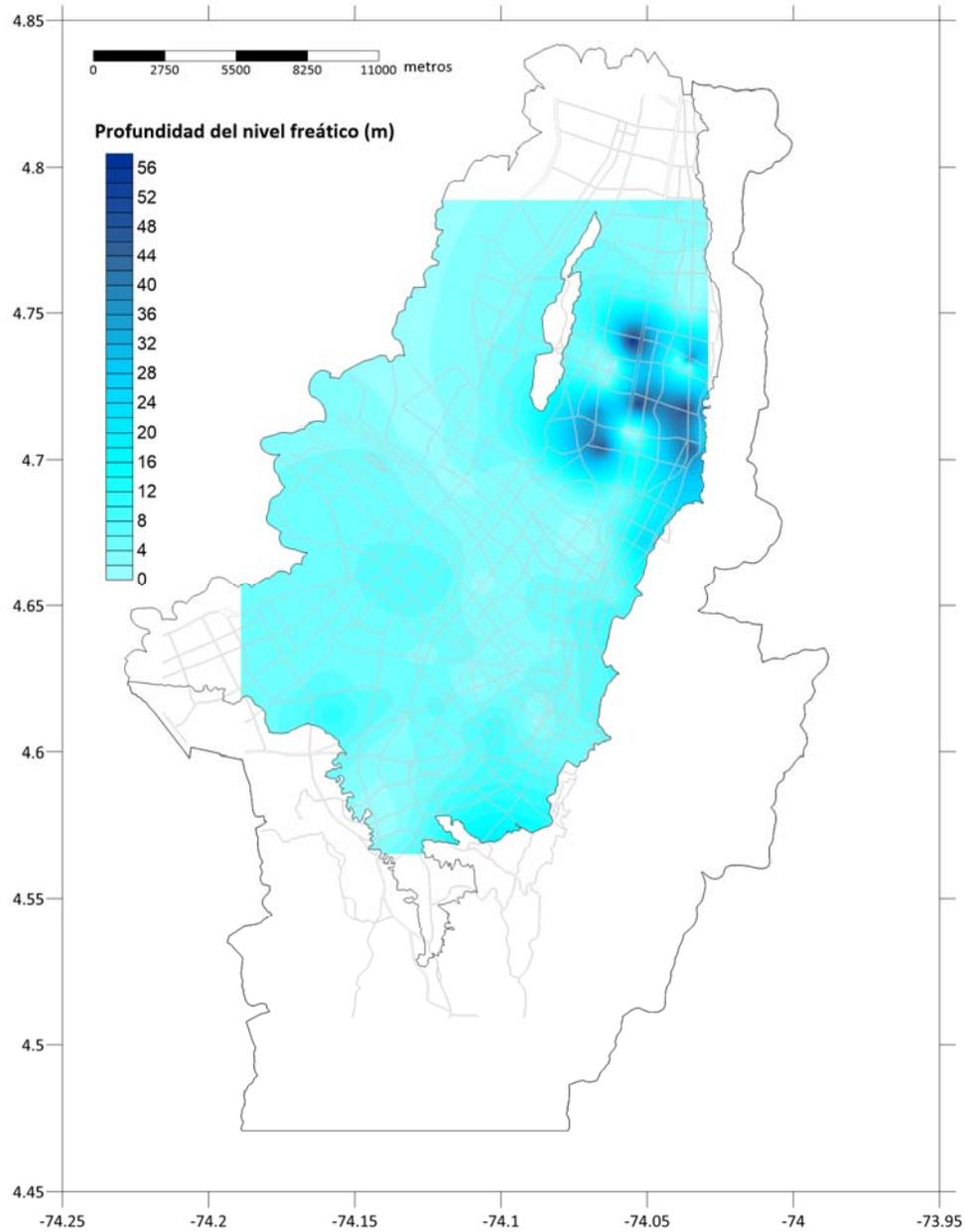


Figura 4-8. Profundidad del nivel freático.

4.2.4 INFORMACIÓN GEOTÉCNICA

La ciudad de Bogotá cuenta con una serie de estudios geotécnicos detallados, resultantes de campañas de levantamiento de información asociadas a los estudios de microzonificación sísmica, Metro y estudios de respuesta local. Esta información es centralizada por la DPAE en lo que se conoce como la Base de Datos Geotécnica de Bogotá. Los datos empleados en este estudio corresponden a los utilizados en el Estudio de Actualización de la Microzonificación Sísmica ejecutado por la Universidad de los Andes (2006).

De los cerca de 200 sondeos existentes en la ciudad, se seleccionaron 84 debido a la calidad de la información contenida. Para estos 84 sondeos fue posible establecer un perfil en profundidad de propiedades índice, límites de Atterberg, peso específico y velocidad de onda de corte.

La Tabla 4-1 presenta el listado de 84 Sondeos empleados en esta tesis. Los códigos de los sondeos indican la fuente de información: N = Microzonificación Sísmica de Bogotá (1997), O = DPAE, y PA = Proyecto Metro de Bogotá. La Figura 4-9 presenta la ubicación geográfica de estos sondeos en la ciudad.

Tabla 4-1. Listado de los sondeos empleados.

Código	Nombre	Profundidad (m)	Código	Nombre	Profundidad (m)
N1	Sondeo de la Calle 170 - F.F.N.N.	46	O10	Calle 134 con Cra 46A	46
N2	Sondeo de Jardines de Paz	48	O11	Carrera 9 N° 151-52	40
N4	Sondeo Club Suboficiales	49	O15	Carrera 68B N° 43B-20	50
N5	Sondeo Cll. 100 Autonorte	49	O17	Sondeo Biblioteca UNAL	50
N9	Sondeo Autonorte - Calle 127	26	O20	Urbanización Mazurén	32
N9A	Sondeo Cll. 126 - Cra. 29	182	O22	Urbanización Cerros del Country	12
N13	Sondeo Clínica Corpas	47	O23	Edificios Teusacá	22
N14	Sondeo Av. Cundinamarca	229	O27	Icata	42
N17	Sondeo Bochica Norte	46	O28	Hacienda el Cedro - E 425	96
N19	Sondeo Barrio El Luján	47	O29	Edificio Karon Real	22
N20	Sondeo Cll. 68 Cra. 82	19	O32	Urbanización Lago de Córdoba	48
N21	Sondeo Terminal de Transportes	91	O33	Hotel Cosmos Suites - E 410	20
N22	Cll. 13 Av. Boyacá	23	O34	Edificio EAAB- E 348	48
N23	Av. 68 Av. Americas	46	O37	Padua	50
N24	Centro Comercial Plaza de las Americas	18	O38	Edificio Av.9 con calle 125	45
N25	Plazoleta Banderas Av. Americas	18	O39	Urbanización Atalaya de Iberia	37
N26	Barrio Patio Bonito BOSA	19	O40	Urbanización Mazurén	56
N27	Parque Timiza	120	O41	Country Reservado	49
N28	Autopista Sur Av. 68	48	PA1	Sondeo Cll. 68 Cra. 110	100
N29	Autopista Sur SOACHA	19	PA5	Sondeo Cll. 68 Cra. 91	39
N30	Autopista Sur SOACHA	18	PA7	Sondeo Cll. 68 Cra. 83	46
N31	Barrio Bosa Holanda	19	PA9	Sondeo Av. Cll. 68 Cra. 74 A	51
N33	Monumento Los Heroes	90	PA10	AvCll 68 AvBoyaca	27
N34	Escuela Militar Cll. 80	18	PA11	Sondeo Cll. 68 Cra. 66	27
N36	Cll. 63 Cra. 30	19	PA13	Sondeo Cll. 72 Av. 68	49
N37	Cll. 26 Cra. 50	48	PA14	Cll 72 Cra 50	60
N38	Cra. 53 Cll. 13	18	PA15	Sondeo Cll. 72 Cra. 45 A	50
N39	CAD Av. AmericasCra. 30	19	PA16	Cll 72 No 37-37	97
N42	Sondeo Cra. 30 - Cll. 6	19	PA17	Sondeo Cll. 72 Cra. 30	49
N43	Av. 1ero de Mayo Cra. 30	94	PA19	Sondeo Cll.72 Cra. 24	50
N44	Sondeo Cra. 27 - Cll. 44S	18	PA25	Sondeo Cra. 7 Cll. 65	40
N45	Sondeo del Tunal	43	PA26	Cra 7 Cll 61	40
N48	Sondeo Uniagraria	114	PA37	Sondeo Cra. 10 Cll. 18	49
N49	Sondeo Ingeominas	167	PA43	Sondeo Cll. 13 Cra. 19	49
N50	Sondeo Cll. 80 Av. Boyacá	43	PA46	Cll 13 Av. Ciudad de Quito	49
N51	Sondeo Aeropuerto	246	PA49	Sondeo Av. Ferrocarril Cll. 9	48
O01	Parque Central Pontevedra	52	PA52	Av Ferrocarril Cll 2	48
O02	La Candelaria	8	PA55	Sondeo Av. Ferrocarril Av. 1 Mayo	48
O03	Cra 46A N° 135-95	44	PA58	Av 1 Mayo Cra 65	49
O04	Cra 48F N° 95-80	46	PA61	Sondeo Av. 1 Mayo Cra. 74	48
O05	Carrera 46 con calle 140A	30	PA64	Diag 43 S Transv 81	50
O09	Calle 170 N° 31-20	49	PA67	Sondeo Diag. 43 S Cra. 86	49

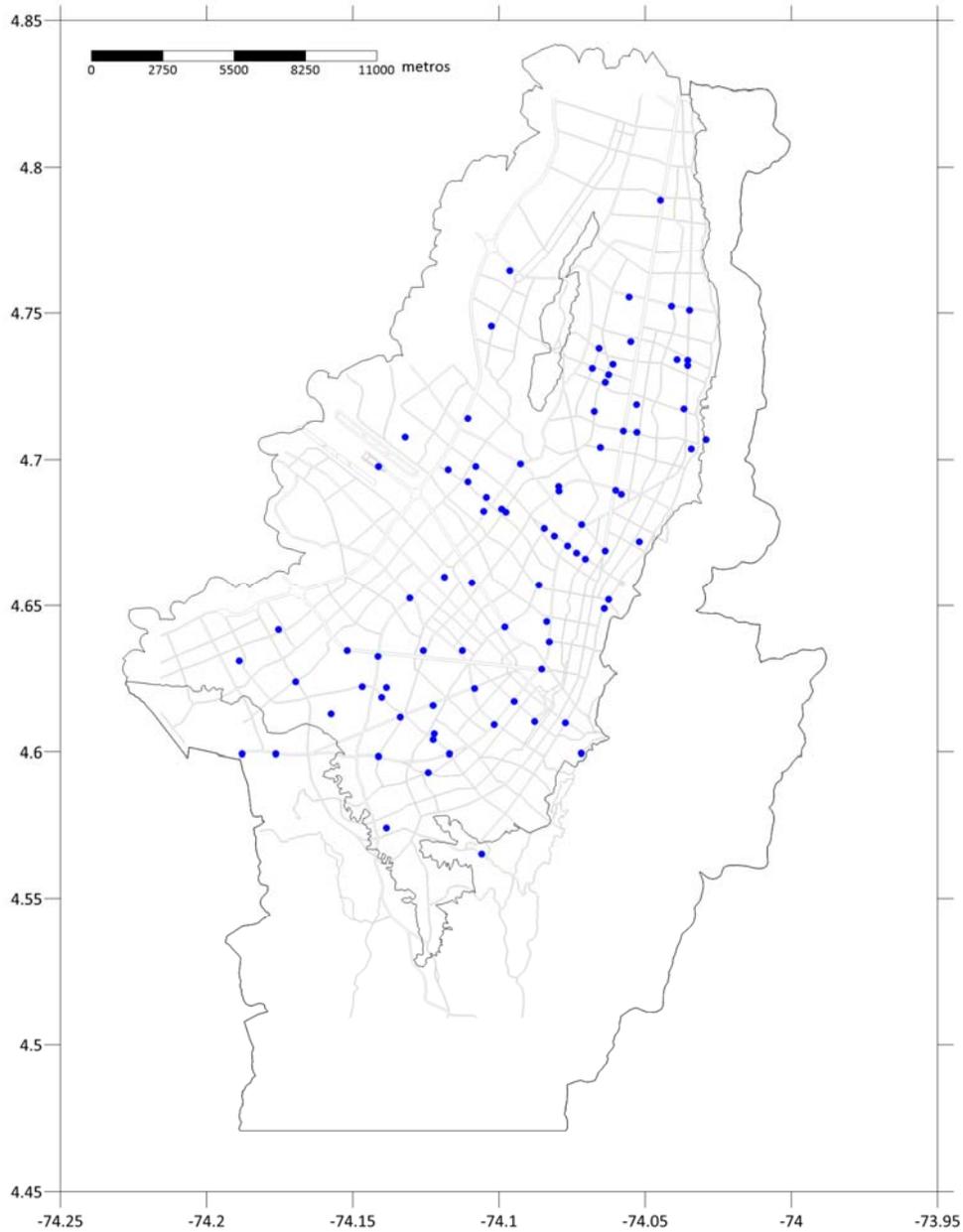


Figura 4-9. Ubicación de los sondeos en Bogotá

En algunos casos, los sondeos no cuentan con un perfil completo de velocidad de onda de cortante. Es necesario entonces completar estos perfiles. Para tal fin se aplicó la metodología propuesta por la Sociedad Colombiana de Geotecnia (SCG, 2006).

El perfil de velocidad de onda de corte, se puede establecer a partir de los valores de módulo de rigidez cortante máximo para cada material, a través de la siguiente relación,

$$V_s = \sqrt{\frac{G_o}{\rho}} \quad (\text{Ec. 4-9})$$

en donde V_s es la velocidad de onda de corte medida en el sitio para bajas deformaciones, ρ es la densidad de masa del material y G_o es el módulo de cortante máximo (valor inicial para bajas deformaciones). De acuerdo con el modelo geotécnico propuesto por la SCG (2006), el G_o de los depósitos arcillosos de la ciudad (formación sabana) puede determinarse con la siguiente relación,

$$G_o = \frac{K \cdot F(e) \cdot \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma_{ref}} \right)^m RSC^k}{2(1 + \nu)} \quad (\text{Ec. 4-10})$$

en donde K es una constante que depende del tipo de material, ν es la relación de Poisson, σ'_c es el esfuerzo de confinamiento efectivo, σ_{ref} es un esfuerzo de referencia, m es el exponente de la relación de esfuerzos, RSC es la relación de sobreconsolidación, k es el exponente de la relación de sobreconsolidación, $F(e)$ es la función dada por Hardin y Black (1968). De acuerdo con el modelo geotécnico propuesto por la SCG (2006): $\nu = 0.4$, $\sigma_{ref} = 100$ Kpa, $m = 0.75$, $RSC = 3$,

$$K = \begin{cases} 324500 & \text{para } z < 5m \\ 3056.4 \cdot IP + 31031 & \text{para } z \geq 5m \end{cases} \quad (\text{Ec. 4-11})$$

$$k = \begin{cases} -0.00004 \cdot IP^2 + 0.0145 \cdot IP & \text{para } z < 5m \\ 0 & \text{para } z \geq 5m \end{cases} \quad (\text{Ec. 4-12})$$

$$F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2} \quad (\text{Ec. 4-13})$$

en donde IP es el índice de plasticidad y e es la relación de vacíos.

Para el caso de depósitos de arenas y suelos granulares (formación Subachoque), se emplea la relación propuesta por Seed e Idriss 1970,

$$G_o = 220 \cdot K_{2max} \cdot (\sigma'_c)^{0.5} \quad (\text{Ec. 4-14})$$

en donde K_{2max} es una constante que depende del material. En esta tesis se asumió un valor de $K_{2max} = 70$, que corresponde a suelos granulares de origen aluvial (Seed e Idriss 1970).

Adicionalmente, los sondeos disponibles no cubren necesariamente toda la profundidad del depósito blando. La Figura 4-10 muestra la profundidad explorada del depósito obtenida de los 84 sondeos disponibles. Es posible observar que, en gran extensión de la ciudad, la profundidad no supera los 40 metros. La Figura 4-11 muestra el porcentaje explorado del depósito blando, calculado a partir de la relación entre la profundidad explorada y la profundidad a la roca en cada sitio de sondeo. Es posible observar que en la gran mayoría del área de la ciudad, el porcentaje explorado no supera el 30%.

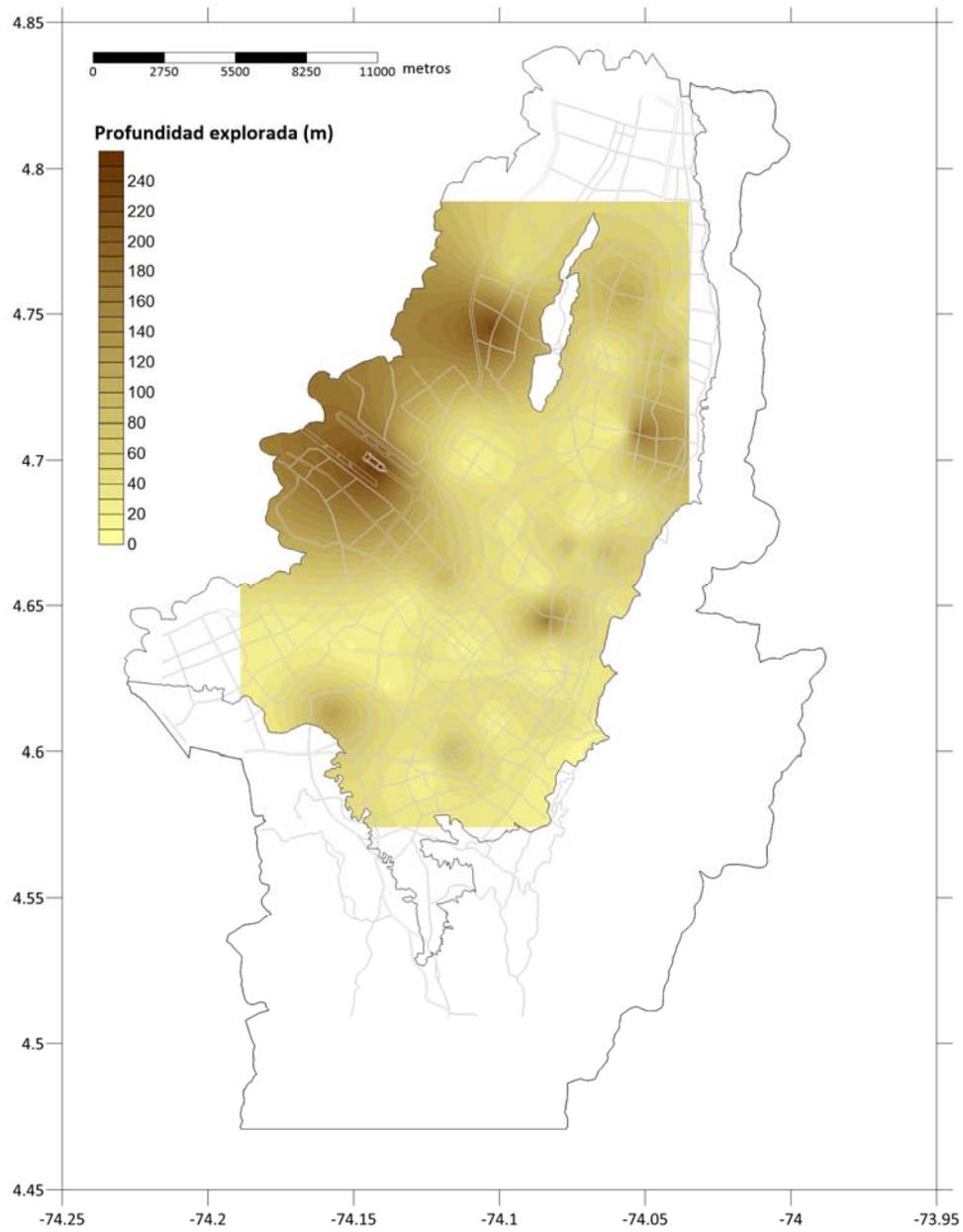


Figura 4-10. Profundidad explorada

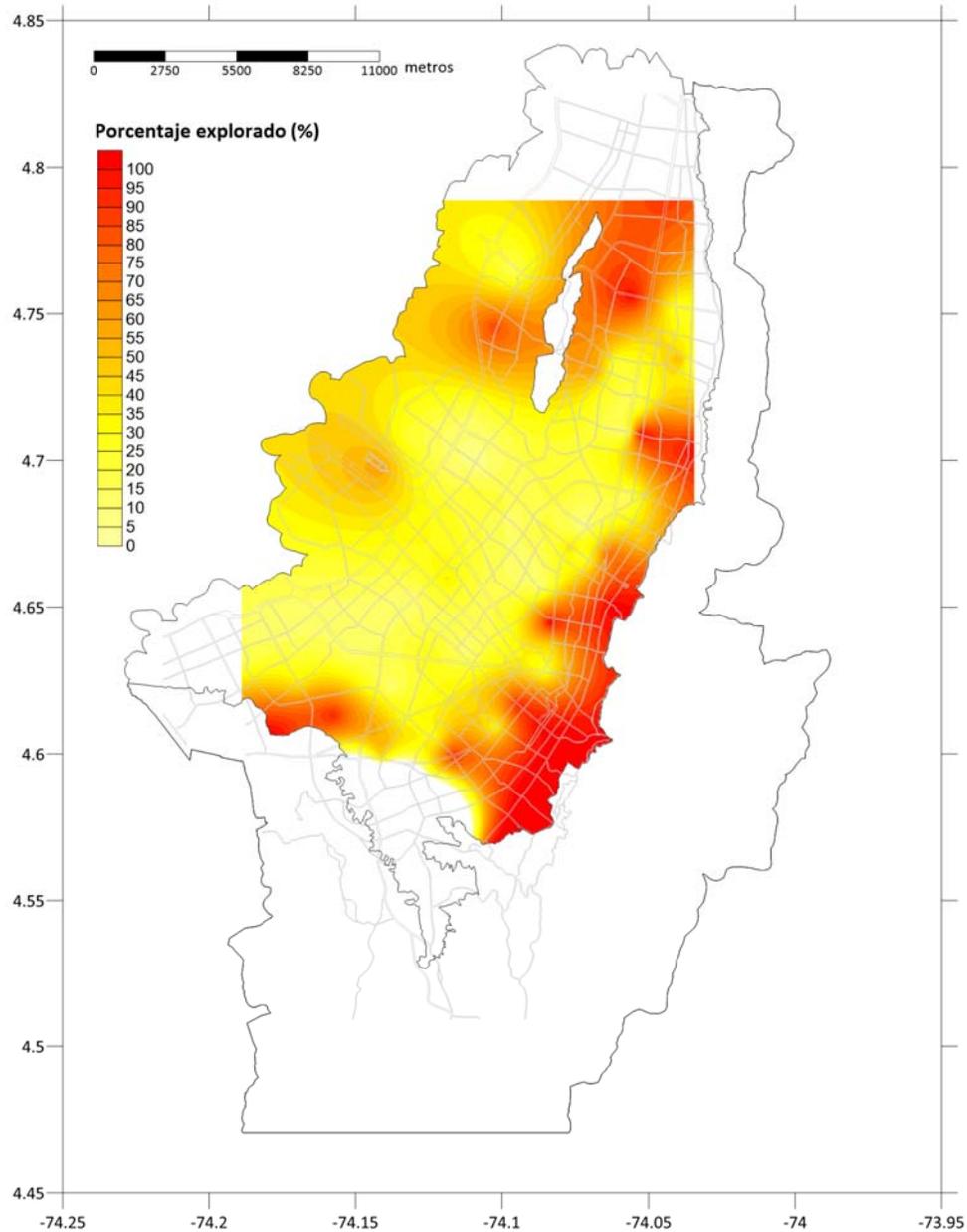


Figura 4-11. Porcentaje explorado del depósito blando

Los sondeos se completaron hasta alcanzar la profundidad de roca firme, con propiedades geotécnicas supuestas o provenientes de sondeos cercanos de mayor profundidad. Se inició con los sondeos que no disponen de otros sondeos cercanos de mayor profundidad, como por ejemplo el sondeo N51, el cual es el más profundo disponible (profundidad explorada = 246 m), y está ubicado sobre la zona de depósito blando más profunda de Bogotá (profundidad a la roca = 430 m). En este caso, las propiedades básicas (humedad, peso específico e índice de plasticidad) fueron extendidas de manera constante en profundidad desde la profundidad final del sondeo hasta el nivel de roca firme. Las propiedades dinámicas (velocidad de onda de cortante y módulo de cortante) fueron obtenidas usando el procedimiento descrito anteriormente. La Figura 4-12 muestra los perfiles en profundidad del peso específico y la velocidad de onda de cortante para el sondeo N51. El punto rojo marca el final de los datos obtenidos en campo, y la línea punteada

indica el resultado de la extrapolación. Puede verse que la extrapolación constante para el peso específico, implica una extrapolación cuasi-lineal para la velocidad de onda de cortante.

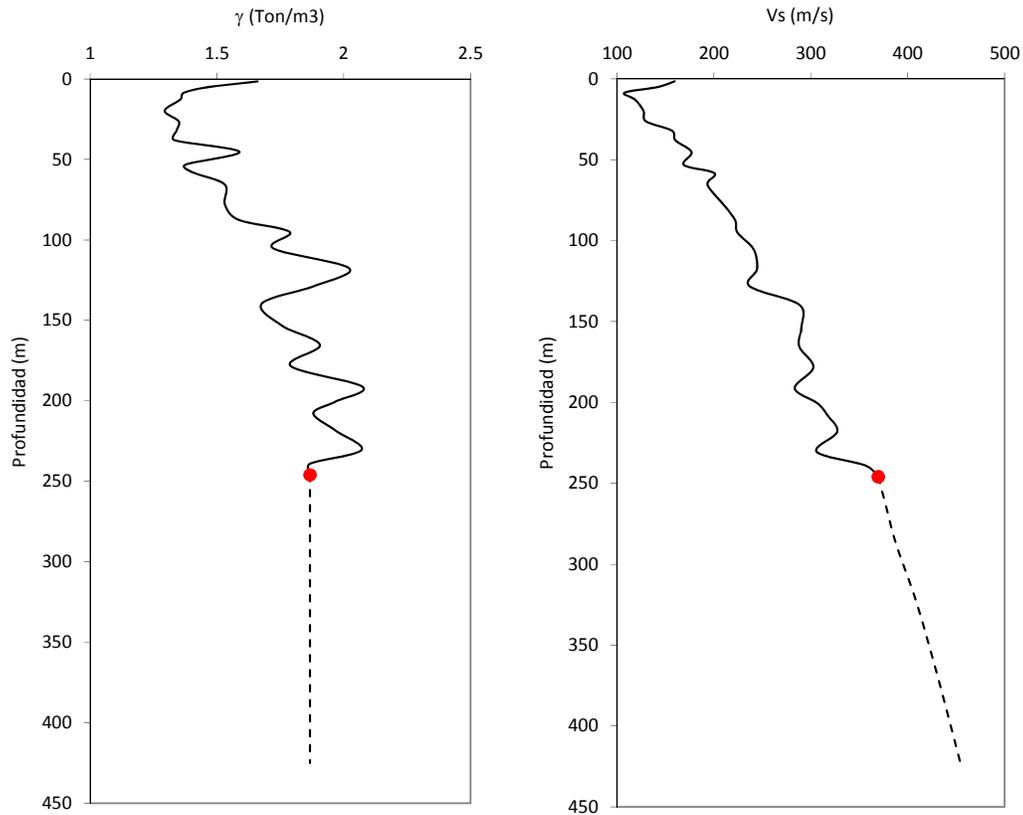


Figura 4-12. Perfiles extrapolados de peso específico y velocidad de onda de cortante para el sondeo N51

Para los sondeos ubicados en cercanías a otros sondeos de mayor profundidad, se completó copiando las propiedades del sondeo de mayor profundidad. Por ejemplo, el sondeo PA1 (profundidad máxima = 100 m; profundidad a la roca = 430 m) se completó con los datos del sondeo N51 extrapolado. La Figura 4-13 muestra los perfiles en profundidad del peso específico y la velocidad de onda de cortante para el sondeo PA1. El punto rojo marca el final de los datos obtenidos en campo, y la línea punteada indica el resultado de la complementación con el sondeo N51.

El procedimiento descrito se ejecutó en todos los sondeos con información incompleta en profundidad, con el fin de tener una base de información adecuada para la definición de tipos de suelo por formaciones geológicas.

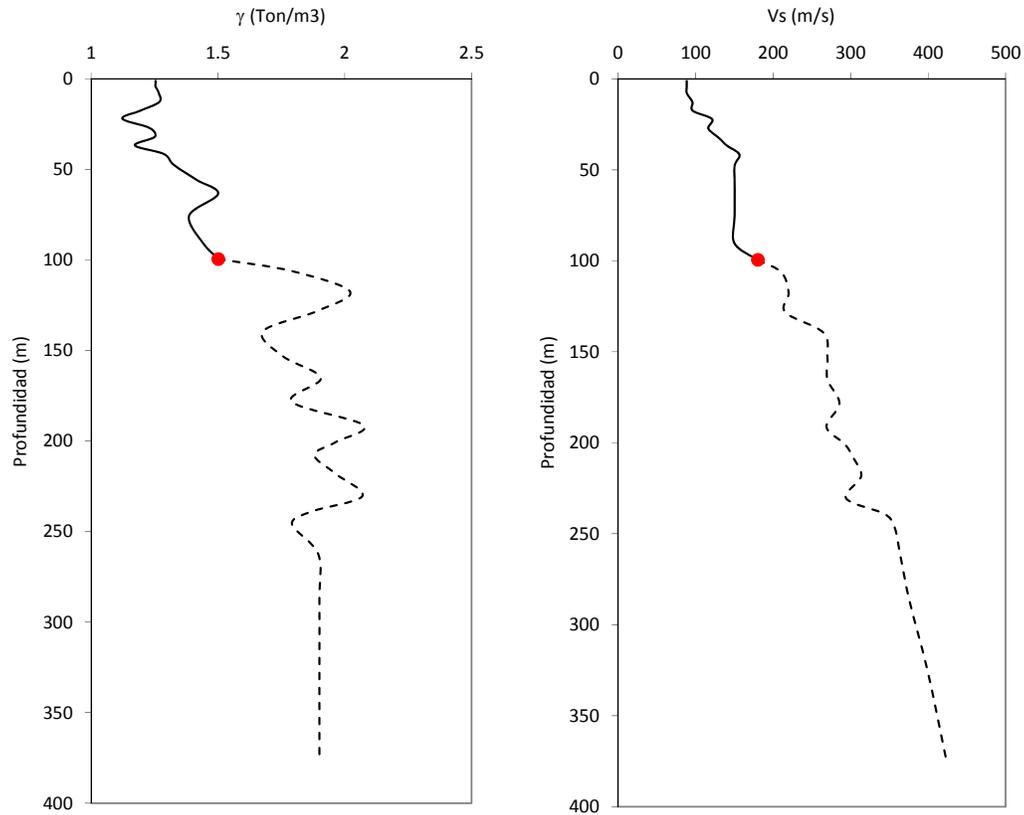


Figura 4-13. Perfiles completados de peso específico y velocidad de onda de cortante para el sondeo PA1

4.2.5 DEFINICIÓN DE LOS TIPOS DE SUELO DE ANÁLISIS

A partir de la información existente en los 84 sondeos empleados, se realiza un análisis estadístico sobre los datos asociados a cada formación geológica, de manera que se obtienen perfiles de la variación en profundidad de las principales propiedades geotécnicas. Estas propiedades quedan definidas por medio de un valor esperado, varianza, y límites mínimo y máximo, para cada profundidad.

Se definieron 2 tipos de suelo, característicos de las formaciones Subachoque y Sabana respectivamente. Estos tipos de suelo constituyen el conjunto de propiedades geotécnicas que definen las características de los materiales.

4.2.5.1 Suelo tipo 1 (formación Sabana)

El suelo tipo 1 es un suelo de características arcillosas, asociado a la formación Sabana. La Figura 4-14 presenta los perfiles en profundidad de variación de las principales propiedades geotécnicas. Se presenta el perfil del valor esperado más y menos una desviación estándar.

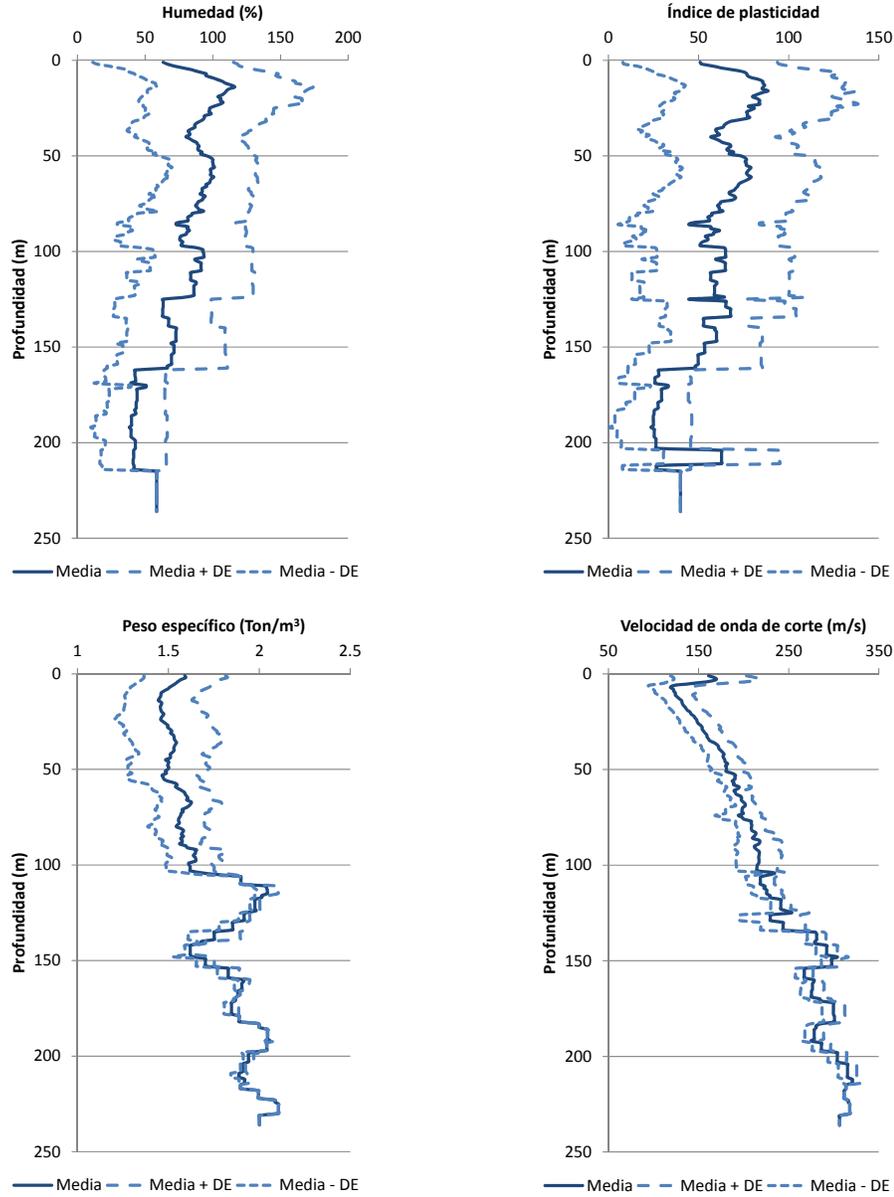


Figura 4-14. Perfiles de algunas propiedades geotécnicas del suelo tipo 1

Las curvas de degradación del módulo dinámico de cortante y de amortiguamiento con la deformación cortante se definen de acuerdo con los resultados del modelo geotécnico de la ciudad elaborado por la SCG (2006). En dicho estudio se plantean el uso de las relaciones propuestas por Ishibashi y Zhang (1993), para los suelos arcillosos (formación Sabana),

$$\frac{G}{G_o} = K(\gamma, IP)(\sigma'_c)^{m(\gamma, IP) - m_o} \quad (\text{Ec. 4-15})$$

$$\beta = 0.333 \frac{1 + \exp(-0.0145 \cdot IP^{1.3})}{2} \left[0.586 \left(\frac{G}{G_o} \right)^2 - 1.547 \left(\frac{G}{G_o} \right) + 1 \right] \quad (\text{Ec. 4-16})$$

en donde G es el módulo de cortante dependiente de la deformación, γ es la deformación cortante y los factores $K(\gamma, IP)$, $m(\gamma, IP) - m_o$ y $n(IP)$ están dados por,

$$K(\gamma, IP) = 0.5 \left[1 + \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000102 + n(IP)}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right] \quad (\text{Ec. 4-17})$$

$$m(\gamma, IP) - m_o = 0.272 \left[1 - \tanh \left[\ln \left(\frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \right] \exp(-0.0145 \cdot IP^{1.3}) \quad (\text{Ec. 4-18})$$

$$n(IP) = \begin{cases} 0.0 & \text{para } IP = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} \cdot IP^{1.404} & \text{para } 0 < IP \leq 15 \\ 7.0 \times 10^{-7} \cdot IP^{1.976} & \text{para } 15 < IP \leq 70 \\ 2.7 \times 10^{-5} \cdot IP^{1.115} & \text{para } IP > 70 \end{cases} \quad (\text{Ec. 4-19})$$

Las curvas de degradación de rigidez y amortiguamiento son modificadas por medio de una corrección propuesta por la SCG (2006) para acomodar los modelos al comportamiento dinámico típico de los suelos de Bogotá. Estos factores de corrección se presentan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Factores de corrección de G/G_o para suelos de Bogotá (SCG 2006).

γ [%]	Factor corrección	γ [%]	Factor corrección
0.0001	1.00	0.06	0.77
0.0002	1.00	0.07	0.75
0.0003	1.00	0.08	0.74
0.0004	1.00	0.09	0.73
0.0005	1.00	0.1	0.73
0.0006	1.00	0.2	0.68
0.0007	1.00	0.3	0.65
0.0008	1.00	0.4	0.64
0.0009	1.00	0.5	0.63
0.001	1.00	0.6	0.62
0.002	0.97	0.7	0.61
0.003	0.95	0.8	0.61
0.004	0.95	0.9	0.60
0.005	0.94	1	0.60
0.006	0.93	2	0.59
0.007	0.92	3	0.58
0.008	0.92	4	0.58
0.009	0.91	5	0.58
0.01	0.90	6	0.58
0.02	0.86	7	0.58
0.03	0.83	8	0.58
0.04	0.80	9	0.58
0.05	0.78	10	0.58

La Figura 4-15 presenta las curvas de degradación de rigidez para diferentes valores de IP. La Figura 4-16 presenta las correspondientes curvas de amortiguamiento. En ambos casos se definió un esfuerzo efectivo de confinamiento de 100 KPa.

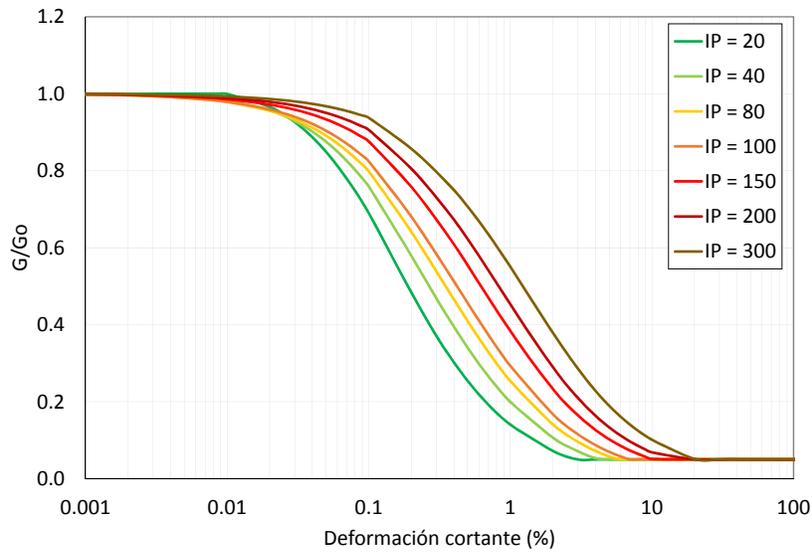


Figura 4-15. Curvas de degradación de rigidez para suelos blandos cohesivos.

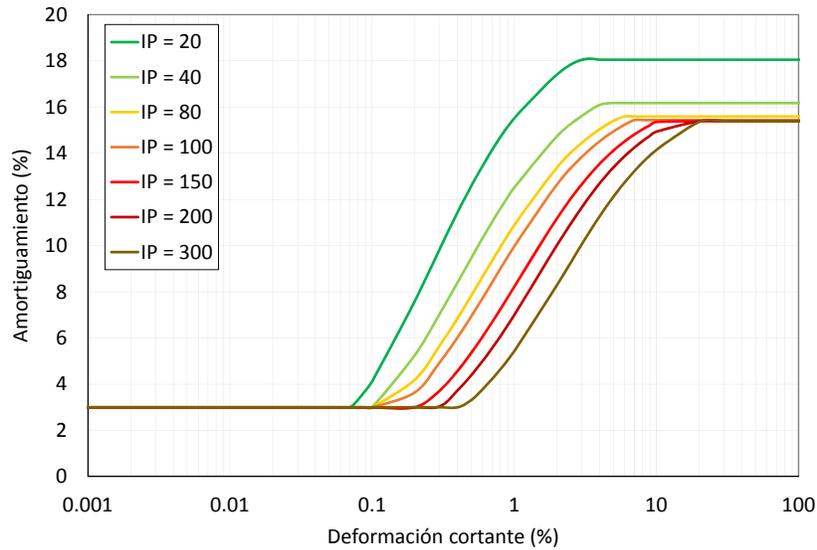


Figura 4-16. Curvas de amortiguamiento para suelos blandos cohesivos.

4.2.5.2 Suelo tipo 2 (formación Subachoque)

El suelo tipo 2 es un suelo con alto contenido de material grueso, arenas principalmente, asociado a la formación Subachoque. La Figura 4-17 presenta los perfiles en profundidad de variación de las principales propiedades geotécnicas.

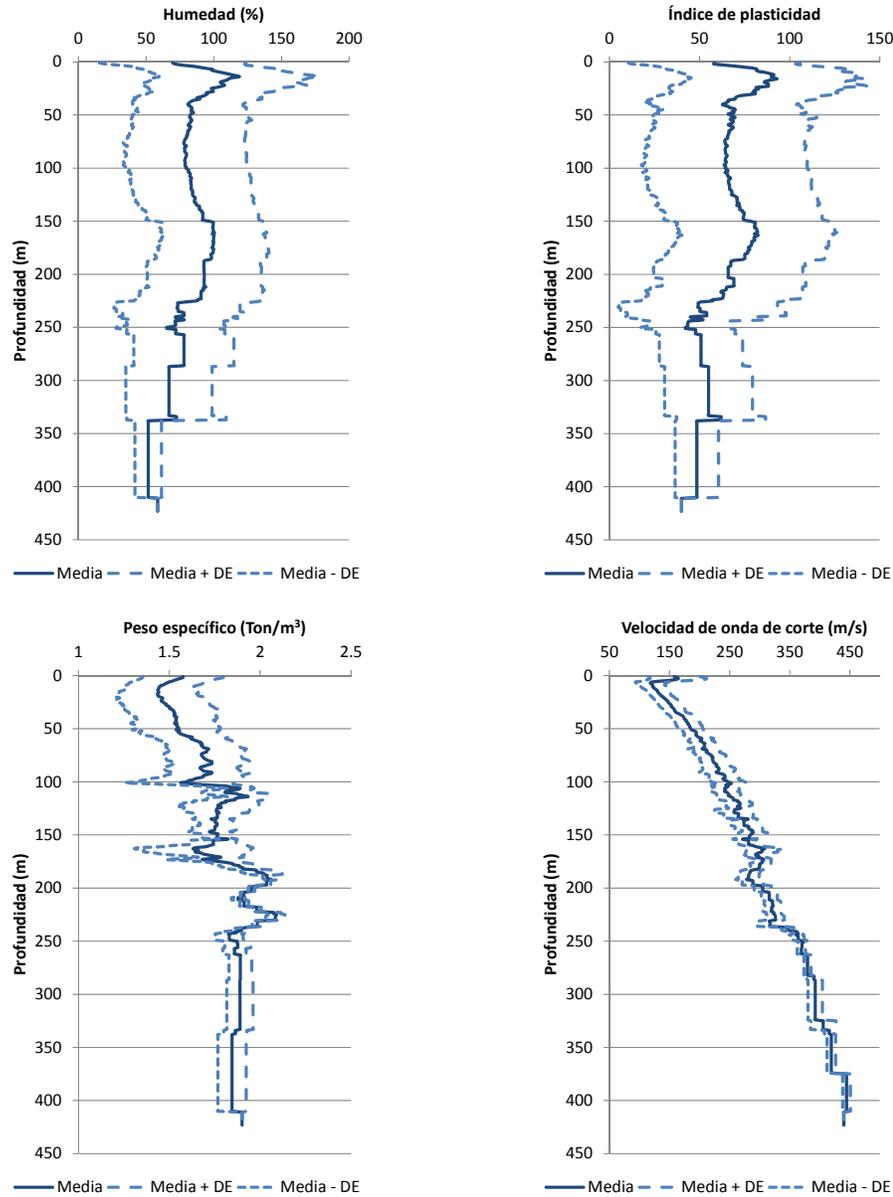


Figura 4-17. Perfiles de algunas propiedades geotécnicas del suelo tipo 2

Como modelo de degradación de rigidez y amortiguamiento, se emplea el valor promedio de la relación propuesta por Seed e Idriss (1970) (ver Figura 4-18 y Figura 4-19).

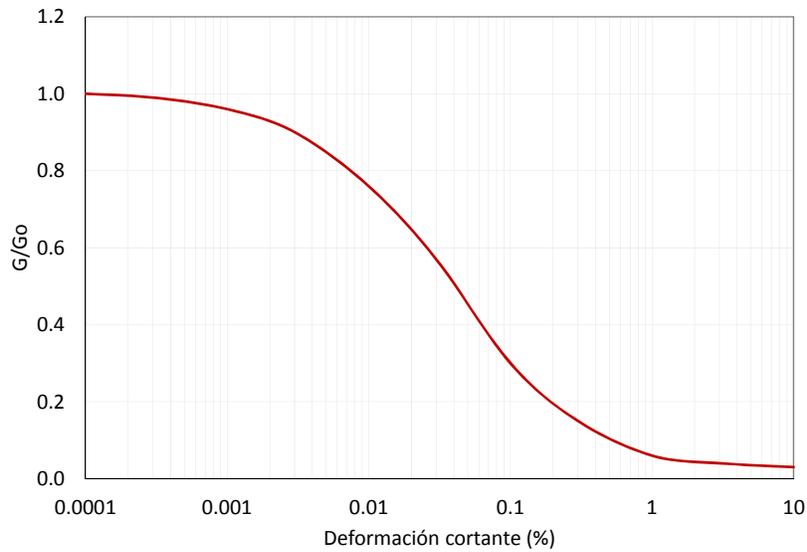


Figura 4-18. Curva de degradación de rigidez para suelos granulares.

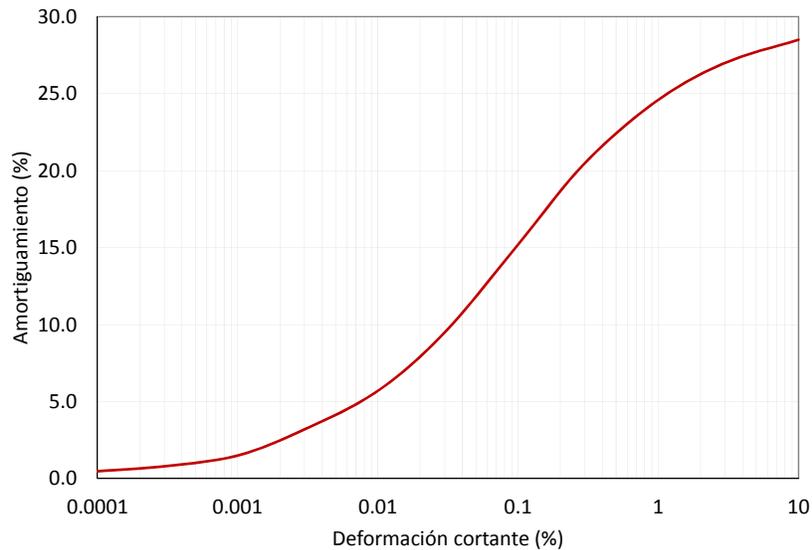


Figura 4-19. Curva de amortiguamiento para suelos granulares.

4.2.6 MALLA DE CÁLCULO

La malla de cálculo empleada se presenta en la Figura 4-20. Se definió una malla de 25x25 nodos en cada dirección, para un total de 625 sitios de cálculo. El cuadro gris indica la extensión del análisis. La malla de cálculo no cubre toda la extensión del área urbana de Bogotá, debido a que la información geométrica del modelo geológico no está disponible sino dentro de la extensión marcada en la Figura 4-20. El recuadro gris se mantendrá en todos los mapas de resultados presentados en esta tesis como referencia de la extensión geográfica del análisis.

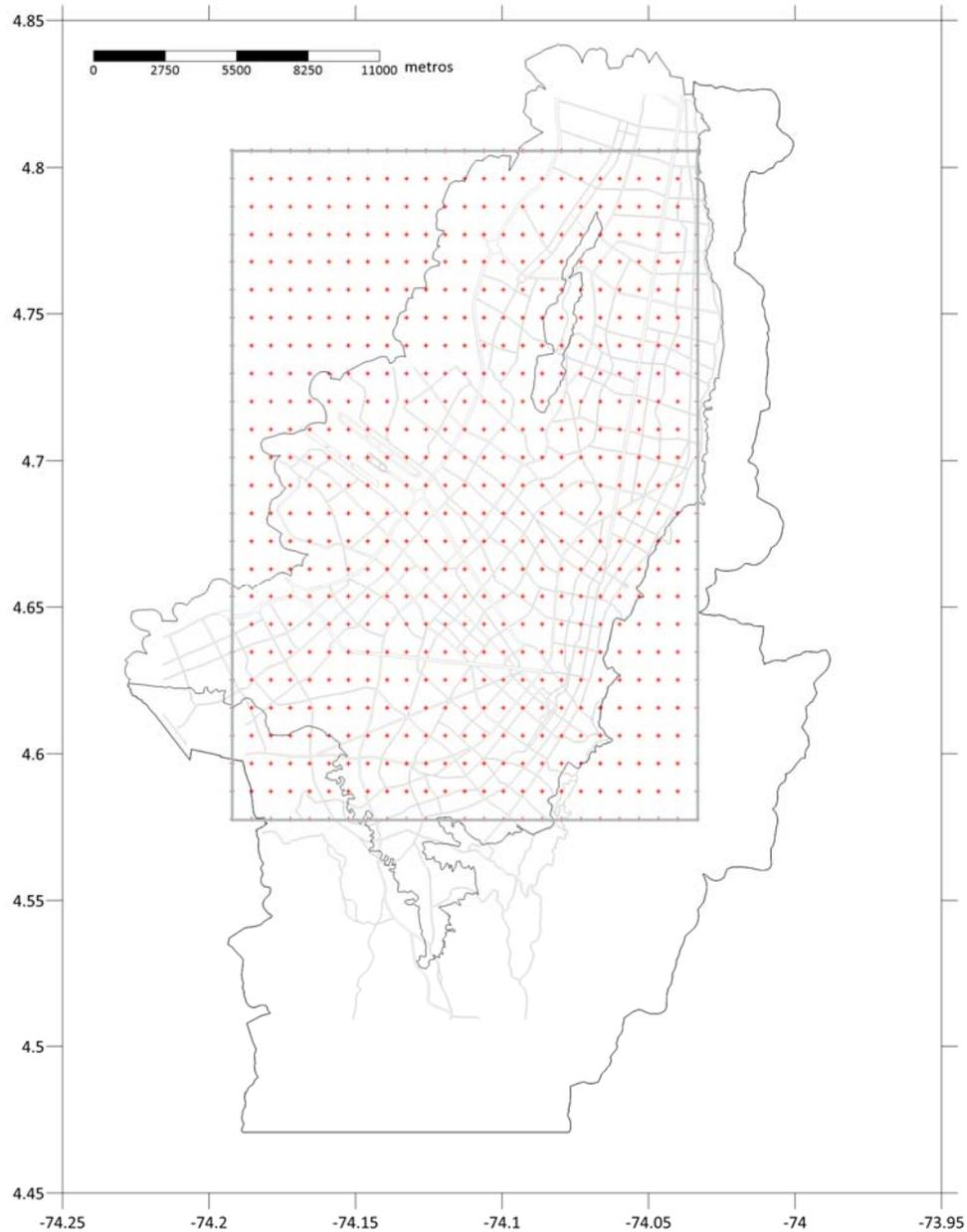


Figura 4-20. Malla de cálculo y extensión total del análisis

4.2.7 CONSTRUCCIÓN DE ESTRATIGRAFÍAS SINTÉTICAS

En cada nodo de la malla de cálculo se genera un conjunto de estratigrafías sintéticas, con capas de suelo uniforme de 3 metros de espesor, siguiendo la metodología indicada anteriormente en este capítulo. La Tabla 4-3 muestra los valores asignados a las propiedades geotécnicas en una simulación sobre un sitio de cálculo seleccionado al azar dentro de la malla de cálculo (sitio 226, ubicación WGS84: -74.1326, 4.5872, profundidad: 66 m). La Figura 4-21 muestra los perfiles en profundidad del peso específico, índice de plasticidad, velocidad de onda de cortante y módulo de cortante, para un conjunto de 50 simulaciones sobre el sitio 226, junto con el valor promedio de la propiedad correspondiente.

Tabla 4-3. Resultado de la construcción de una estratigrafía sintética.

ID	Prof. (m)	Tipo suelo	γ (T/m ³)	V_s (m/s)	G_0 (KPa)	ω (%)	LL	LP	IP	IL	σ_c (T/m ²)
1	1.5	Suelo 1	1.30	242.0	7775.5	98.6	199.1	54.3	145	0.31	3.9
2	4.5	Suelo 1	1.48	175.3	4929.4	122.8	132.2	50.3	82	1.30	8.3
3	7.5	Suelo 1	1.51	141.0	3147.8	106.6	126.0	36.7	89	1.32	12.9
4	10.5	Suelo 1	1.46	131.5	2665.4	119.6	141.6	40.2	101	1.15	17.2
5	13.5	Suelo 1	1.48	135.2	2493.0	146.1	171.0	51.2	120	1.14	21.7
6	16.5	Suelo 1	1.65	131.8	2920.5	158.3	179.1	59.5	120	1.34	26.6
7	19.5	Suelo 1	1.56	131.6	3210.0	186.4	122.8	73.4	49	-0.01	31.3
8	22.5	Suelo 1	1.48	141.8	2490.5	139.4	115.6	78.5	37	-1.43	35.8
9	25.5	Suelo 1	1.59	152.3	3911.3	65.6	134.0	81.0	53	-1.34	40.5
10	28.5	Suelo 2	1.53	162.3	4424.7	38.2	172.7	78.0	95	-1.24	45.1
11	31.5	Suelo 2	1.52	153.2	3251.5	57.0	167.1	66.1	101	0.74	49.7
12	34.5	Suelo 2	1.56	156.4	4176.3	92.6	101.0	63.5	38	93.50	54.4
13	37.5	Suelo 2	1.55	180.8	4968.3	82.1	82.3	68.0	14	120.51	59.0
14	40.5	Suelo 2	1.61	193.8	6080.9	79.3	89.4	71.7	18	37.97	63.9
15	43.5	Suelo 2	1.59	195.6	6629.2	100.1	117.3	68.3	49	13.29	68.6
16	46.5	Suelo 2	1.50	178.2	4719.6	81.3	161.4	67.6	94	4.49	73.1
17	49.5	Suelo 2	1.58	175.5	4515.2	62.4	177.1	57.6	119	1.50	77.8
18	52.5	Suelo 2	1.68	190.6	6637.8	80.4	180.7	49.6	131	0.71	82.9
19	55.5	Suelo 2	1.70	195.7	6477.9	86.9	177.6	54.9	123	0.39	88.0
20	58.5	Suelo 2	1.68	195.0	6807.9	67.4	145.4	59.6	86	0.05	93.0
21	61.5	Suelo 2	1.63	198.8	6367.5	81.5	96.2	54.0	42	-8.00	97.9
22	64.5	Suelo 2	1.63	219.9	8051.2	131.7	39.9	43.6	-4	-23.73	102.8

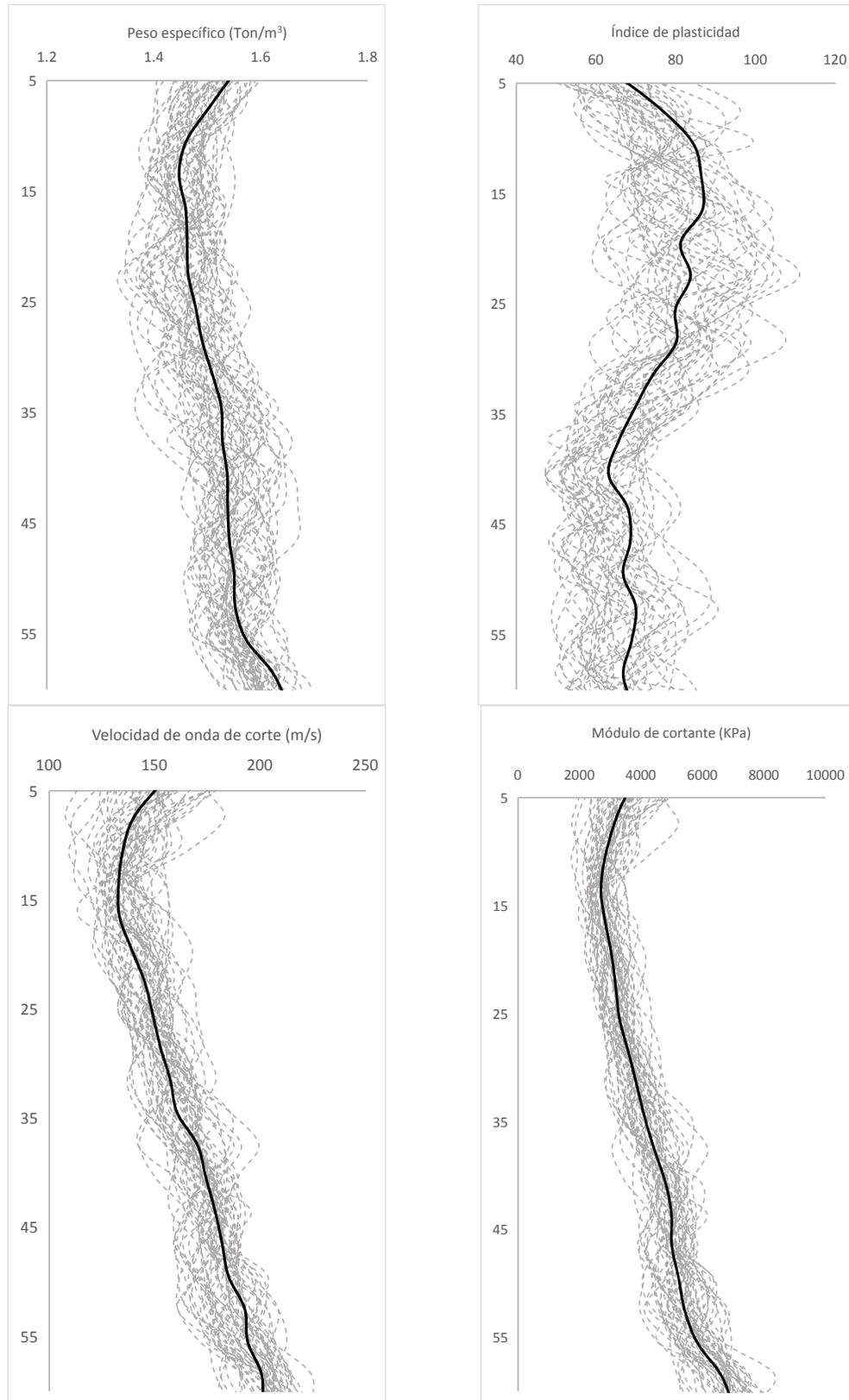


Figura 4-21. Perfiles en profundidad con 50 simulaciones sobre el sitio 226. La línea negra indica el valor promedio de las propiedades.

4.2.8 EVALUACIÓN DE LA RESPUESTA DINÁMICA

A partir del análisis se obtienen parámetros asociados a la respuesta dinámica de los suelos de Bogotá, y su representación espacial. La Figura 4-22 y Figura 4-23 muestran los mapas de distribución espacial de la velocidad de onda cortante, promediada en profundidad, y la profundidad total del depósito, respectivamente. La Figura 4-24 presenta el mapa de periodos fundamentales de vibración calculados.

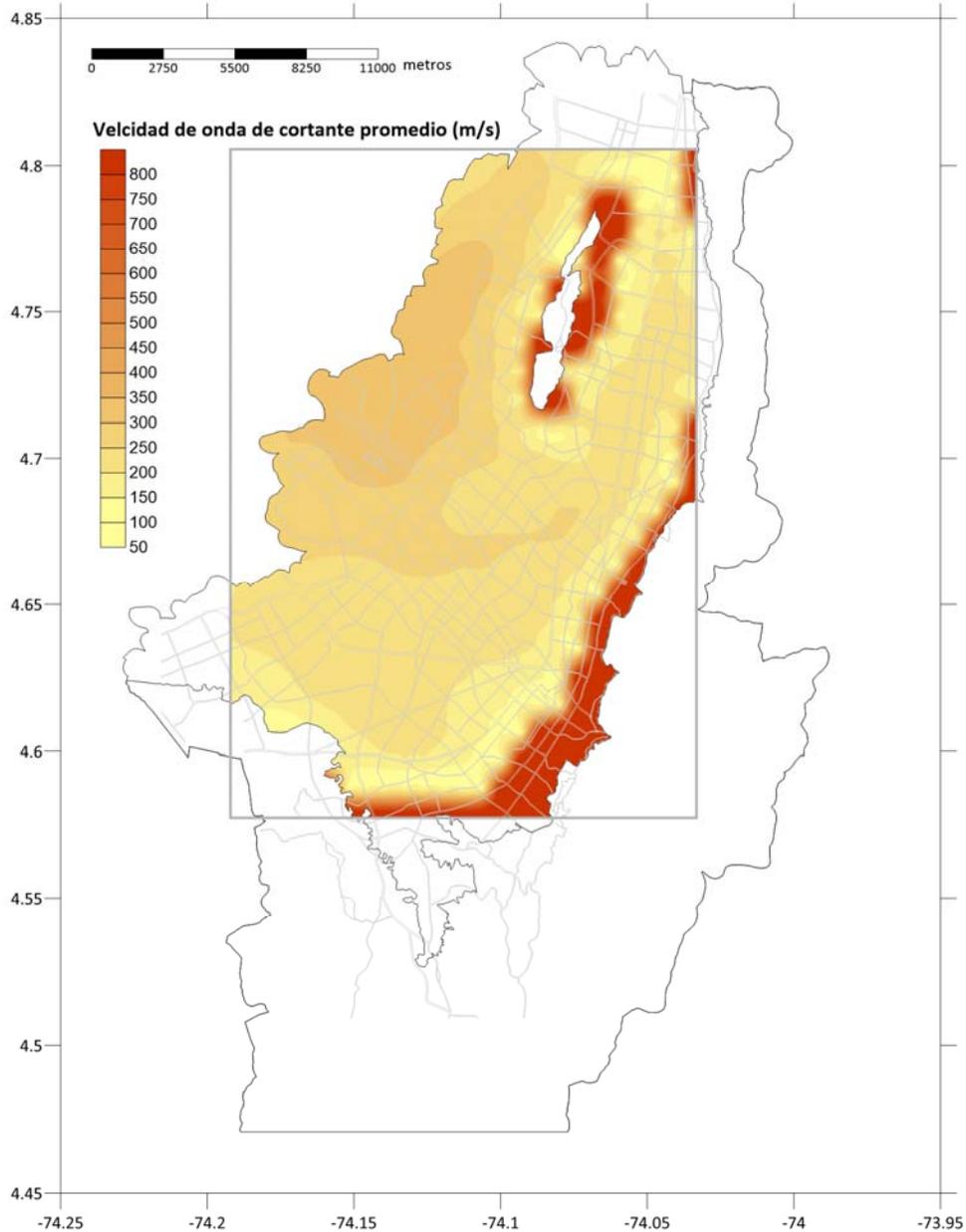


Figura 4-22. Velocidad de onda de cortante promedio.

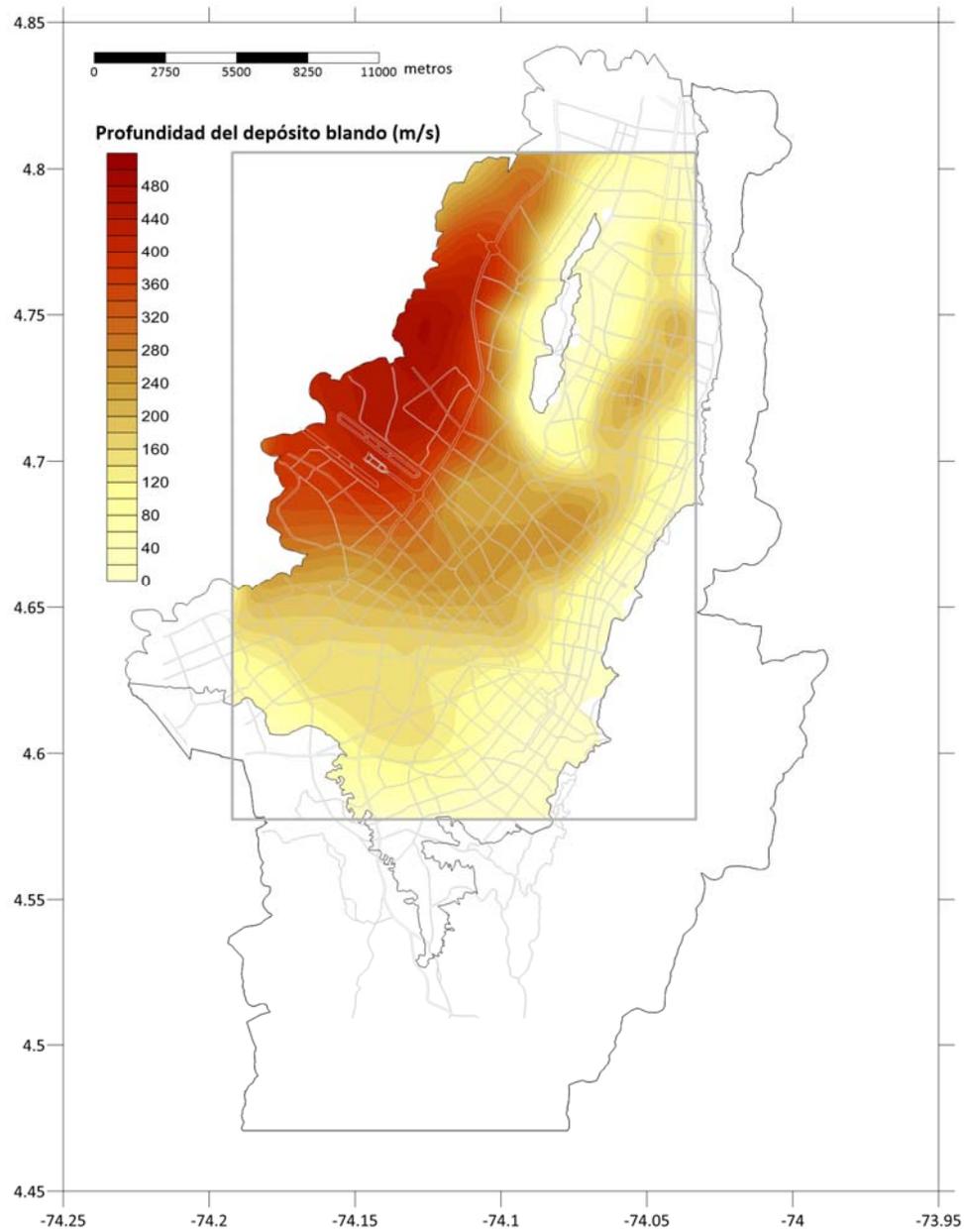


Figura 4-23. Profundidad total del depósito blando.

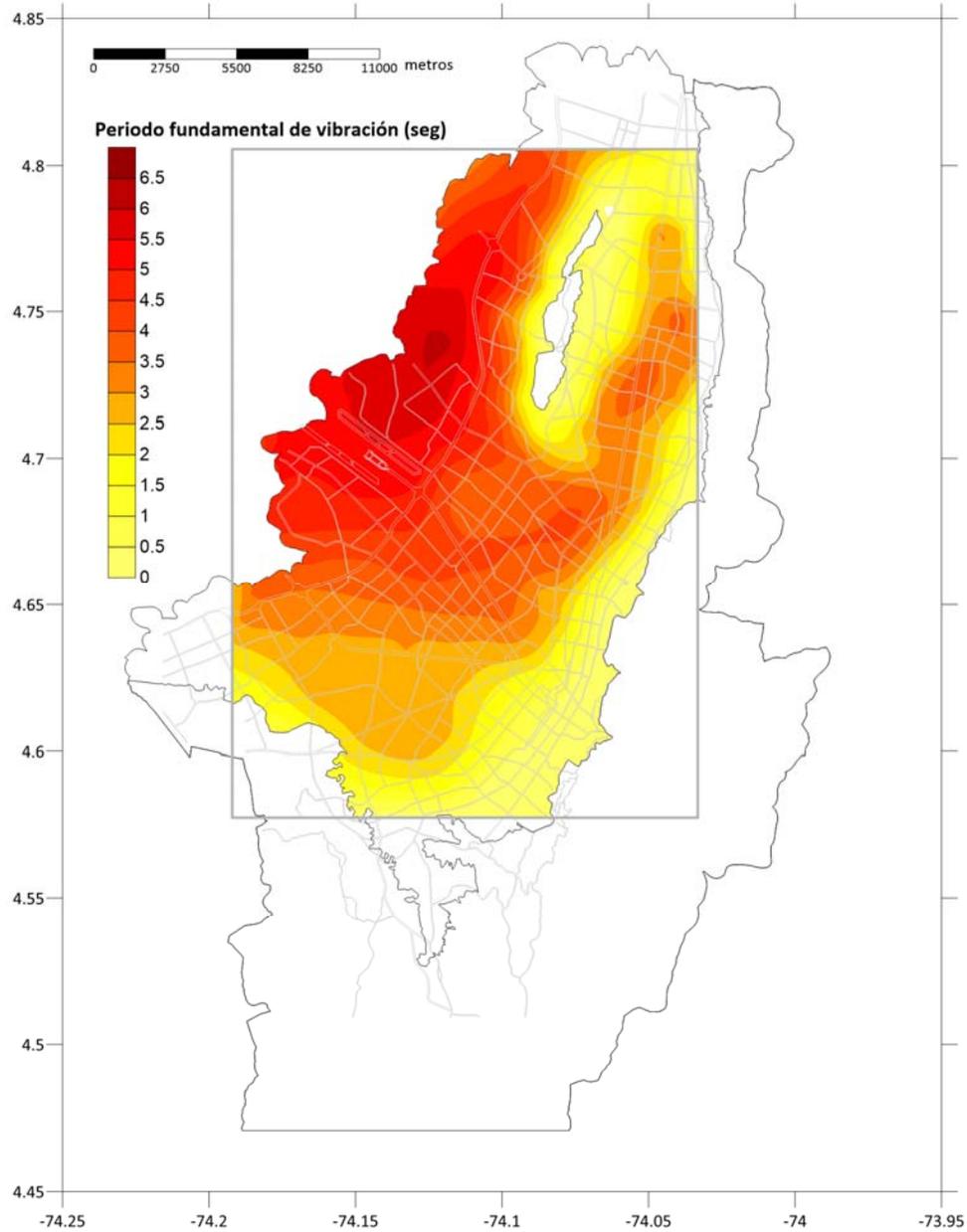


Figura 4-24. Periodos fundamentales de vibración del suelo (seg).

Para cada sitio de cálculo, y para cada estratigrafía simulada, se determina su función de amplificación $AF(T)$, en donde T es el periodo de vibración del OIGDL correspondiente. La Figura 4-25 presenta las funciones de amplificación de 20 simulaciones sobre el sitio 226, junto con el valor promedio de amplificación. De las funciones de amplificación generadas, es posible entonces calcular $\sigma_{\ln AF(T)}$ para considerar la incertumbre asociada al desconocimiento de los valores reales de las propiedades geotécnicas. La Figura 4-26 muestra el valor de $\sigma_{\ln AF(T)}$, para diferentes periodos estructurales.

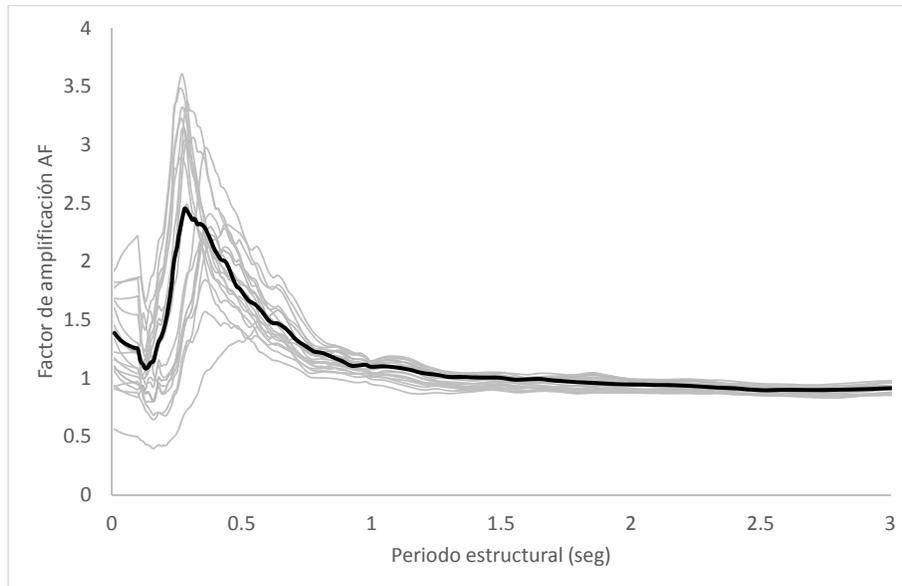


Figura 4-25. Funciones de amplificación de la aceleración espectral para 20 simulaciones en el sitio 226. La línea negra corresponde al valor promedio del factor de amplificación $AF(T)$.

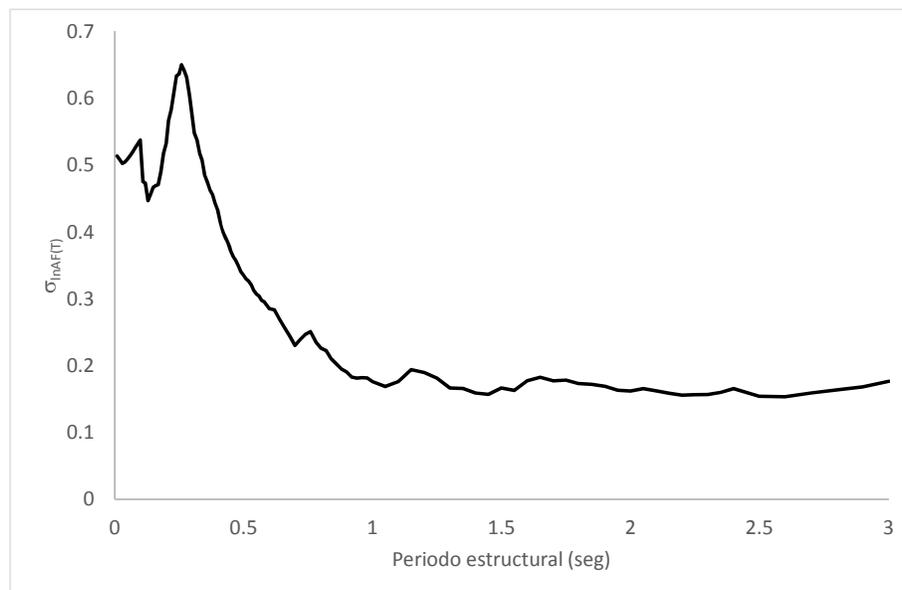
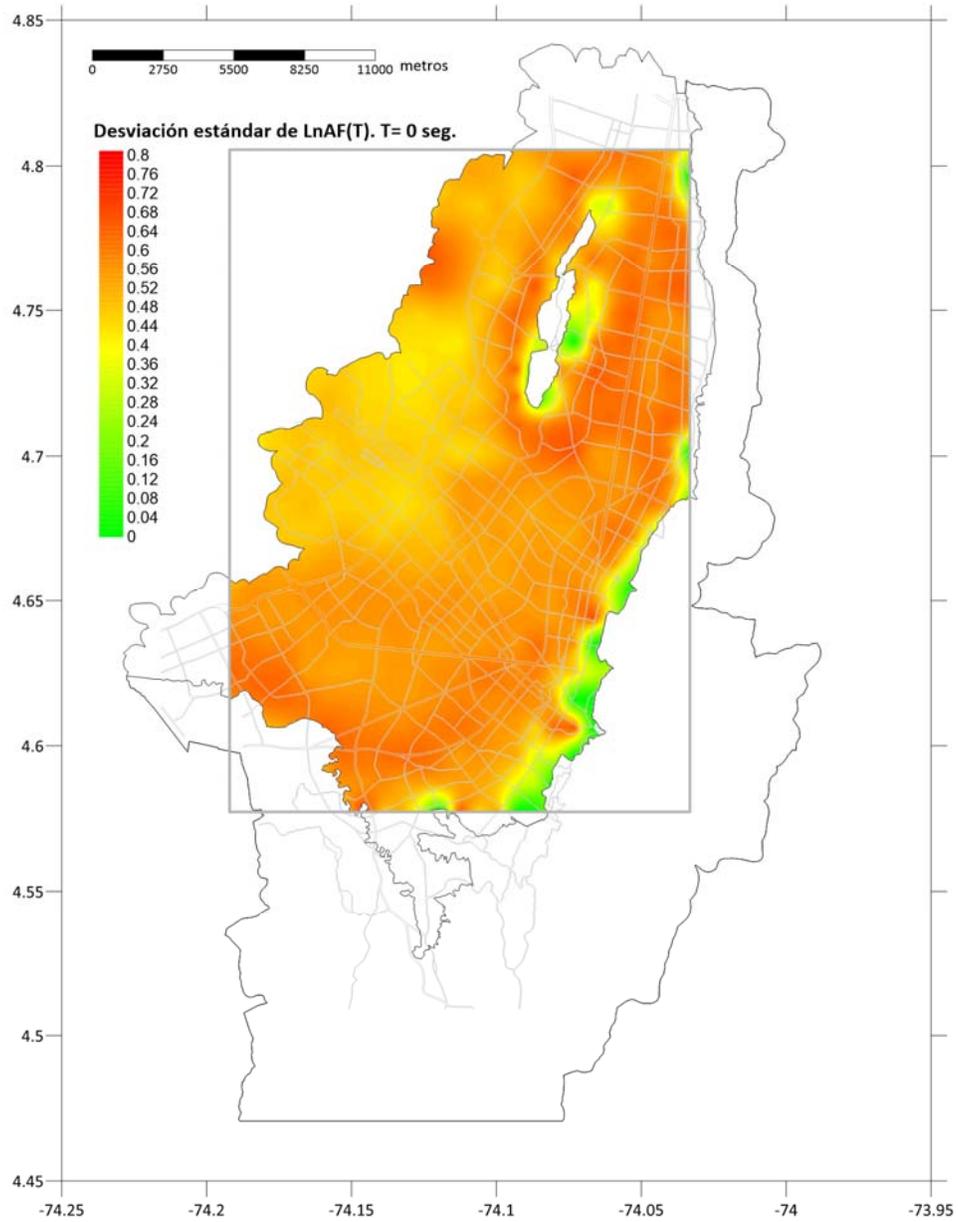


Figura 4-26. Desviación estándar del logaritmo de la función de amplificación $AF(T)$ para el sitio 226.

La distribución espacial de $\sigma_{\ln AF(T)}$ en la ciudad de Bogotá, para diferentes periodos estructurales (0, 0,1, 0,5, 1, 2 y 3 segundos), se presenta en la Figura 4-27 a la Figura 4-32. En general, es posible observar que los valores más altos de $\sigma_{\ln AF(T)}$ ocurren para periodos estructurales bajos, menores a 0.5 segundos. Para periodos más altos, los valores de $\sigma_{\ln AF(T)}$ rara vez superan 0.4.

Figura 4-27. Distribución espacial de σ_{LnAF} para PGA

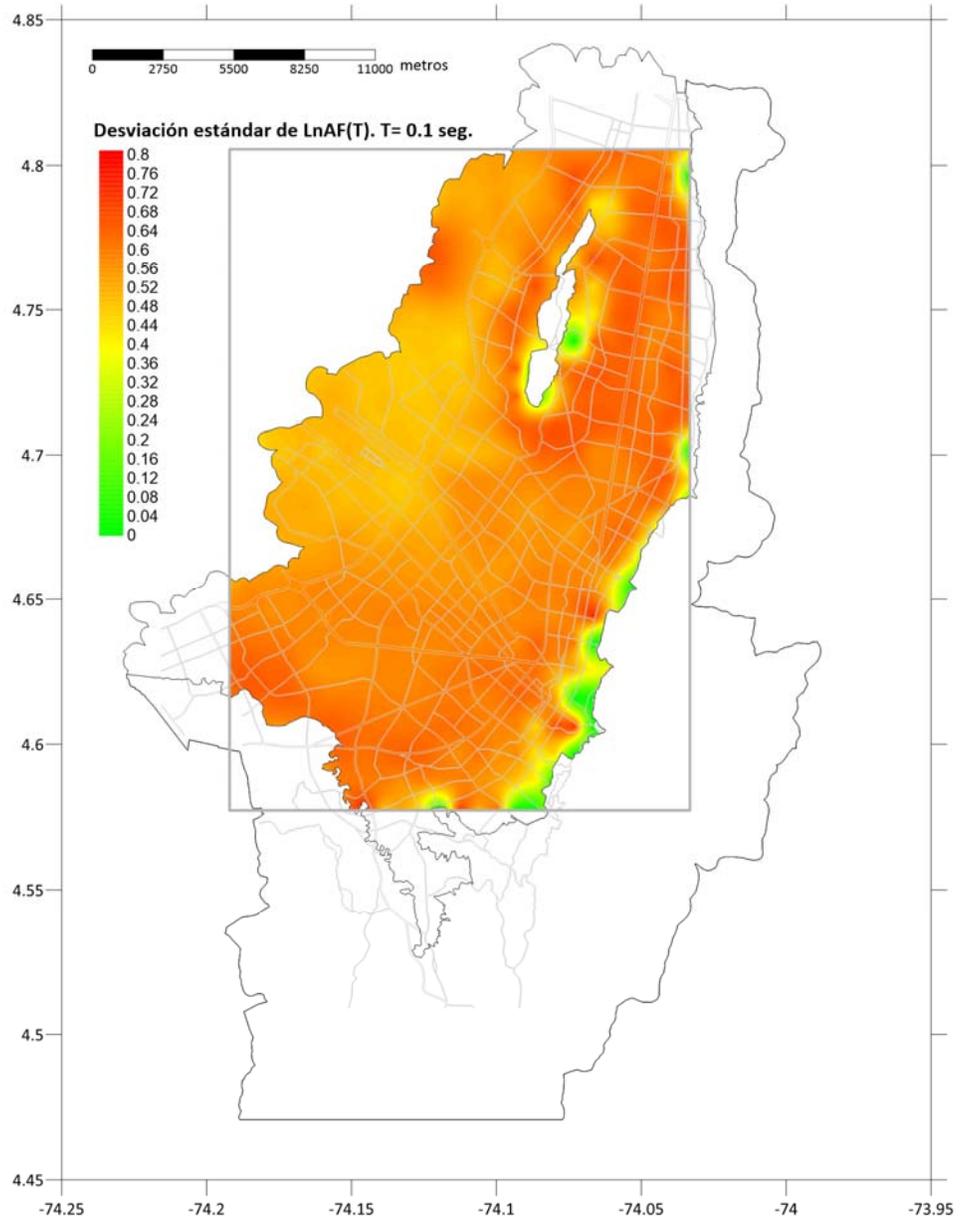
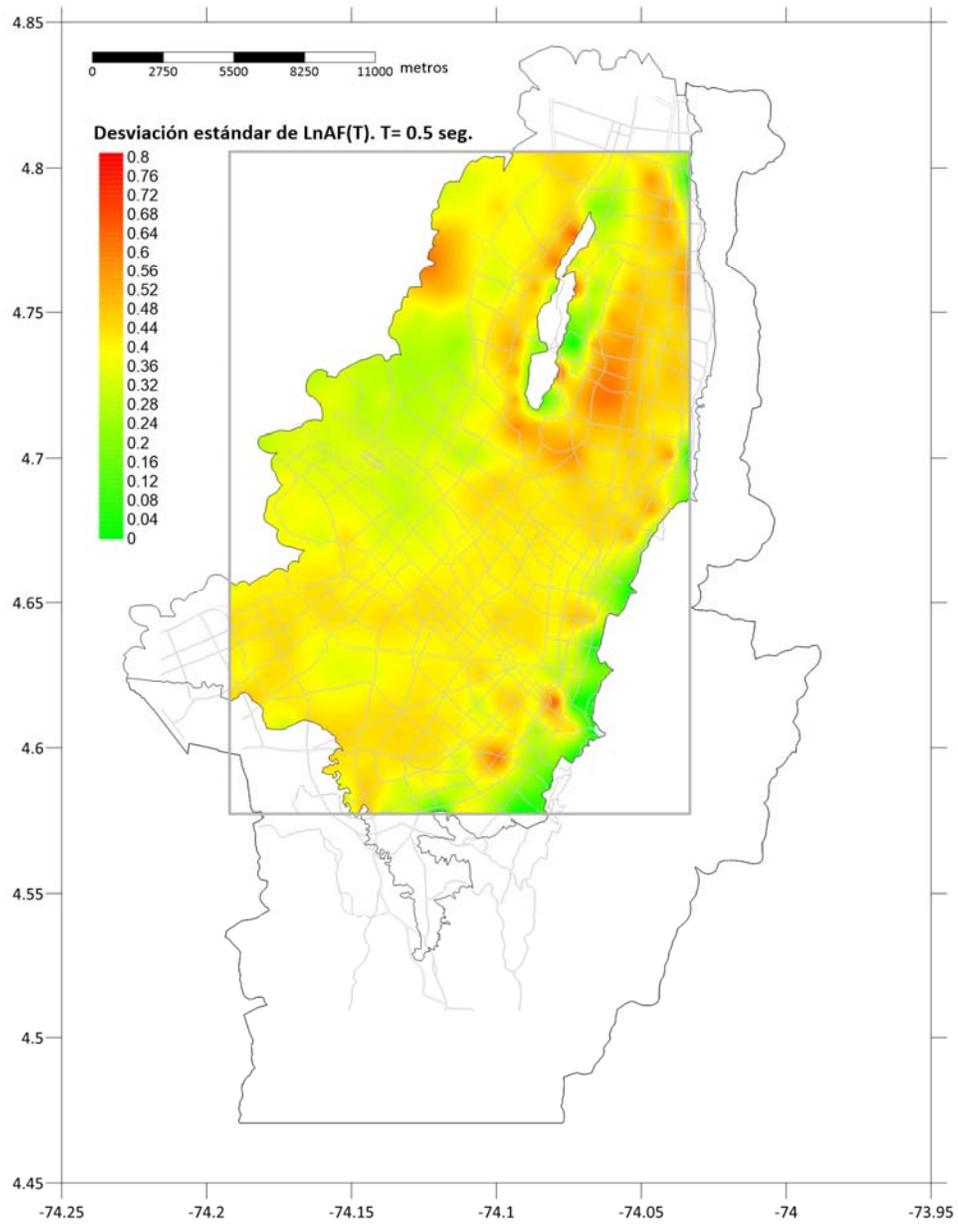


Figura 4-28. Distribución espacial de σ_{LnAF} para $T = 0.1$ seg.

Figura 4-29. Distribución espacial de σ_{LnAF} para $T = 0.5$ seg.

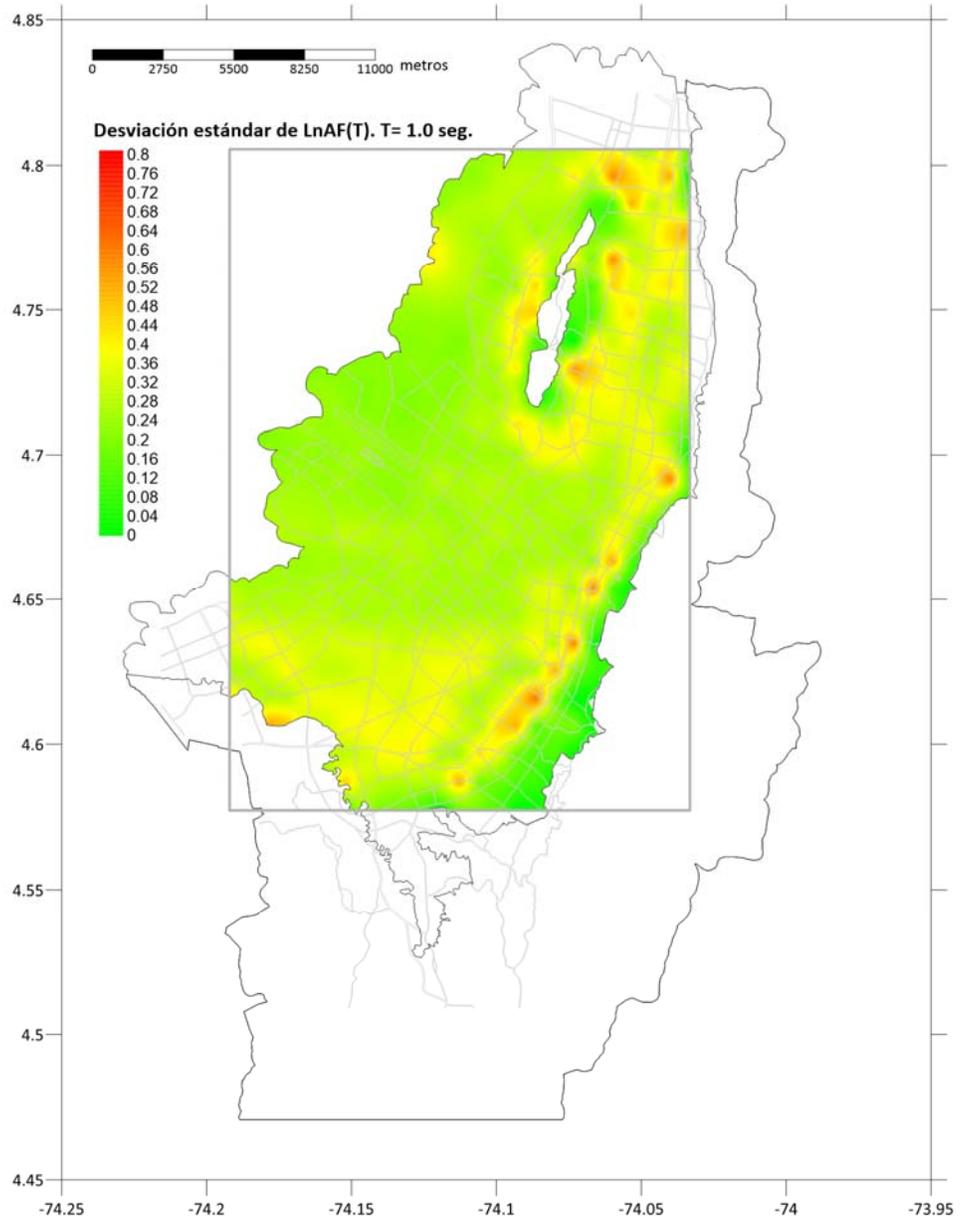
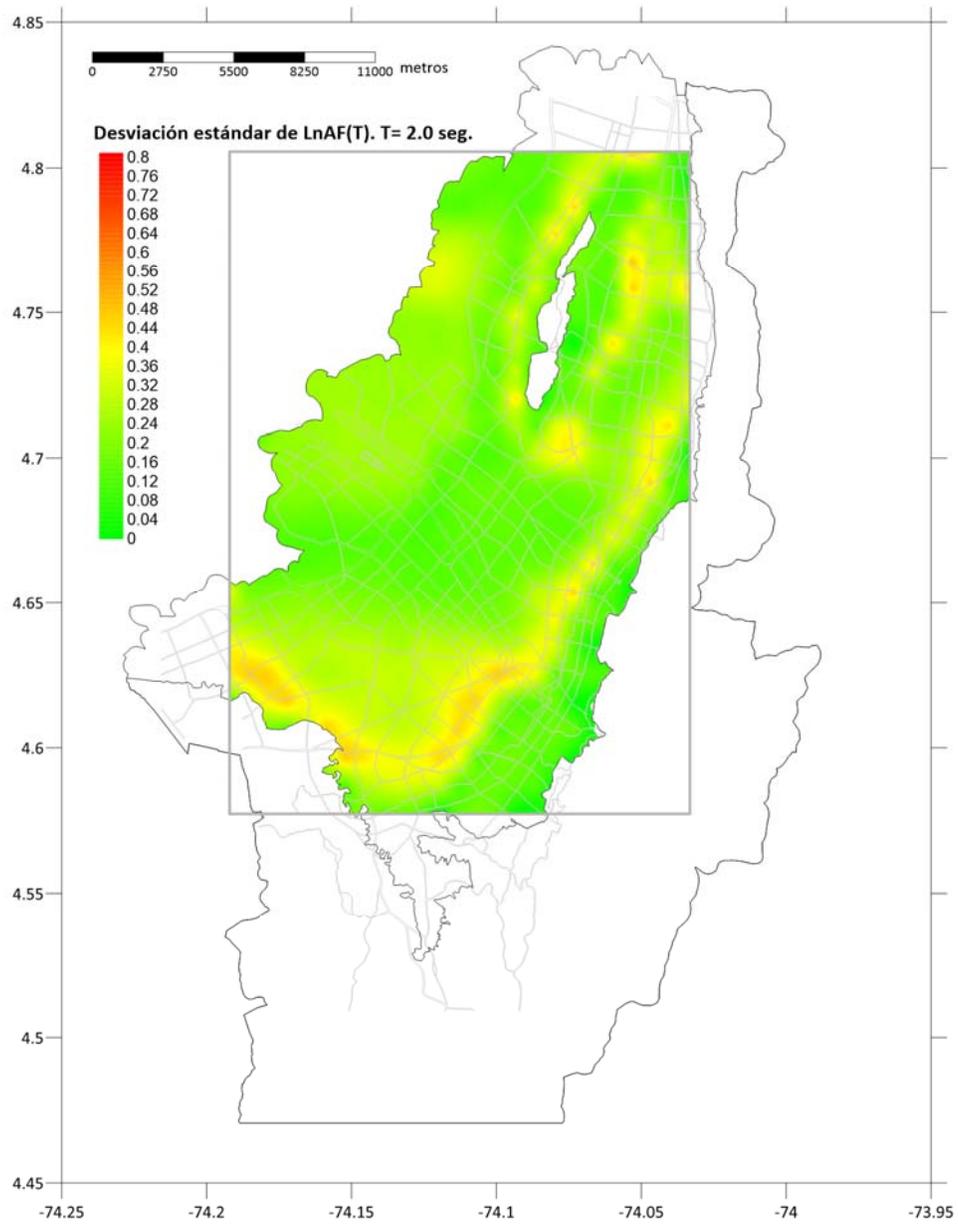


Figura 4-30. Distribución espacial de σ_{LnAF} para $T = 1.0$ seg.

Figura 4-31. Distribución espacial de σ_{LnAF} para $T = 2.0$ seg.

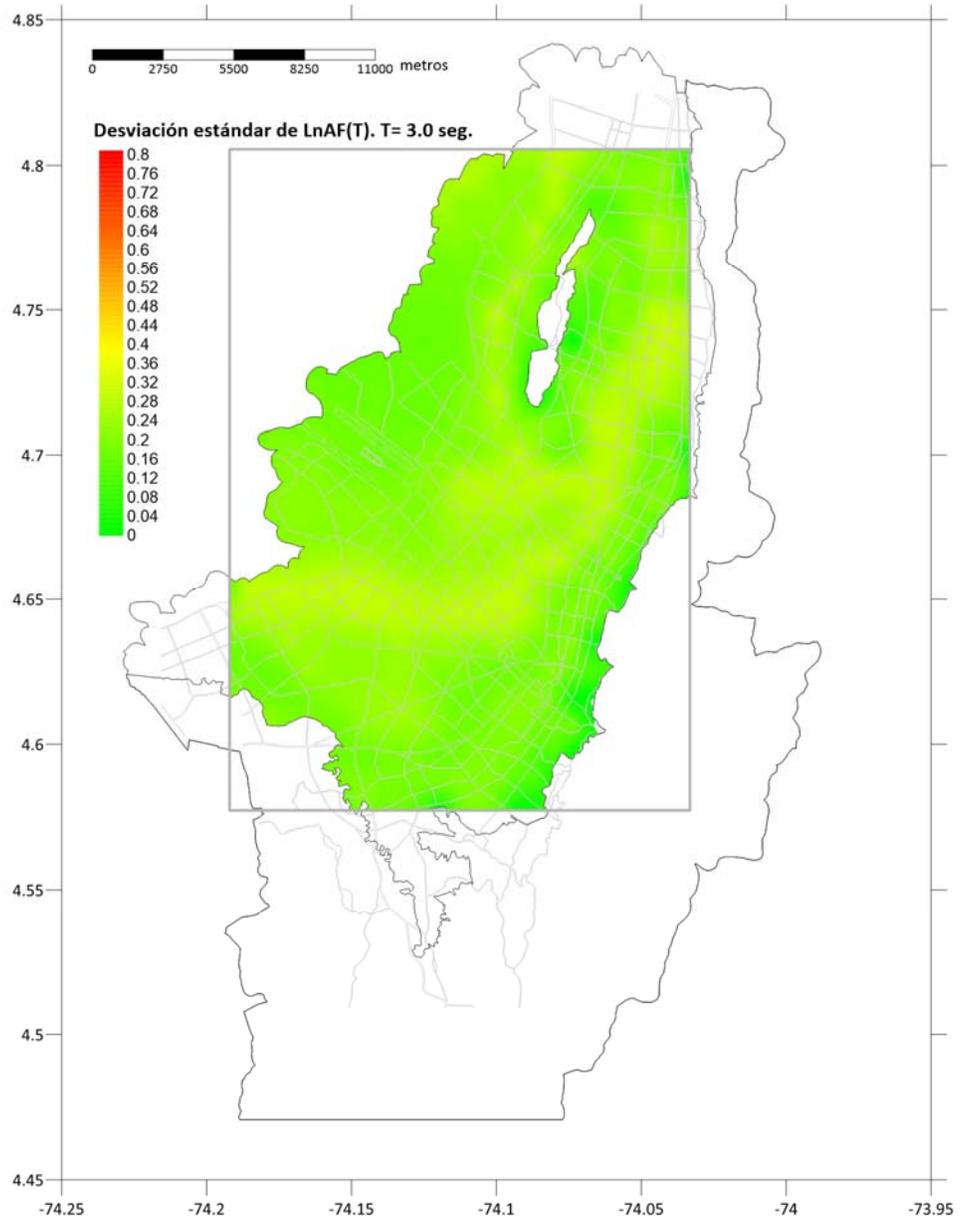


Figura 4-32. Distribución espacial de σ_{LnAF} para $T = 3.0$ seg.

4.3 APLICACIONES DEL MODELO DE EFECTOS DE SITIO EN BOGOTÁ

Una vez definido el modelo de efectos de sitio, puede aplicarse con diversos fines. En esta sección se presentan tres aplicaciones diferentes del modelo: i) para la obtención de funciones de transferencia del espectro de respuesta con fines de análisis de riesgo, ii) para el cálculo de shakemaps ante acelerogramas reales en roca firme con fines de respuesta a emergencias, y iii) para la microzonificación sísmica de la ciudad y obtención de espectros elásticos de diseño sismo-resistente.

4.3.1 FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DEL ESPECTRO DE RESPUESTA CON FINES DE ANÁLISIS DE RIESGO

Las funciones de transferencia del espectro de respuesta, $AF(T)$, son un resultado directo de la construcción del modelo, dado que se calculan con el objetivo de determinar $\sigma_{inAF(T)}$. Por lo tanto, su inclusión en análisis de riesgo es directa. En la Figura 4-34 a la Figura 4-45 se muestra la distribución espacial de los valores de $AF(T)$ para diferentes periodos estructurales (0, 0,1, 0,5, 1, 2 y 3 segundos), y para dos niveles de PGA en la base del depósito (50 y 400 cm/s^2).

Dado que $AF(T)$ puede estar definido por muchos periodos estructurales y para varios niveles de PGA, deben almacenarse cientos o miles de valores para describir los efectos de sitio con fines de análisis de riesgo. Huerta et.al. (2011) proponen un formato computacional especial que permite almacenar de manera organizada toda esta información. La Figura 4-33 muestra de manera esquemática la estructura de este formato, en el cual, para cada nodo de la malla de cálculo, se almacena su correspondiente $AF(T)$. El formato está compuesto de dos archivos:

1. Un archivo raster GRD de Surfer, con los valores del periodo fundamental de vibración del suelo.
2. Un archivo binario de extensión “.ft” que contiene la información de las funciones de amplificación del suelo, para cada ubicación de la malla de periodos.

Este formato fue empleado para el adecuado almacenamiento de las funciones de transferencia para Bogotá, de manera que los resultados de esta tesis pueden ser incorporados directamente en evaluaciones de riesgo.

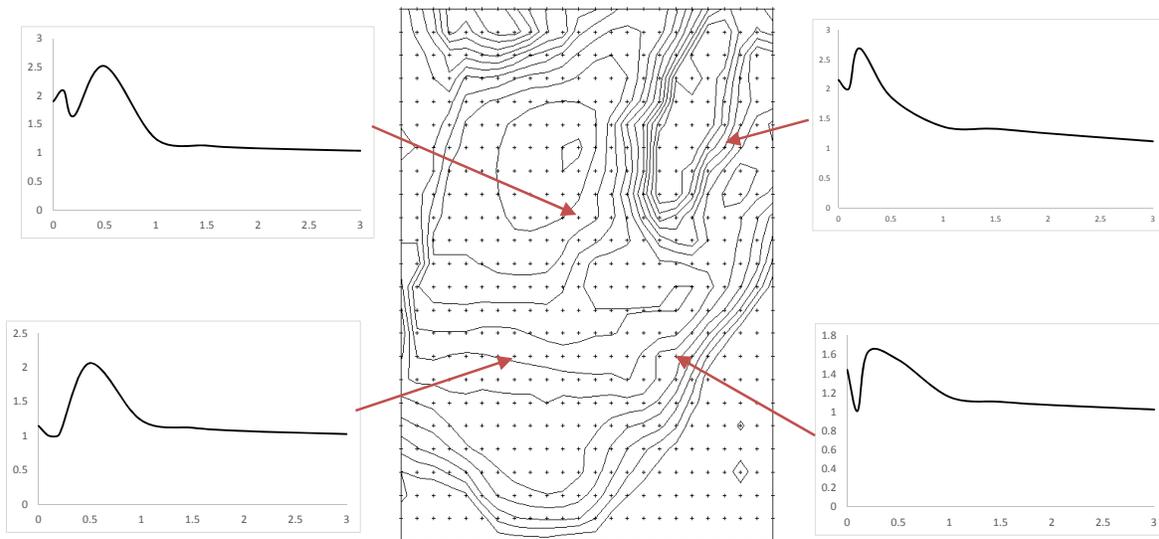


Figura 4-33. Esquema de la estructural del formato de efectos de sitio propuesto por Huerta et.al. 2011.

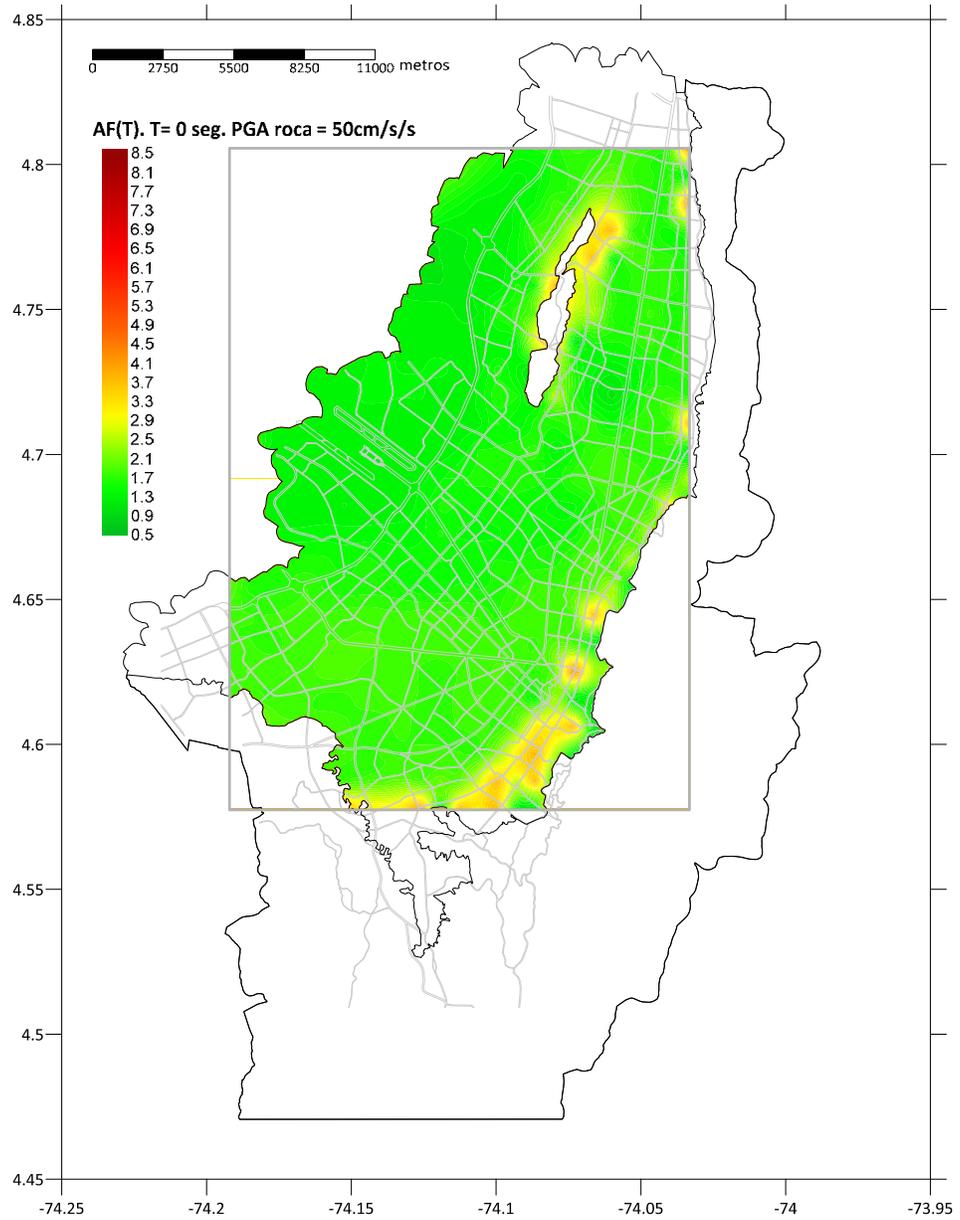


Figura 4-34. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para T=0 seg y PGA en roca = 50 cm/s².

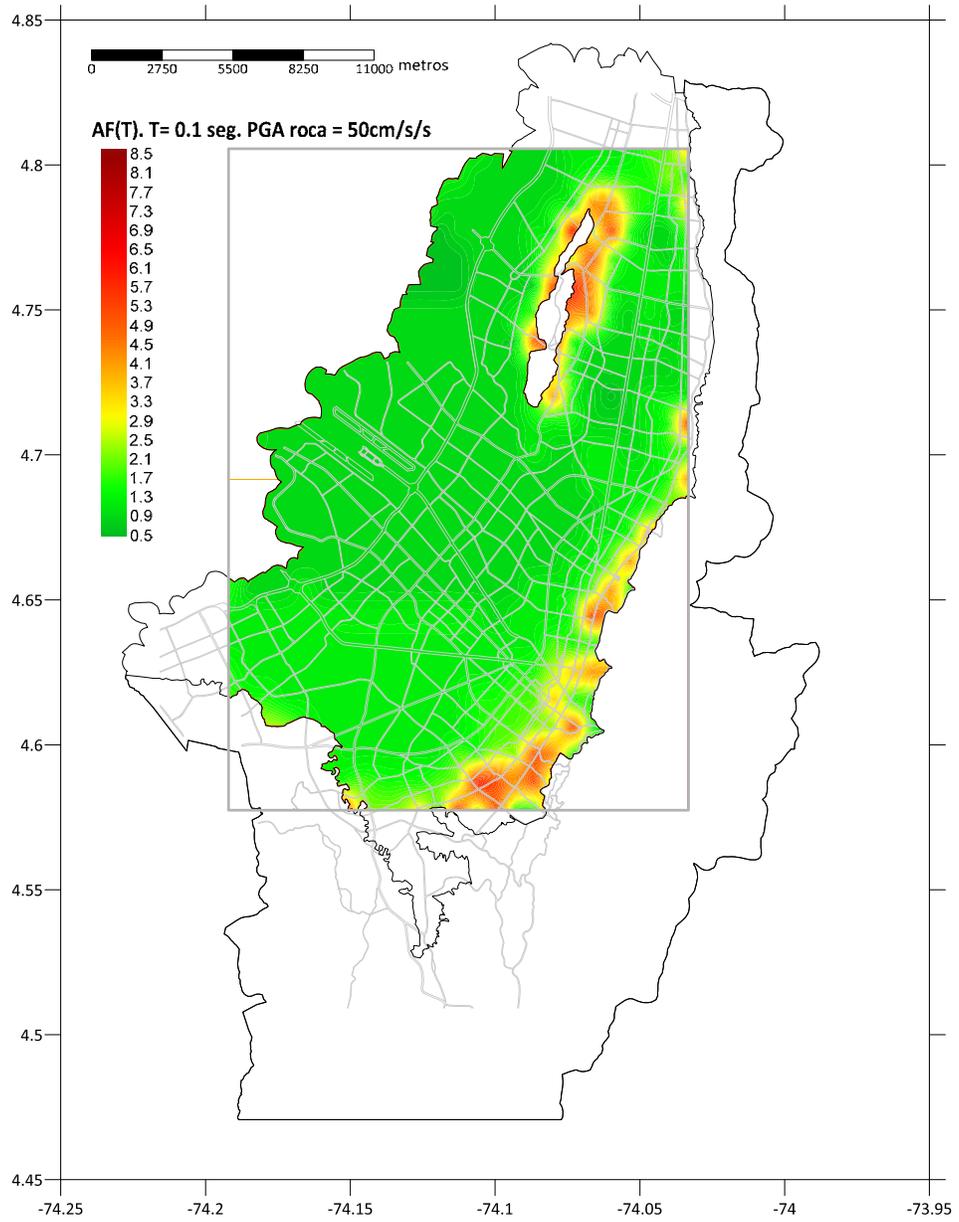


Figura 4-35. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para T=0.1 seg y PGA en roca = 50 cm/s².

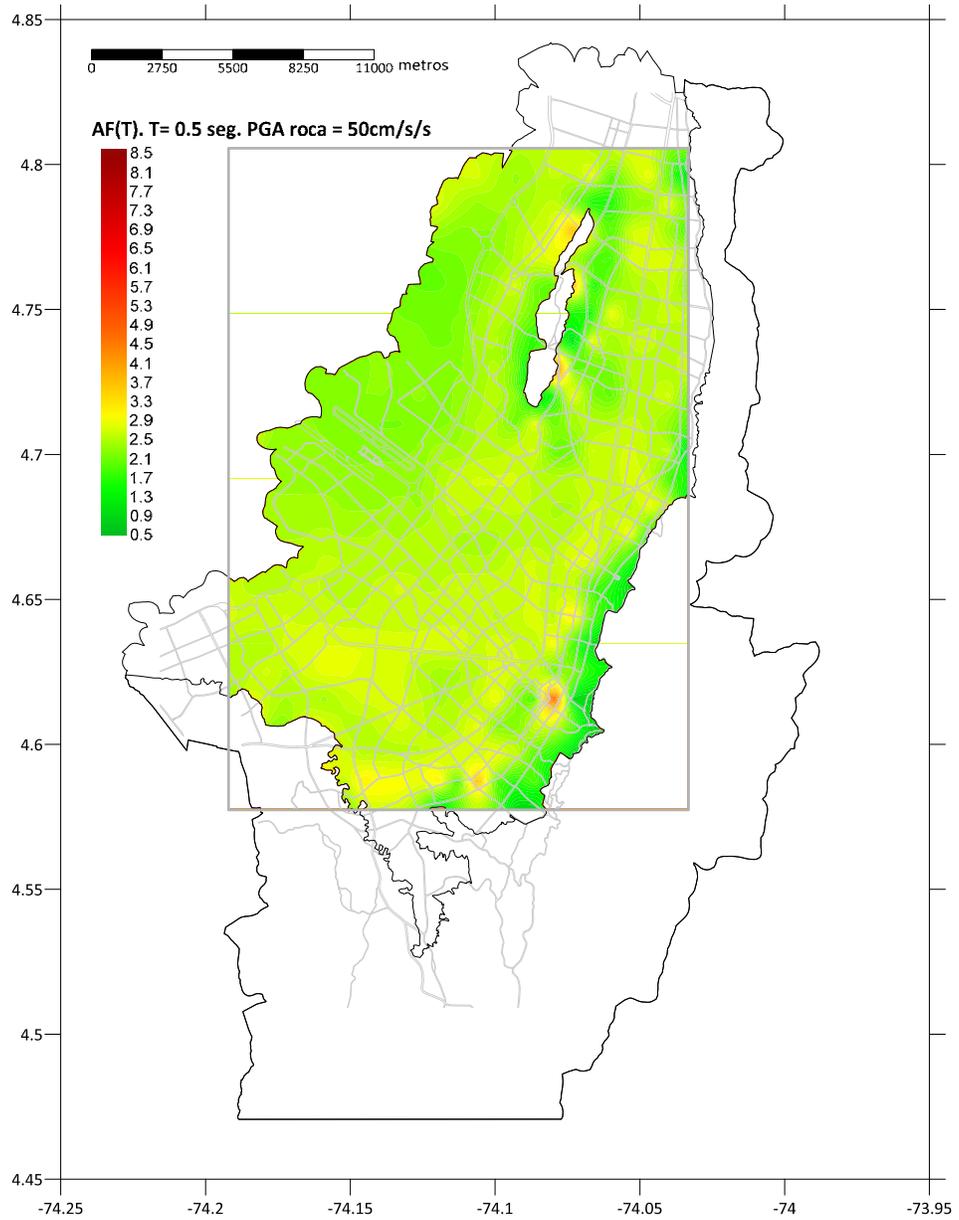


Figura 4-36. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=0.5$ seg y PGA en roca = 50 cm/s^2 .

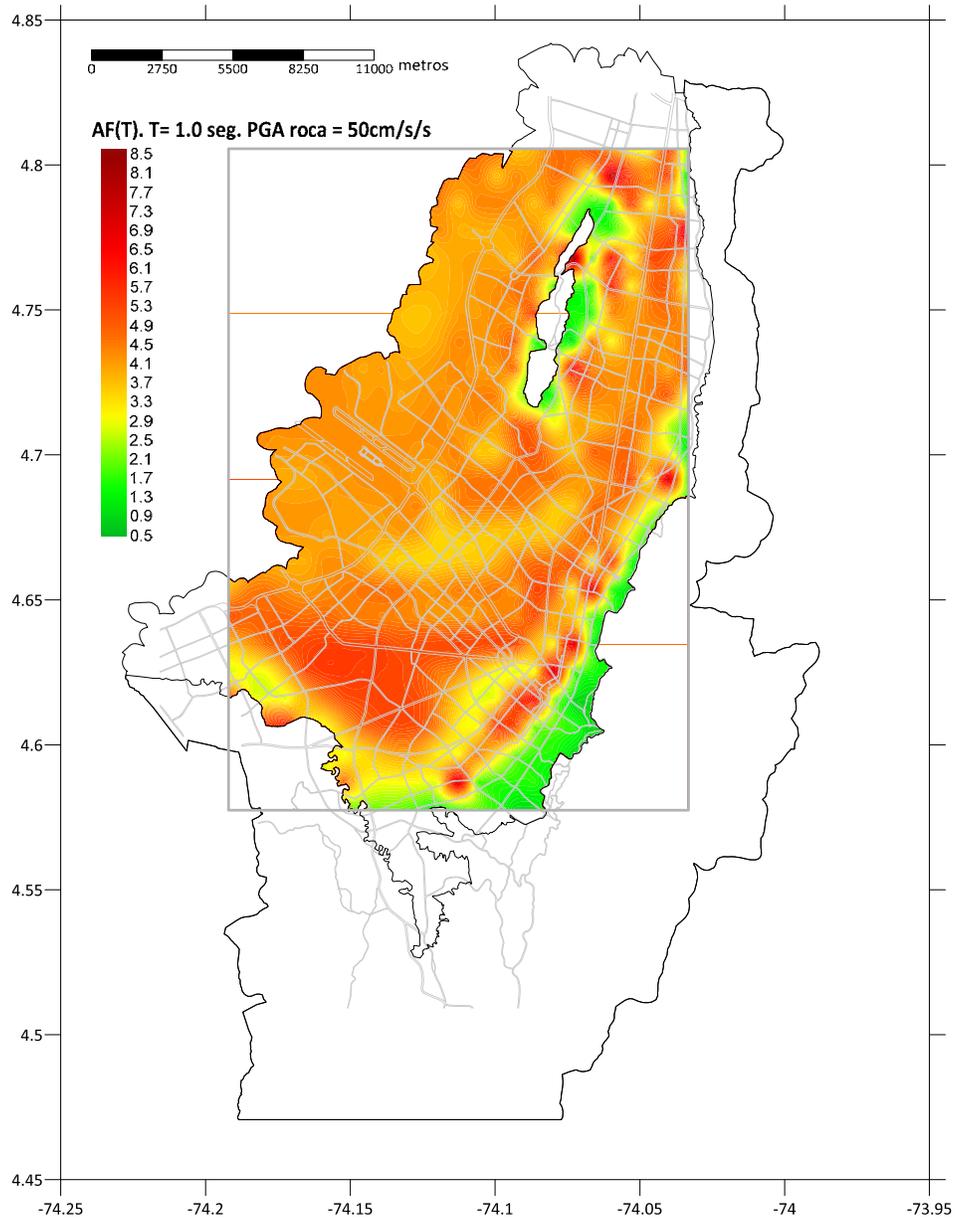


Figura 4-37. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para T=1 seg y PGA en roca = 50 cm/s².

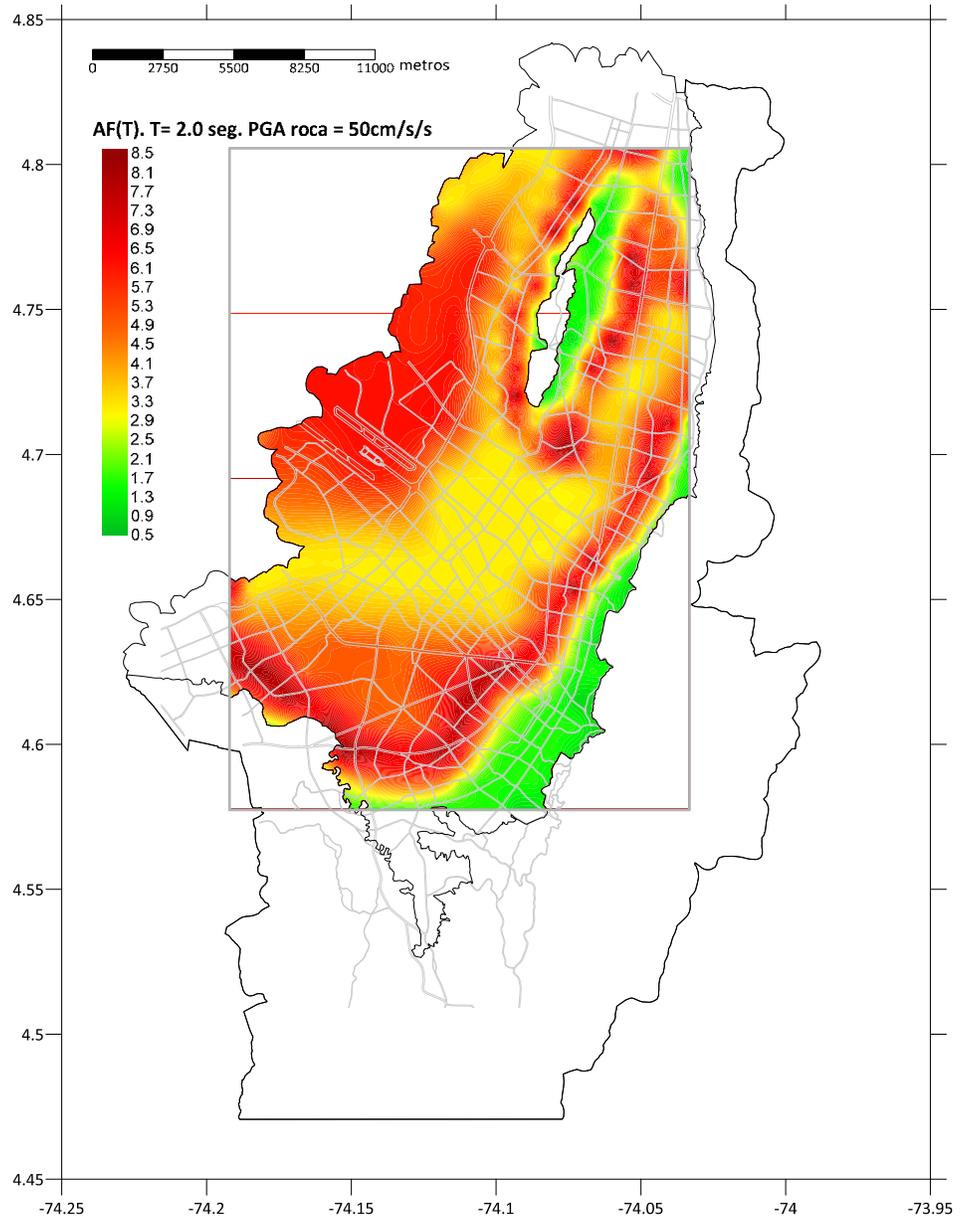


Figura 4-38. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=2$ seg y PGA en roca = 50 cm/s^2 .

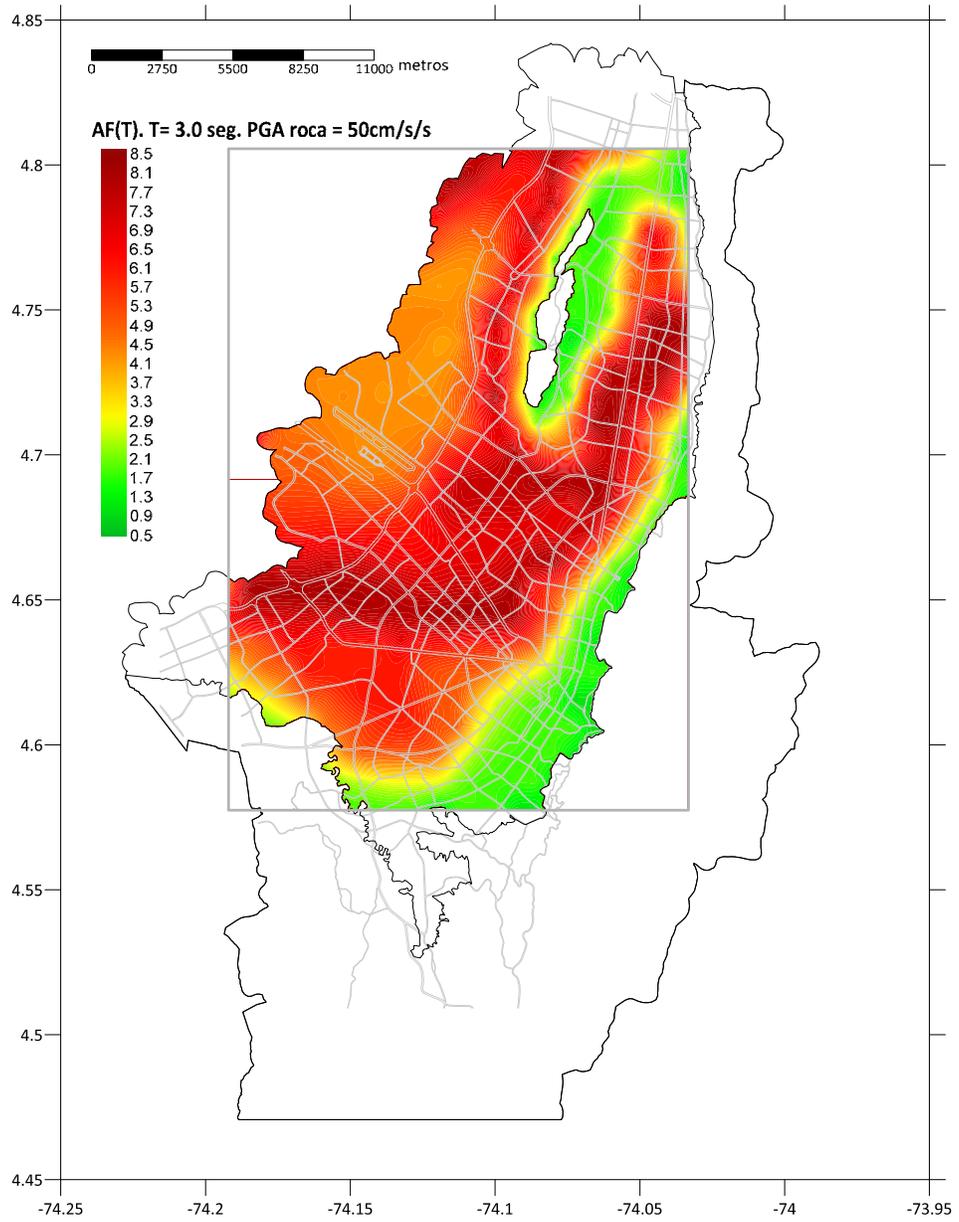


Figura 4-39. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para T=3 seg y PGA en roca = 50 cm/s².

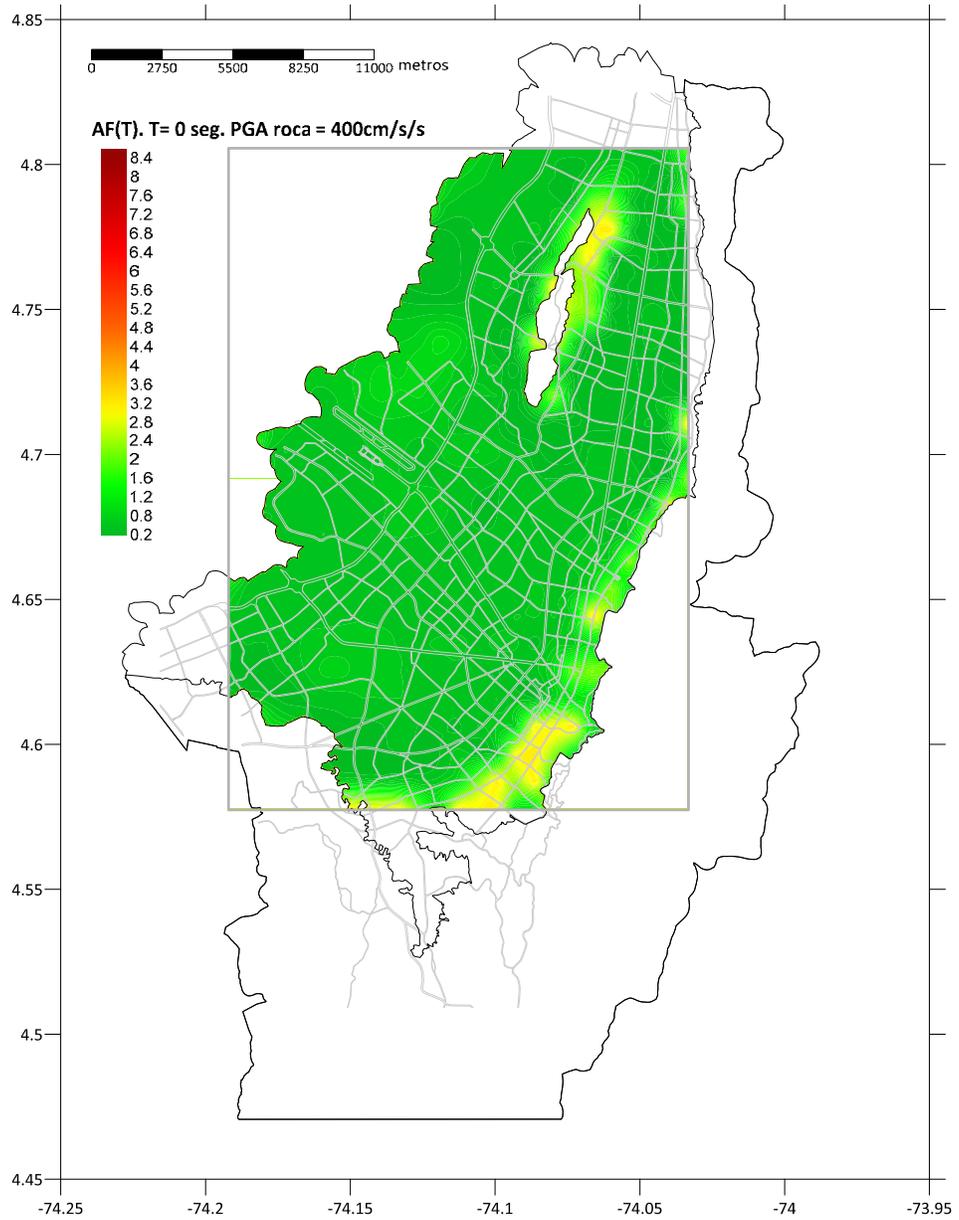


Figura 4-40. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para T=0 seg y PGA en roca = 400 cm/s².

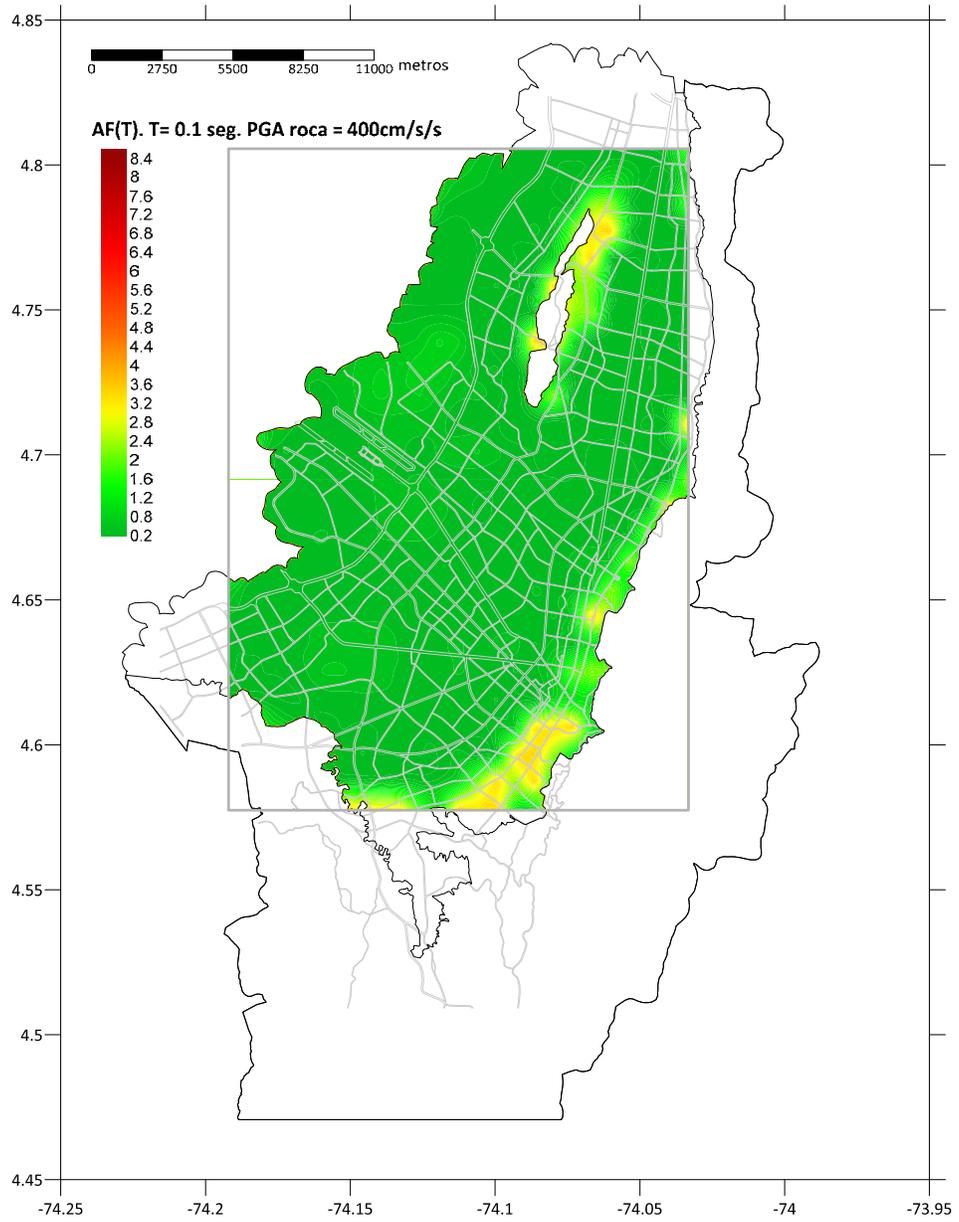


Figura 4-41. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para T=0.1 seg y PGA en roca = 400 cm/s².

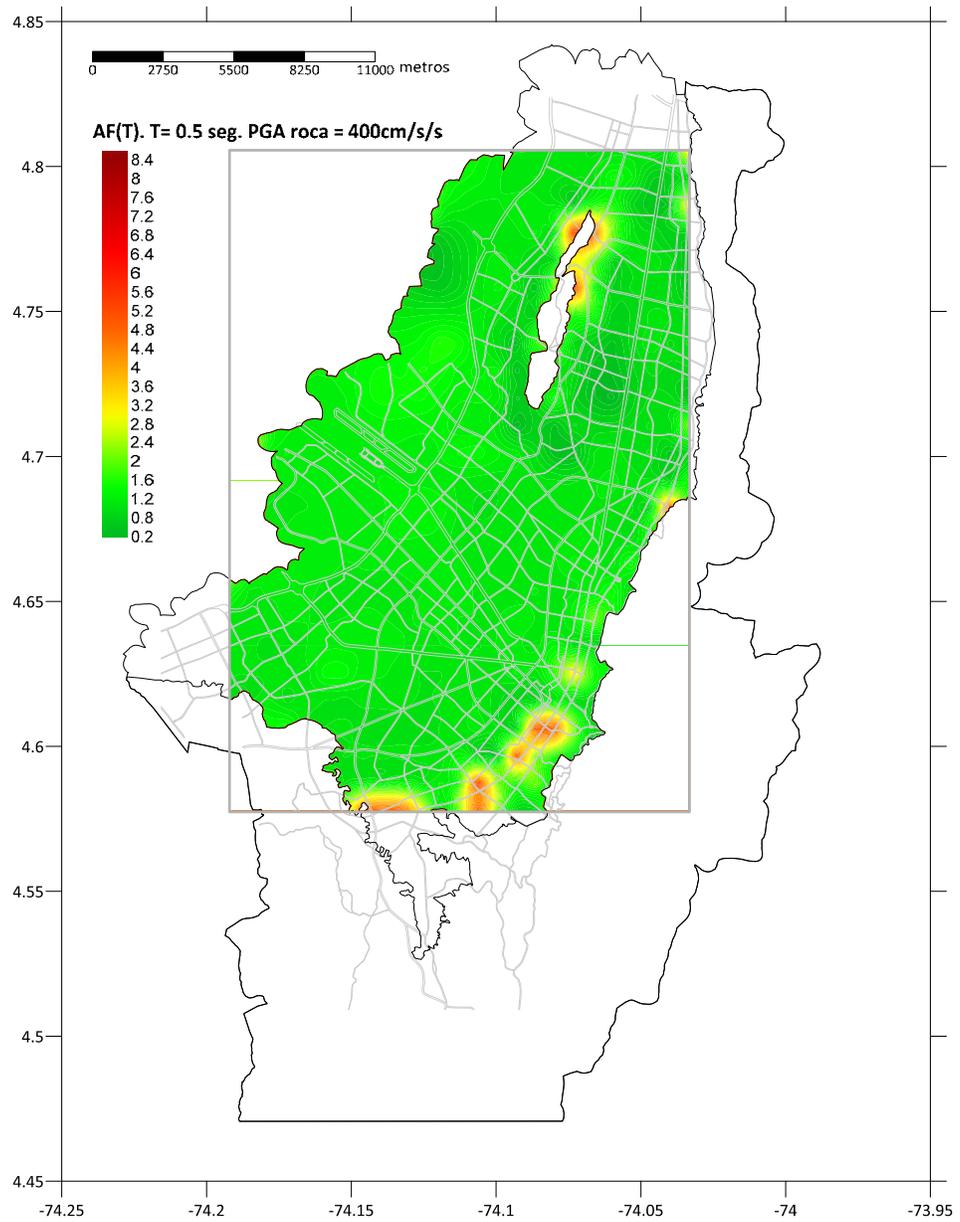


Figura 4-42. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para T=0.5 seg y PGA en roca = 400 cm/s².

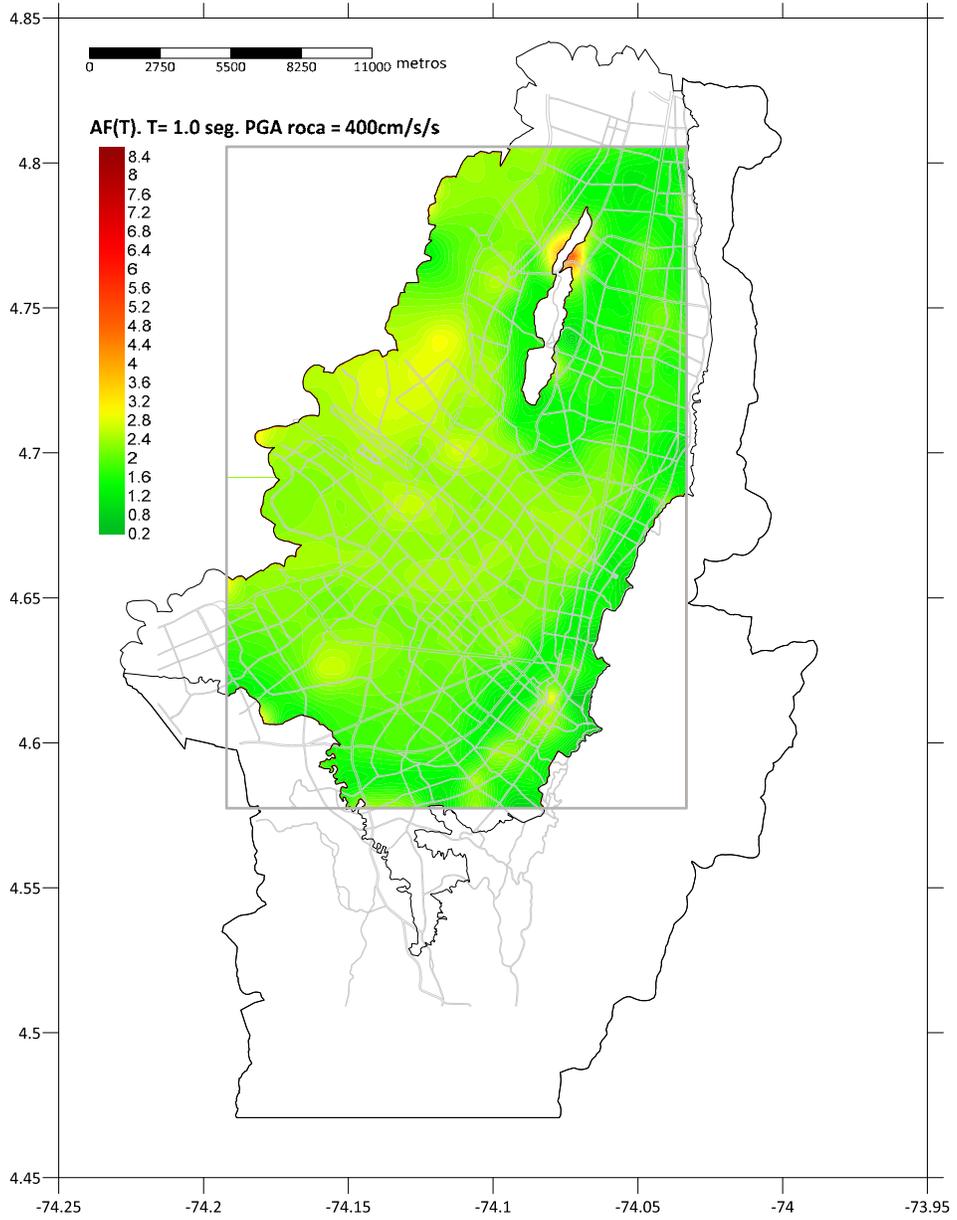


Figura 4-43. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=1$ seg y PGA en roca = 400 cm/s^2 .

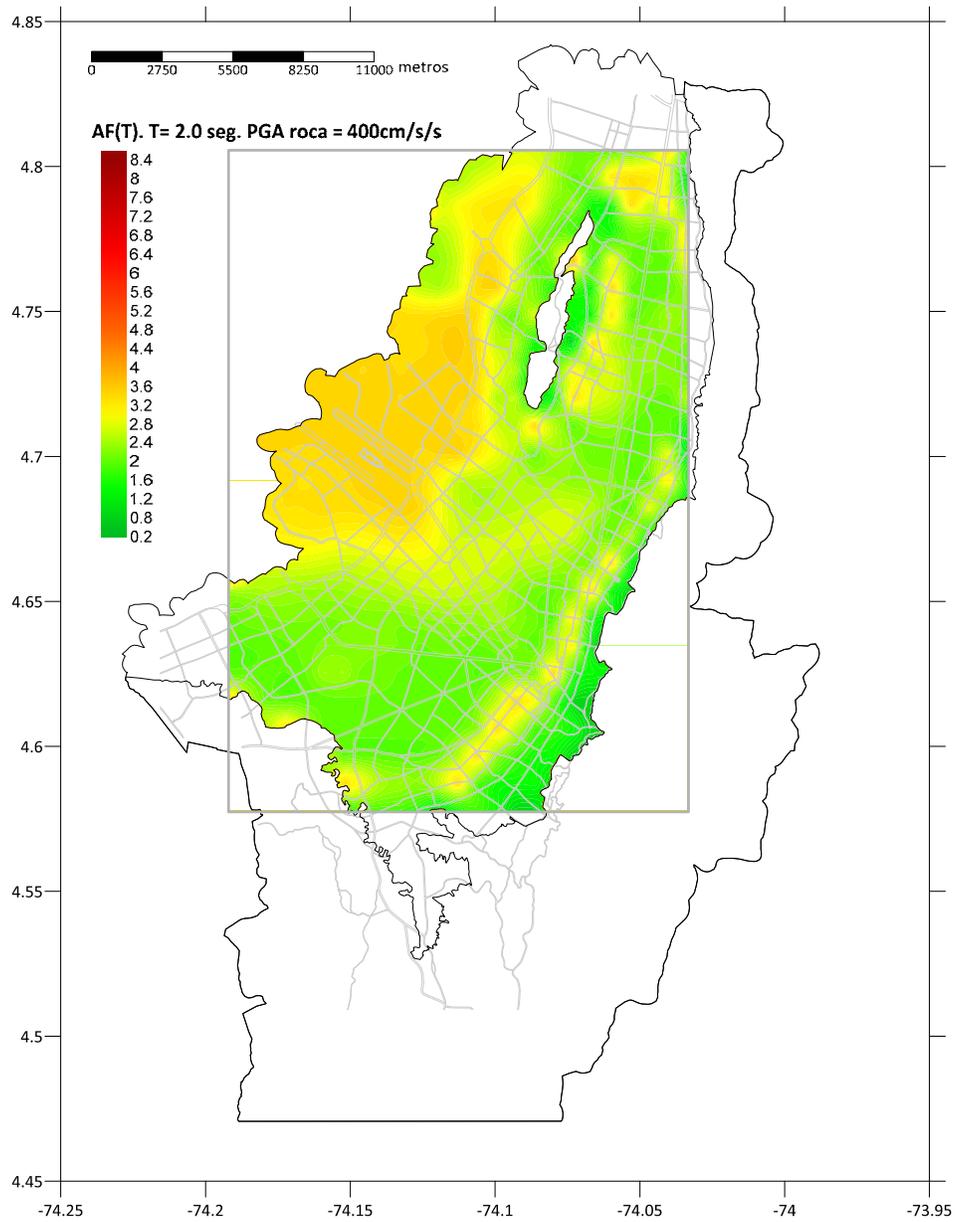


Figura 4-44. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para $T=2$ seg y PGA en roca = 400 cm/s^2 .

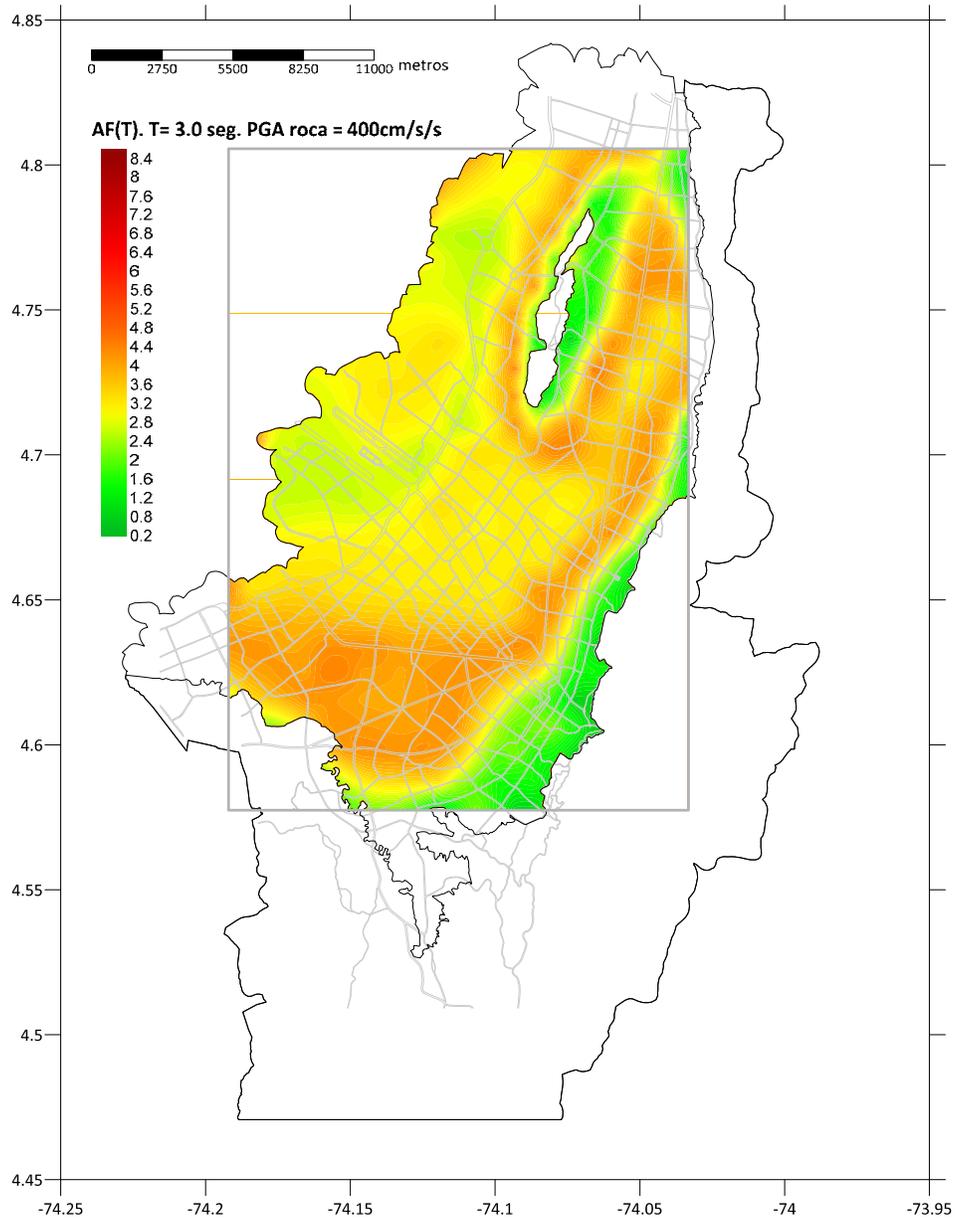


Figura 4-45. Factores de amplificación del espectro de respuesta, para T=3 seg y PGA en roca = 400 cm/s².

4.3.1.1 Evaluación del riesgo en Bogotá incluyendo efectos de sitio

Con el fin de demostrar la utilidad del modelo de respuesta desarrollado dentro de una evaluación real del riesgo, se presenta en esta sección la evaluación de pérdidas económicas sobre las edificaciones del sector educación de la ciudad de Bogotá. La Figura 4-46 muestra la ubicación de las 3427 edificaciones que componen el portafolio de educación de Bogotá. Toda la información presentada fue tomada de Zuloaga (2011).

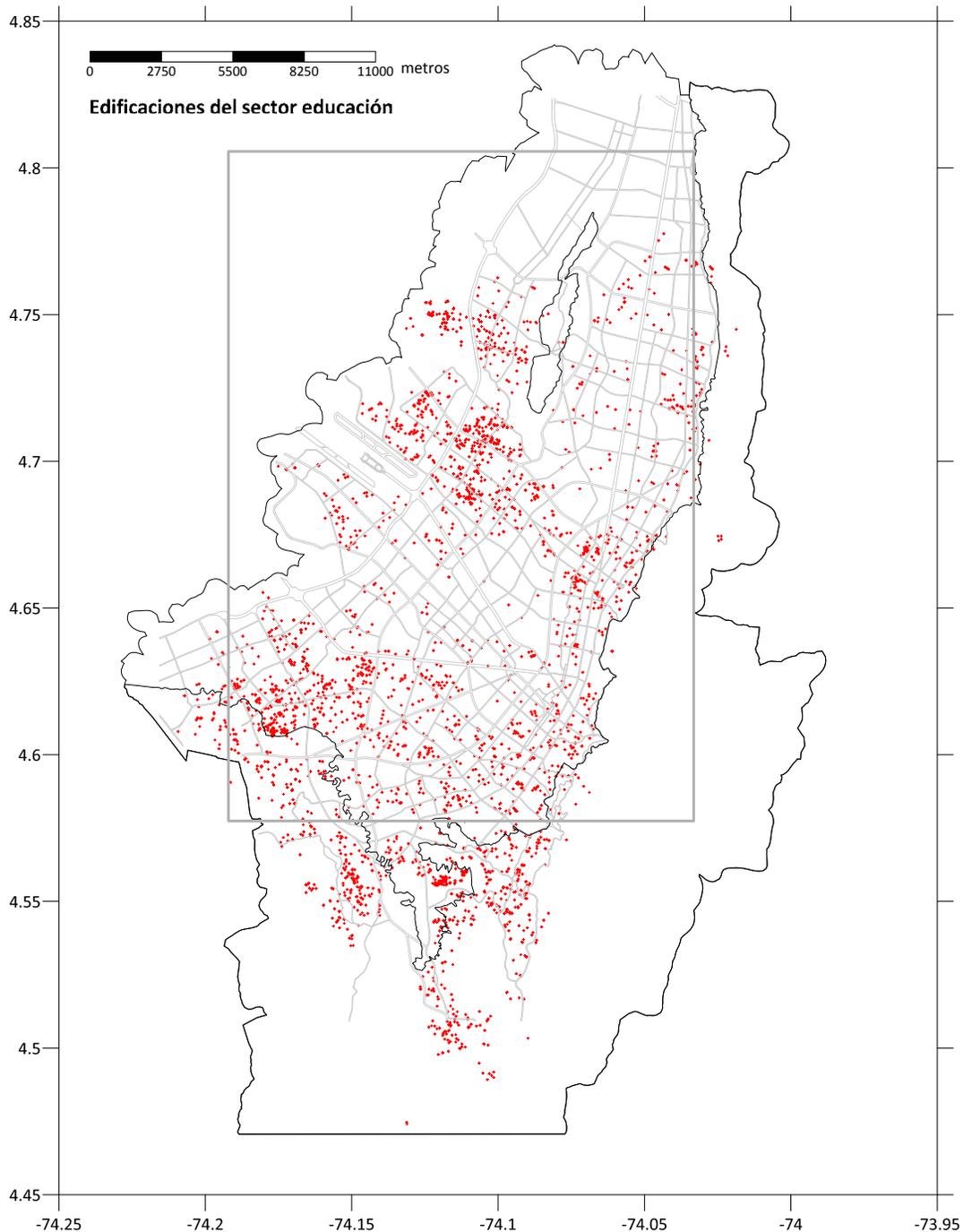


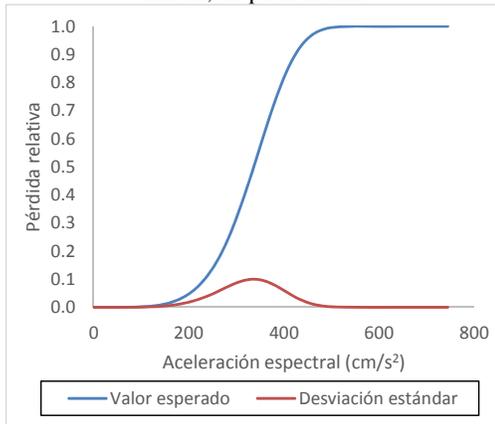
Figura 4-46. Portafolios de edificaciones de educación de Bogotá.

Para la evaluación del riesgo se emplearon las funciones de vulnerabilidad propuestas en Zuloaga (2011). Dichas funciones de vulnerabilidad están asociadas a los sistemas estructurales presentados en la Tabla 4-4, los cuales agrupan todas las edificaciones contenidas en el portafolio de educación de Bogotá. La Figura 4-47 y la Figura 4-48 muestran las funciones de vulnerabilidad de cada uno de los sistemas listados en la Tabla 4-4, en términos de sus funciones de valor esperado y desviación estándar de la pérdida, para la intensidad de movimiento fuerte correspondiente.

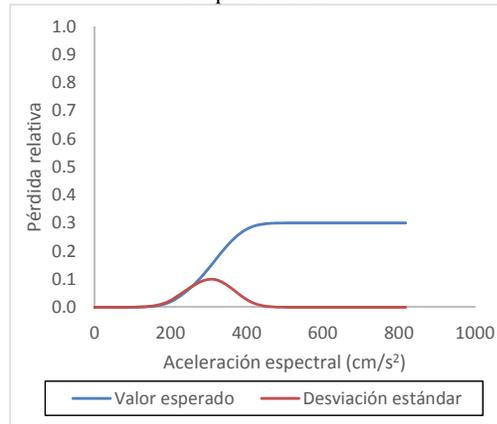
Tabla 4-4. Sistemas estructurales de edificaciones en Bogotá.

Código	Sistema estructural	Diafragma	Cubierta	Fachada	Altura
S_MS-SLSB-1	Mampostería simple	Sin diafragma	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_MS-RLSB-2	Mampostería simple	Diafragma rígido	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_CP-SLSB-1	Concreto prefabricado	Sin diafragma	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_CP-FLSB-2	Concreto prefabricado	Diafragma flexible	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_PAA-SLSB-B	Pórticos en acero arriostrados	Sin diafragma	Ligera	Frágil sin dilatar	Medio
S_A-SLSB-1	Adobe	Sin diafragma	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_A-FPSB-2	Adobe	Diafragma flexible	Pesada	Frágil sin dilatar	Bajo
S_PCR-RLSB-2	Pórticos en concreto resistentes a momentos	Diafragma rígido	Ligera	Frágil sin dilatar	Bajo
S_PCM-RCSB-5	Pórticos y muros en concreto	Diafragma rígido	Concreto	Frágil sin dilatar	Alto
S_PCL-RCSB-2	Pórticos en concreto, losa-columna	Diafragma rígido	Concreto	Frágil sin dilatar	Bajo

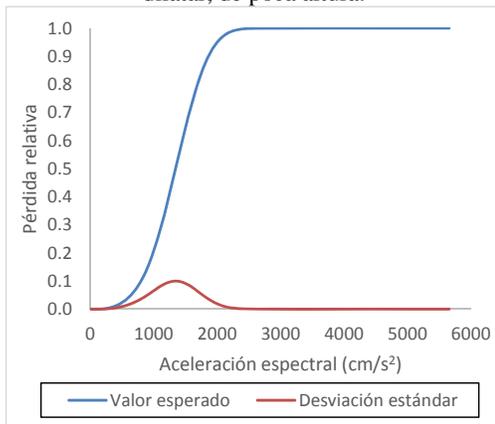
S_MS-SLSB-1: Mampostería simple, sin diafragma, cubierta ligera, fachada frágil sin dilatar, de poca altura.



S_MS-RLSB-2: Mampostería simple, diafragma rígido, cubierta ligera, fachada frágil sin dilatar, de poca altura.



S_CP-SLSB-1: Concreto prefabricado, sin diafragma, cubierta ligera, fachada frágil sin dilatar, de poca altura.



S_CP-FLSB-2: Concreto prefabricado, diafragma flexible, cubierta ligera, fachada frágil sin dilatar, de poca altura.

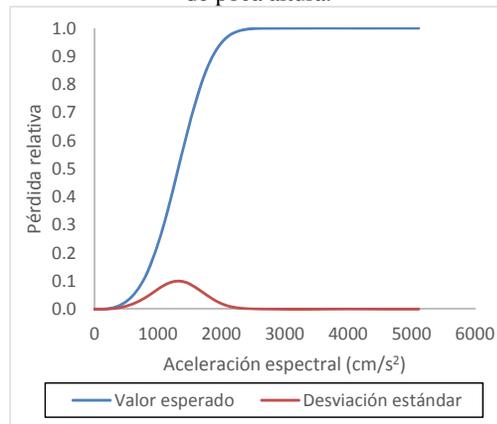
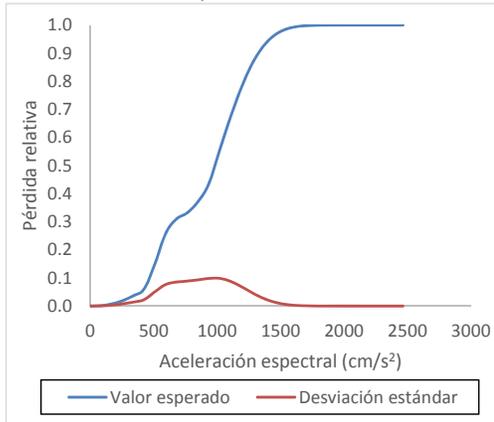
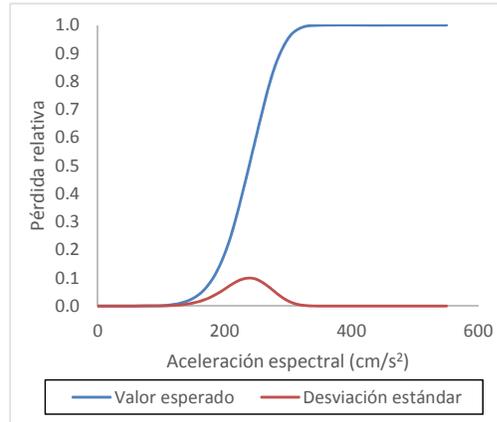


Figura 4-47. Funciones de vulnerabilidad de los sistemas estructurales de Bogotá.

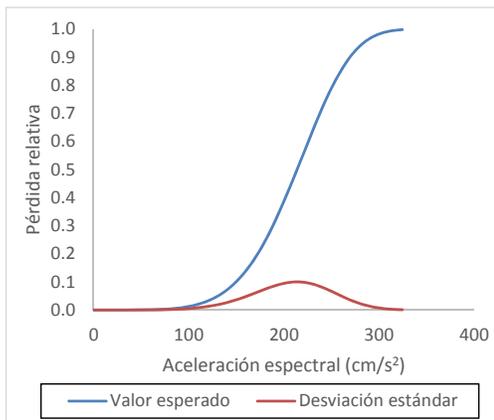
S_PAA-SLSB-B: Pórticos en acero arriostrados, sin diafragma, cubierta ligera, fachada frágil sin dilatar, de media altura.



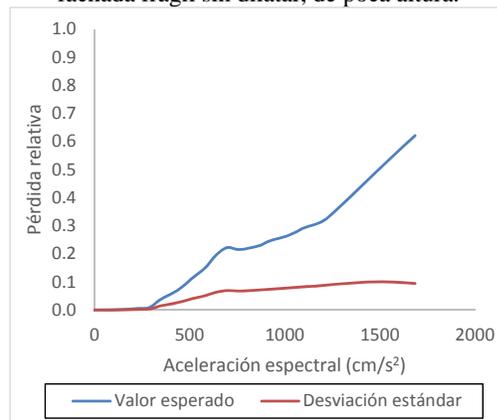
S_A-SLSB-1: Adobe, sin diafragma, cubierta ligera, fachada frágil sin dilatar, de poca altura.



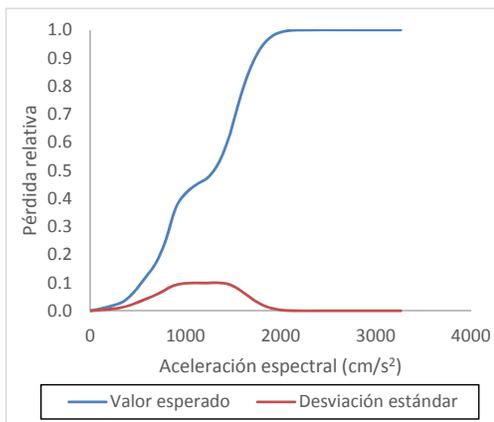
S_A-FPSB-2: Adobe, diafragma flexible, cubierta pesada, fachada frágil sin dilatar, de poca altura.



S_PCR-RLSB-2: Pórticos en concreto resistentes a momentos, diafragma rígido, cubierta ligera, fachada frágil sin dilatar, de poca altura.



S_PCM-RCSB-5: Pórticos y muros en concreto, diafragma rígido, cubierta concreto, fachada frágil sin dilatar, de gran altura.



S_PCL-RCSB-2: Pórticos en concreto, losa-columna, diafragma rígido, cubierta concreto, fachada frágil sin dilatar, de poca altura.

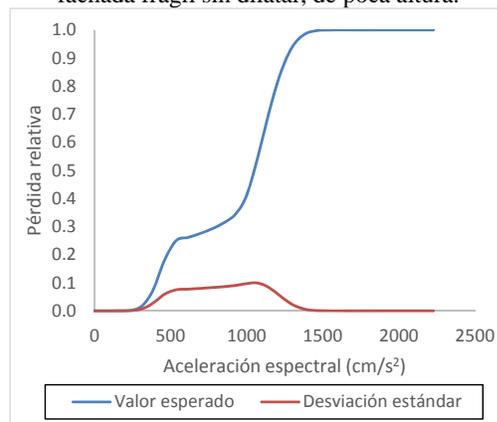


Figura 4-48. Funciones de vulnerabilidad de los sistemas estructurales de Bogotá.

Con la información de exposición y vulnerabilidad presentada, se procedió al cálculo del riesgo sísmico de del portafolio de educación de Bogotá. Con el fin de demostrar la importancia de los efectos de sitio en la evaluación del riesgo, se calcularon las pérdidas en el portafolio de

educación, con y sin la capa de amplificación del suelo generada en esta tesis. La Tabla 4-5 muestra de manera comparativa los resultados obtenidos. Se presentan las pérdidas anuales esperadas para ambos casos, así como las pérdidas máximas probables (PML) para cuatro periodos de retorno seleccionados. Se indica también un incremento porcentual en estas métricas, calculado como la diferencia en los valores de pérdida obtenida en cada caso, dividida sobre el valor calculado sin considerar los efectos de sitio.

Tabla 4-5. Resumen de resultados de la evaluación del riesgo.

Con efectos de sitio			Sin efectos de sitio			Incremento
Resultados			Resultados			Pérdida anual esperada
Valor Expuesto	USD\$ x10⁶	1,666,660.00	Valor Expuesto	USD\$ x10⁶	1,666,660.00	
Pérdida anual esperada	USD\$ x10⁶	6,813.705	Pérdida anual esperada	USD\$ x10⁶	4,279.928	59.2%
	%	4.088		%	2.568	
PML			PML			PML
Periodo retorno	Pérdida		Periodo retorno	Pérdida		
años	USD\$ x10⁶	%	años	USD\$ x10⁶	%	
100	\$97,493.33	5.85	100	\$73,740.89	4.42	
250	\$160,541.75	9.63	250	\$131,000.00	7.86	
500	\$225,259.30	13.52	500	\$193,775.50	11.63	
1000	\$293,400.62	17.60	1000	\$263,843.51	15.83	

La Figura 4-49 muestra la comparación de las curvas de excedencia de pérdidas calculadas con y sin efectos de sitio. Estas curvas dan cuenta de la tasa anual de excedencia de valores de pérdida, la cual indica el número de veces en un año que se espera, en promedio, que se igual o se exceda un valor específico de pérdida. La Figura 4-50 muestra esta misma información pero en términos de la curva de pérdidas máximas probables (PML). Finalmente la Figura 4-51 muestra la probabilidad de excedencia de valores de pérdida (probabilidad de quiebra), para diferentes ventanas de exposición en años, con y sin efectos de sitio.

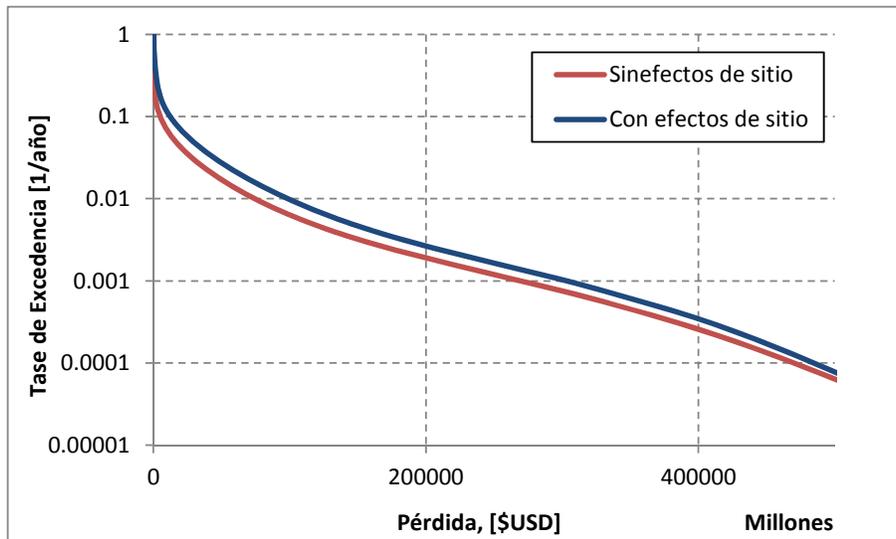


Figura 4-49. Comparación de las curvas de excedencia de pérdidas del portafolio de educación.

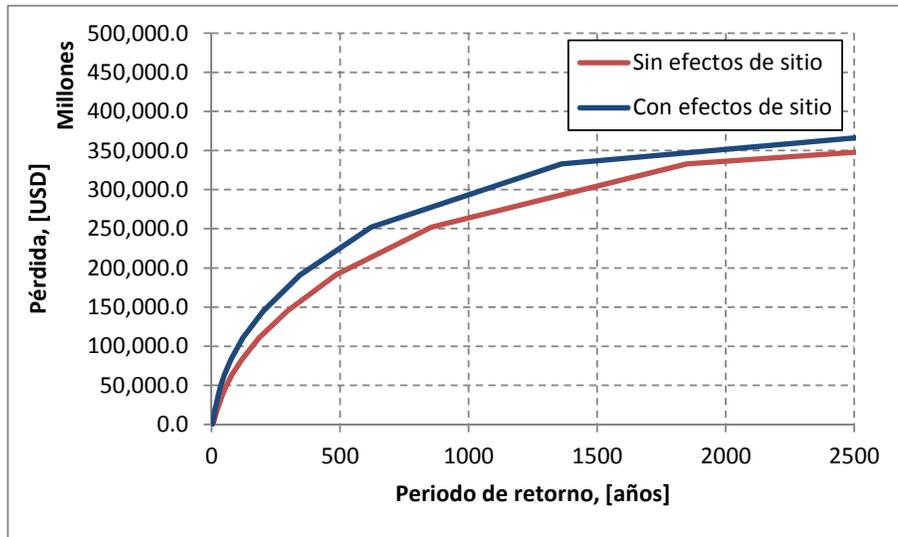


Figura 4-50. Comparación de las curvas de excedencia de PML del portafolio de educación.

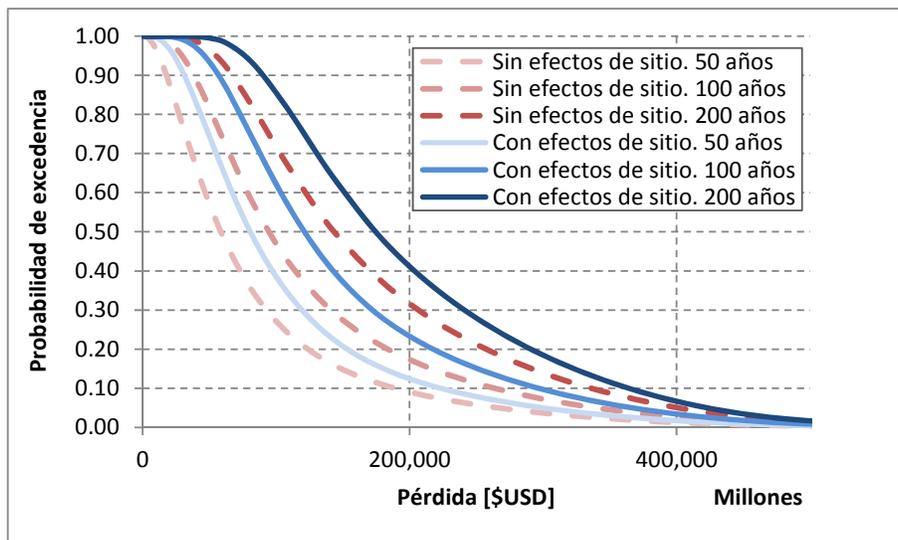


Figura 4-51. Comparación de las curvas de probabilidad de quiebra del portafolio de educación, para diferentes ventanas de exposición.

De las cifras y gráficas mostradas, puede evidenciarse la importancia de los efectos de sitio en la evaluación del riesgo. De no considerarse estos efectos apropiadamente, puede presentarse una subestimación importante en las pérdidas, lo cual conlleva a la generación de estrategias de gestión del riesgo basadas en evaluaciones limitadas, que resultan inadecuadas ante los niveles reales de riesgo existentes. El incremento en la pérdida anual esperada, por ejemplo, al considerar los efectos de sitio en el cálculo es del 59.2%. Para el caso del PML de, por ejemplo, 1000 años, el incremento es del 11.2%. Estas diferencias juegan un papel decisivo a la hora de establecer una política de gestión del riesgo en la ciudad. Si la ciudad quisiera, por ejemplo, asegurar sus edificaciones de educación, podría darse una situación de infra seguro si no se consideran de manera apropiada los efectos de sitio en la evaluación de las pérdidas. Así mismo sucede con otras estrategias de gestión del riesgo. En resumen, es de suma importancia la adecuada caracterización de los efectos de sitio y su adecuada inclusión en los cálculos probabilistas de pérdidas, con el fin de obtener resultados verdaderamente útiles.

4.3.2 GENERACIÓN DE SHAKEMAPS

Dentro de los sistemas automáticos de evaluación de daños post-terremoto, como el SISBog-LISA de la ciudad de Bogotá (Bernal, 2009), la generación de shakemaps es un paso importante dado que provee la distribución espacial del movimiento fuerte tras la ocurrencia de un terremoto. En resumen, estos sistemas registran un acelerograma de movimiento fuerte en una estación ubicada preferiblemente sobre roca firme y, de manera automática, obtienen la distribución de parámetros de movimiento fuerte (shakemap) en toda la extensión de la ciudad, haciendo uso de funciones de transferencia precalculadas, y en seguida calculan los daños esperados en todas las edificaciones dentro de la ciudad, con base en funciones de vulnerabilidad predefinidas. La Figura 4-52 presenta de manera esquemática el proceso de funcionamiento del sistema SISBog-LISA (Bernal, 2009).

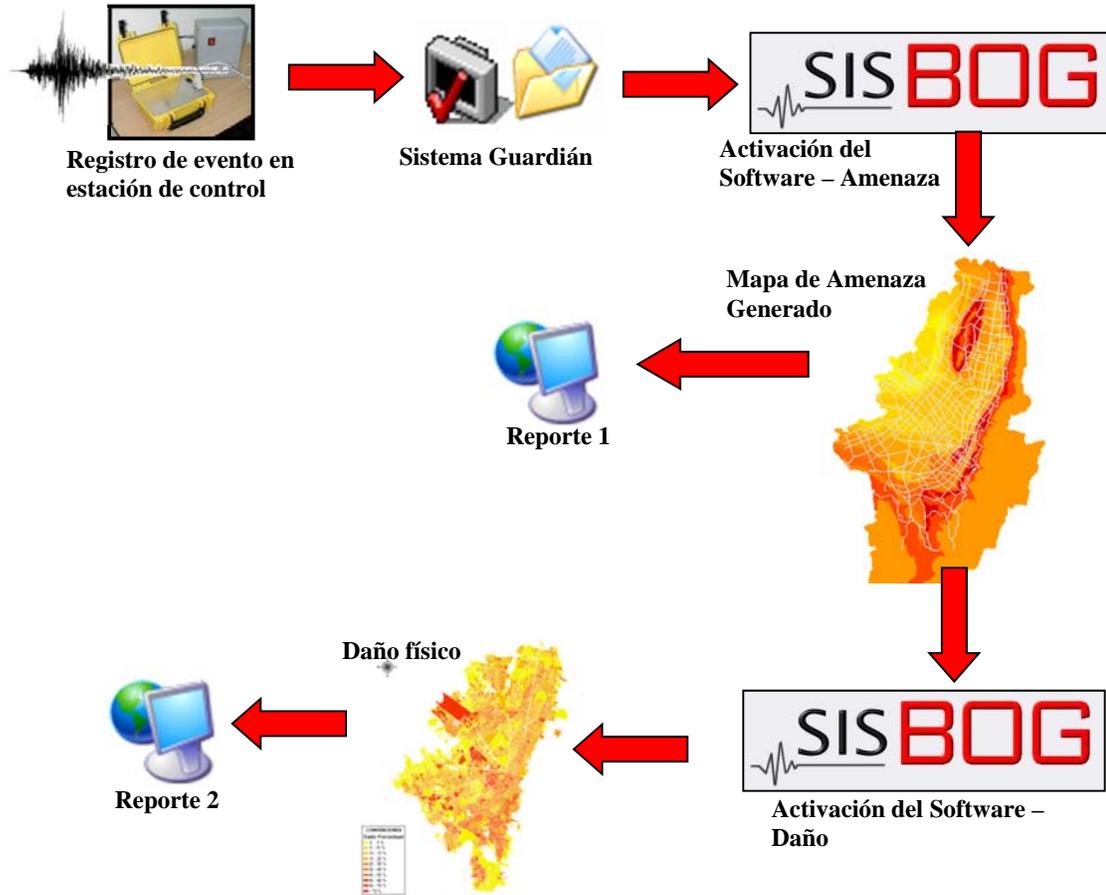


Figura 4-52. Esquema de funcionamiento del software SISBog-LISA (Bernal, 2009).

En particular, el SISBog-LISA está diseñado de manera que pueda enviar reportes a los usuarios autorizados en cuestión de pocos minutos. Si bien la velocidad de cálculo y envío de reportes depende del hardware y de la calidad de la conexión a internet con que se cuente, al momento de su desarrollo el sistema enviaba el primer reporte luego de 2 minutos de registrado el sismo, y el segundo reporte luego de 7 minutos de registrado (Bernal, 2009). Esto provee información de gran valor y en poco tiempo, a las entidades encargadas de la respuesta a la emergencia.

Haciendo uso del modelo desarrollado en esta tesis, si se conoce el acelerograma a nivel de roca firme, el cual puede asumirse como uniforme en toda la extensión de la ciudad, es posible calcular, en cuestión de pocos minutos, los acelerogramas resultantes en superficie, en los 625 sitios de

cálculo definidos. Esto permite por supuesto generar shakemaps en términos de cualquier parámetro de movimiento fuerte.

A modo de ejemplo, se calculó la respuesta dinámica en los 625 sitios del modelo, ante el acelerograma del sismo de Armenia (Eje Cafetero), Colombia, del 19 de enero de 1999, de magnitud Mw 6.2, registrado en la estación Bocatoma. La Figura 4-53 muestra el acelerograma registrado. De la Figura 4-54 a la Figura 4-61 se muestran los mapas de distribución de la aceleración espectral, para periodos estructurales entre 0 y 3 segundos. Estos cálculos fueron realizados con el programa Seismic Microzonation Studio (Anexo F), desarrollado en esta tesis para la conformación del modelo de efectos de sitio. El cálculo en todos los 625 sitios tardó, en total, 2.3 minutos.

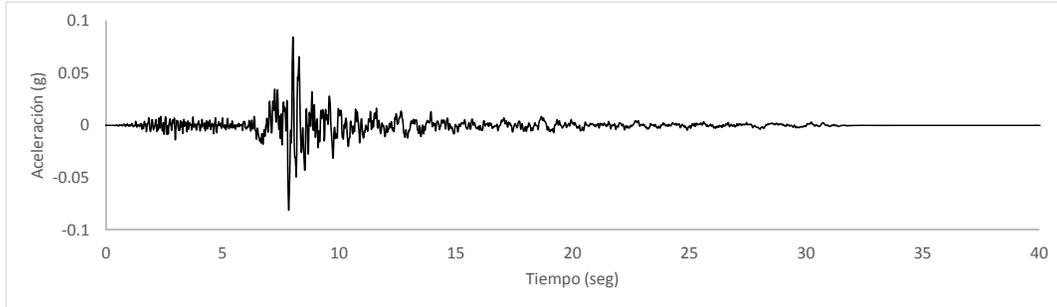


Figura 4-53. Acelerograma del sismo de Armenia (1999) registrado en la estación Bocatoma.

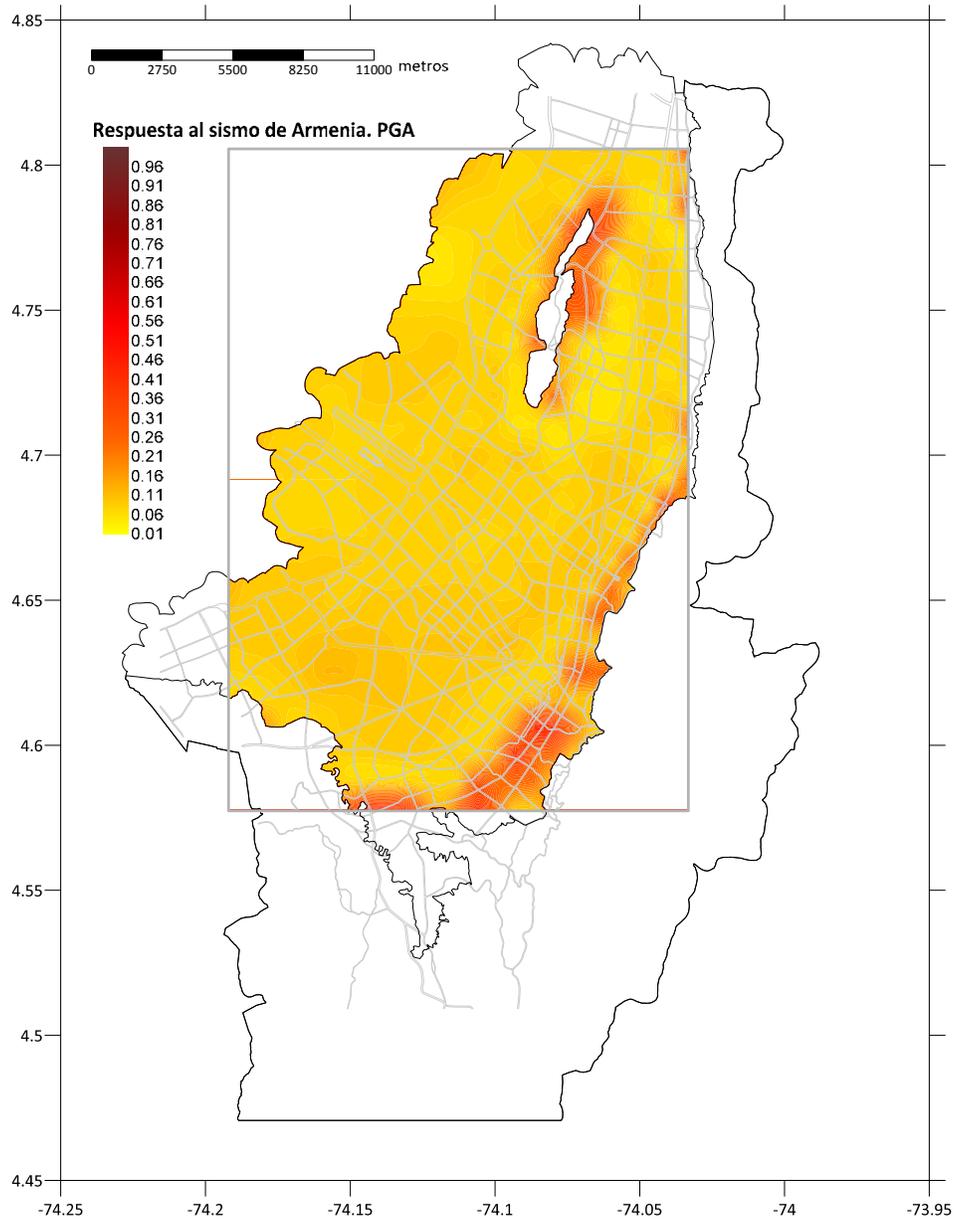


Figura 4-54. Distribución espacial de PGA para el sismo de Armenia (1999).

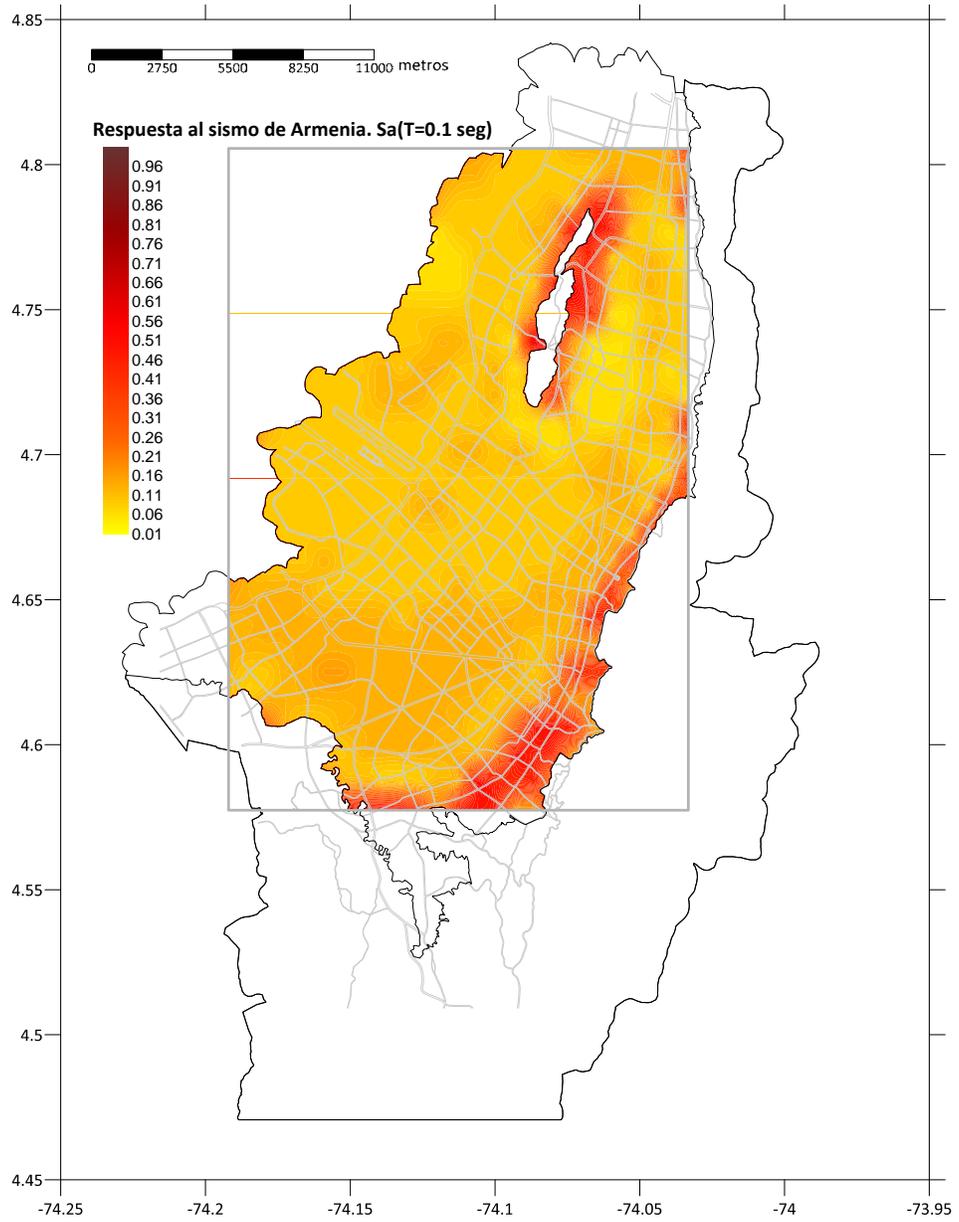


Figura 4-55. Distribución espacial de $S_a(T=0.1 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

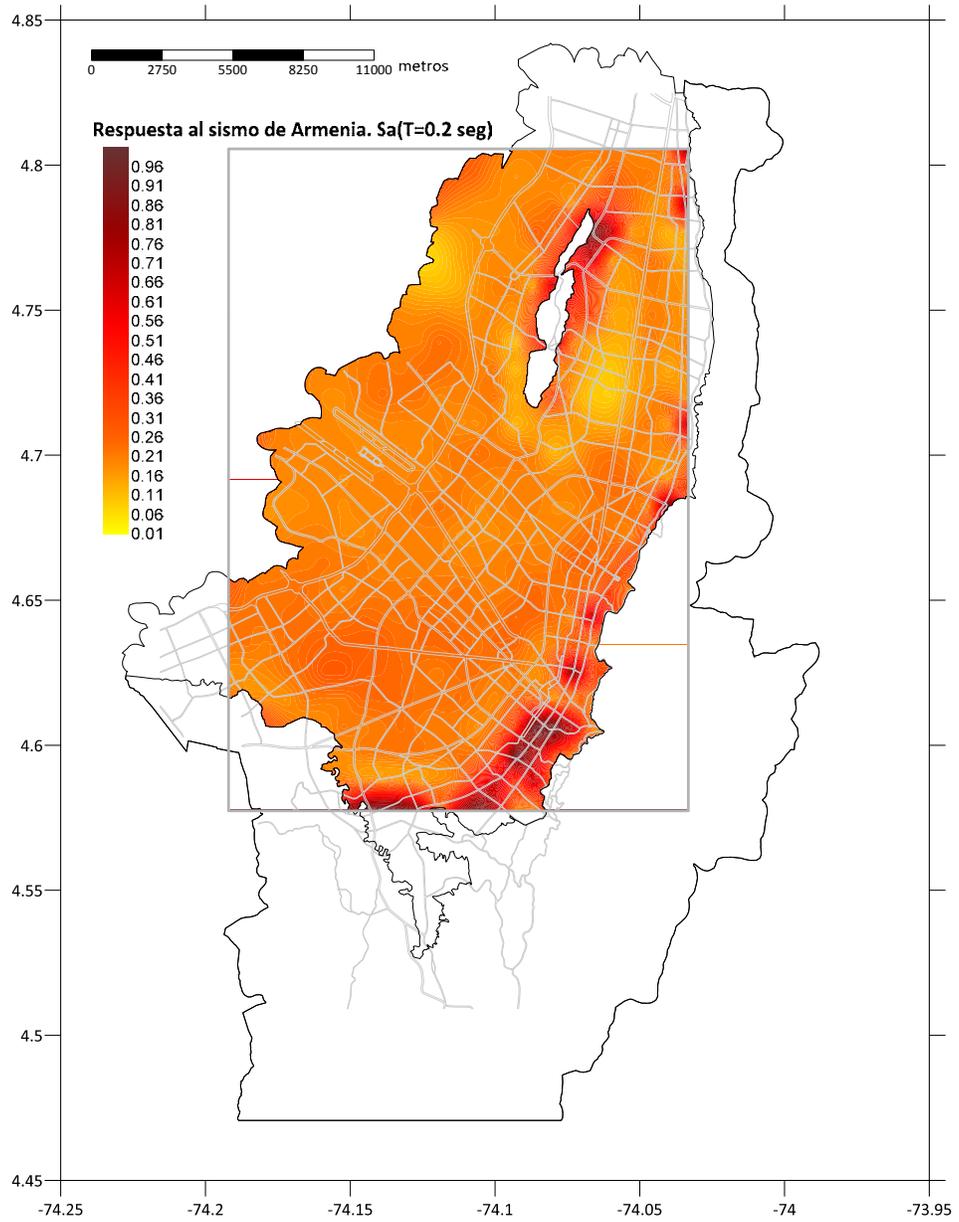


Figura 4-56. Distribución espacial de $S_a(T=0.2 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

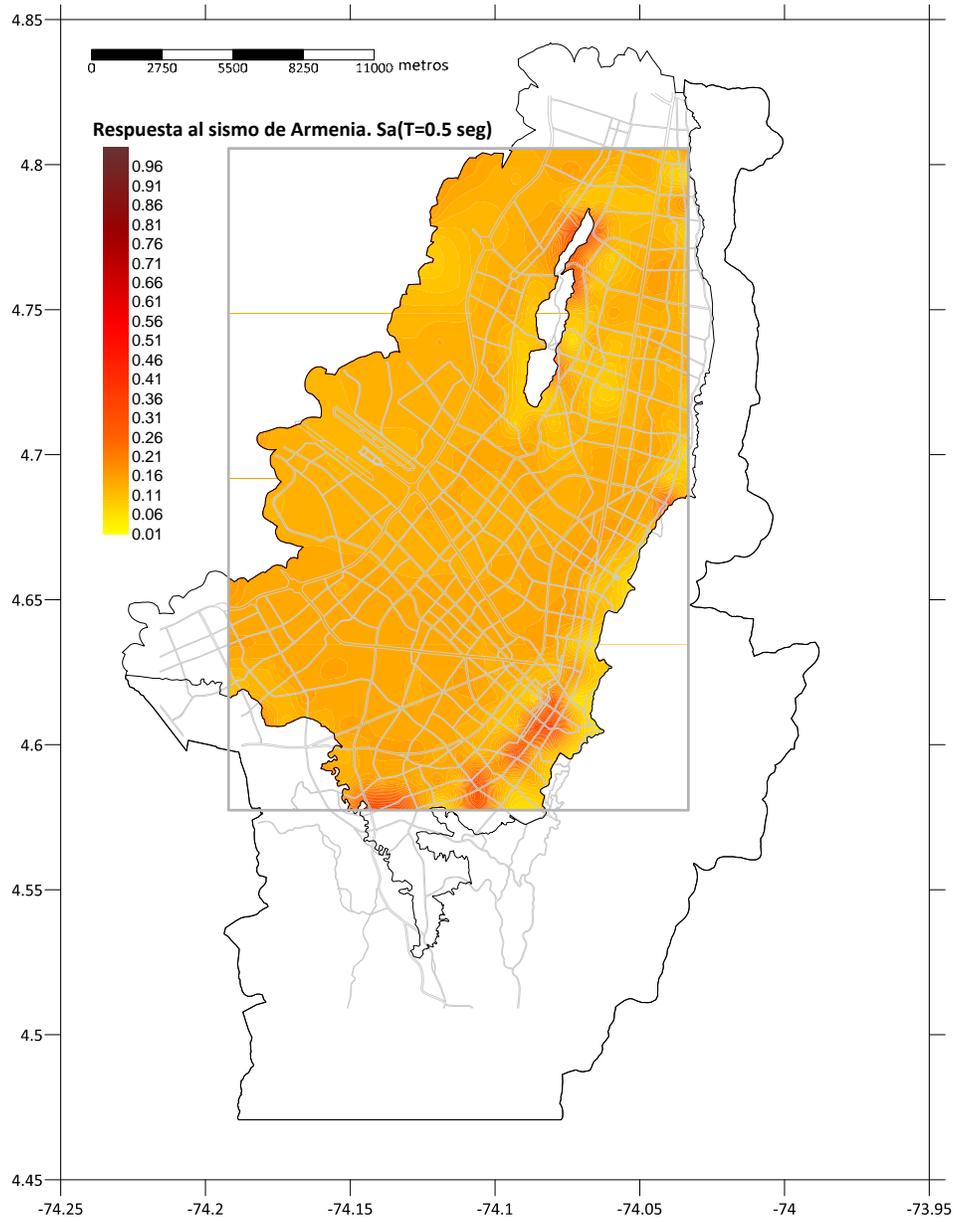


Figura 4-57. Distribución espacial de $S_a(T=0.5 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

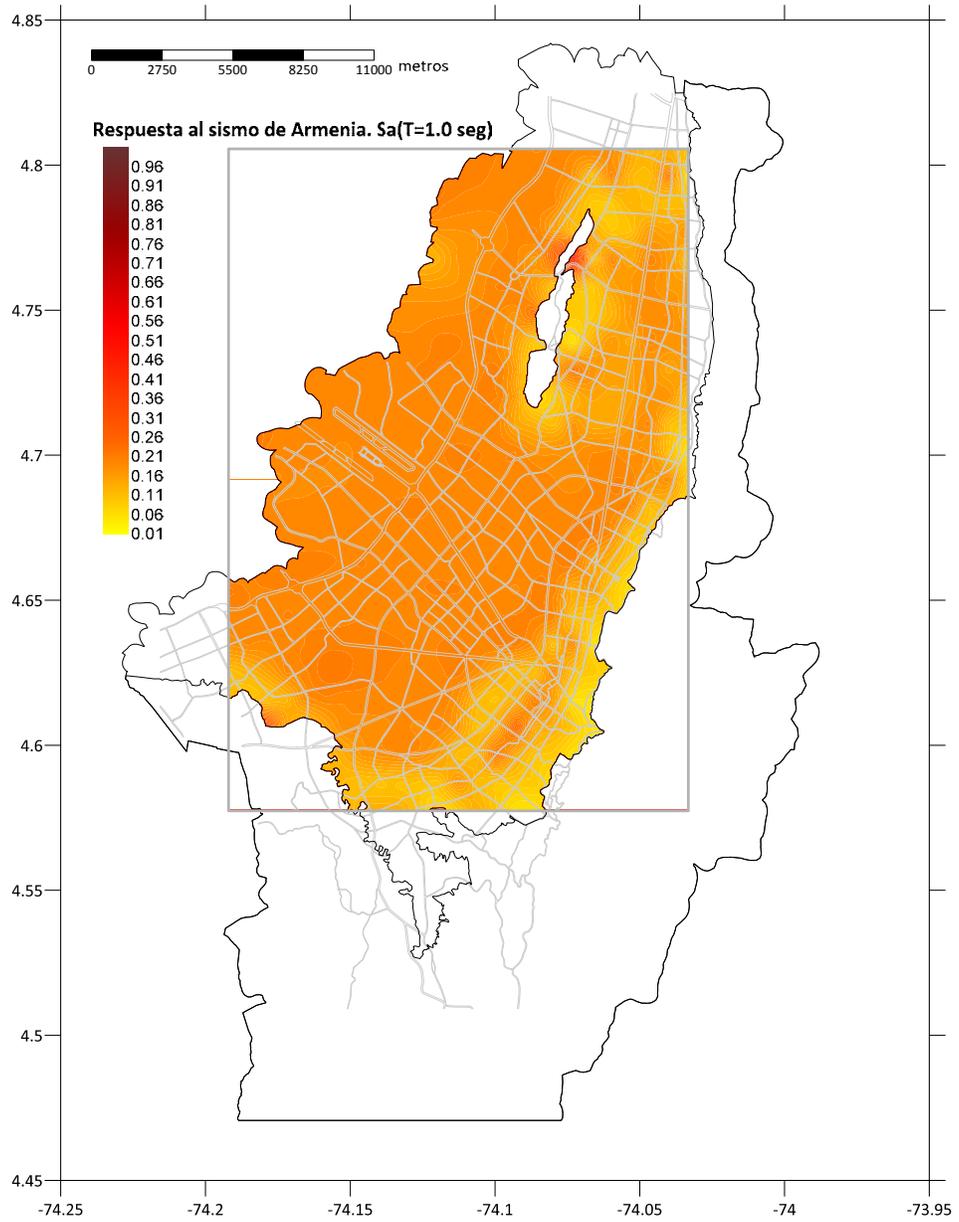


Figura 4-58. Distribución espacial de $S_a(T=1 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

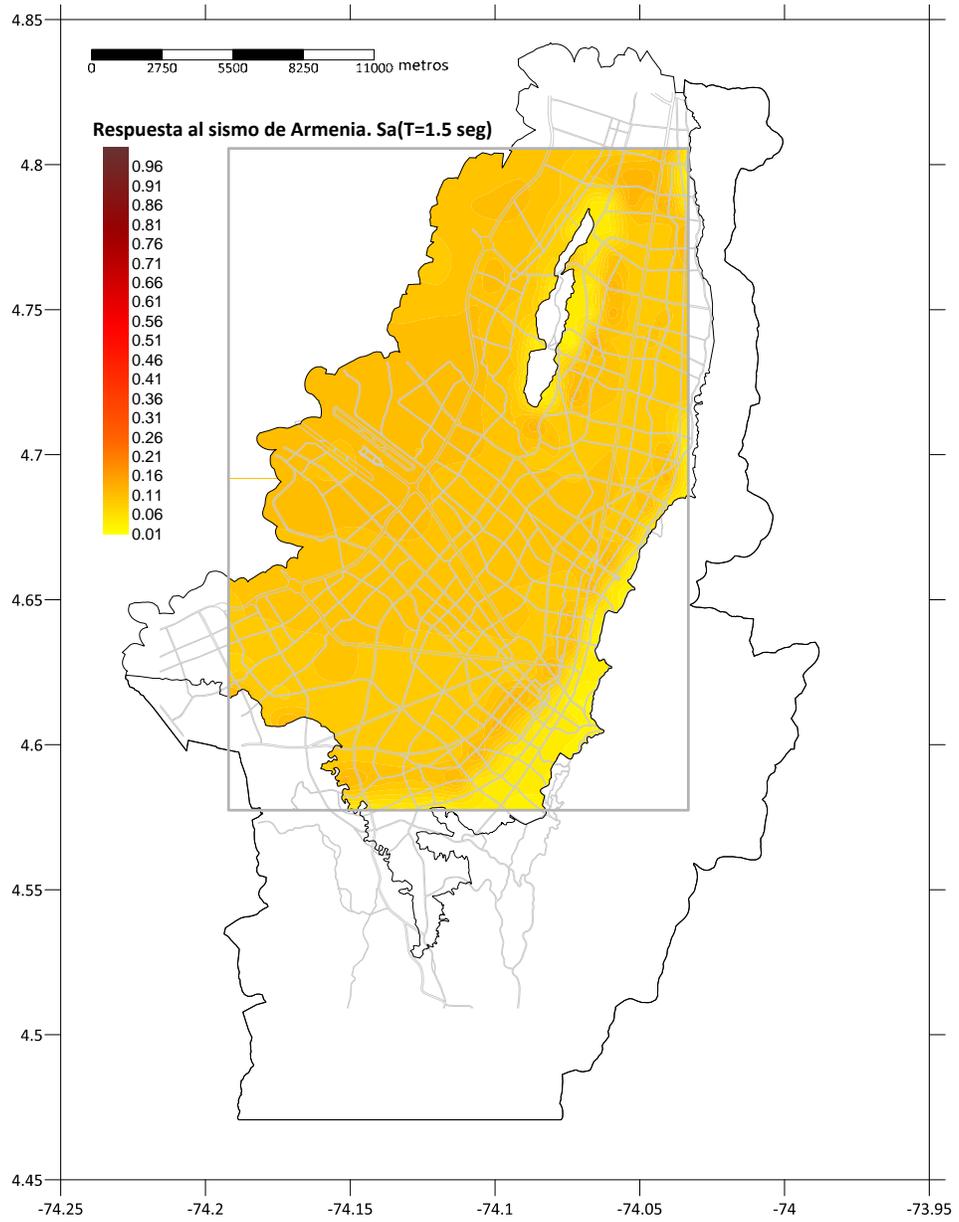


Figura 4-59. Distribución espacial de $S_a(T=1.5 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

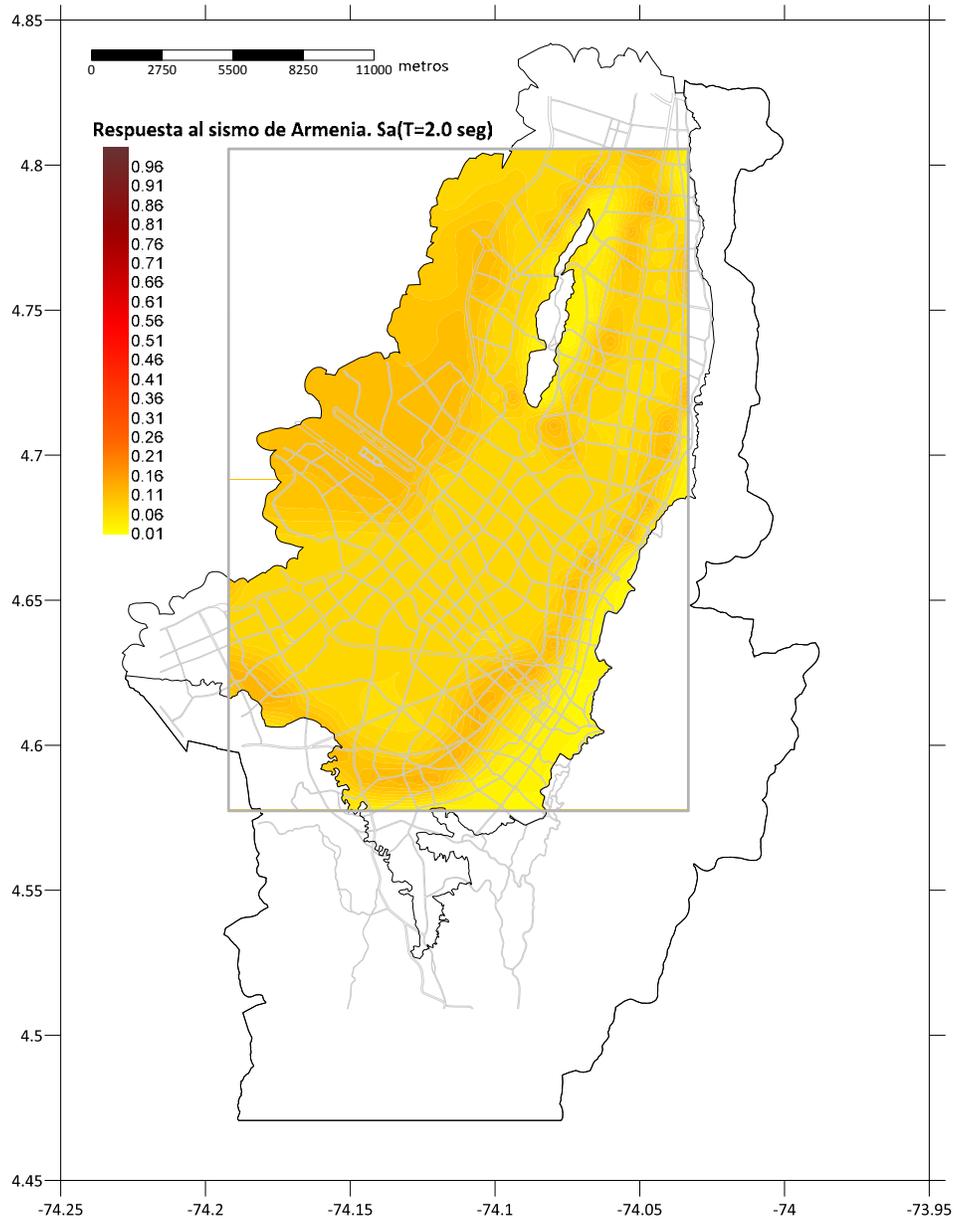


Figura 4-60. Distribución espacial de $S_a(T=2 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

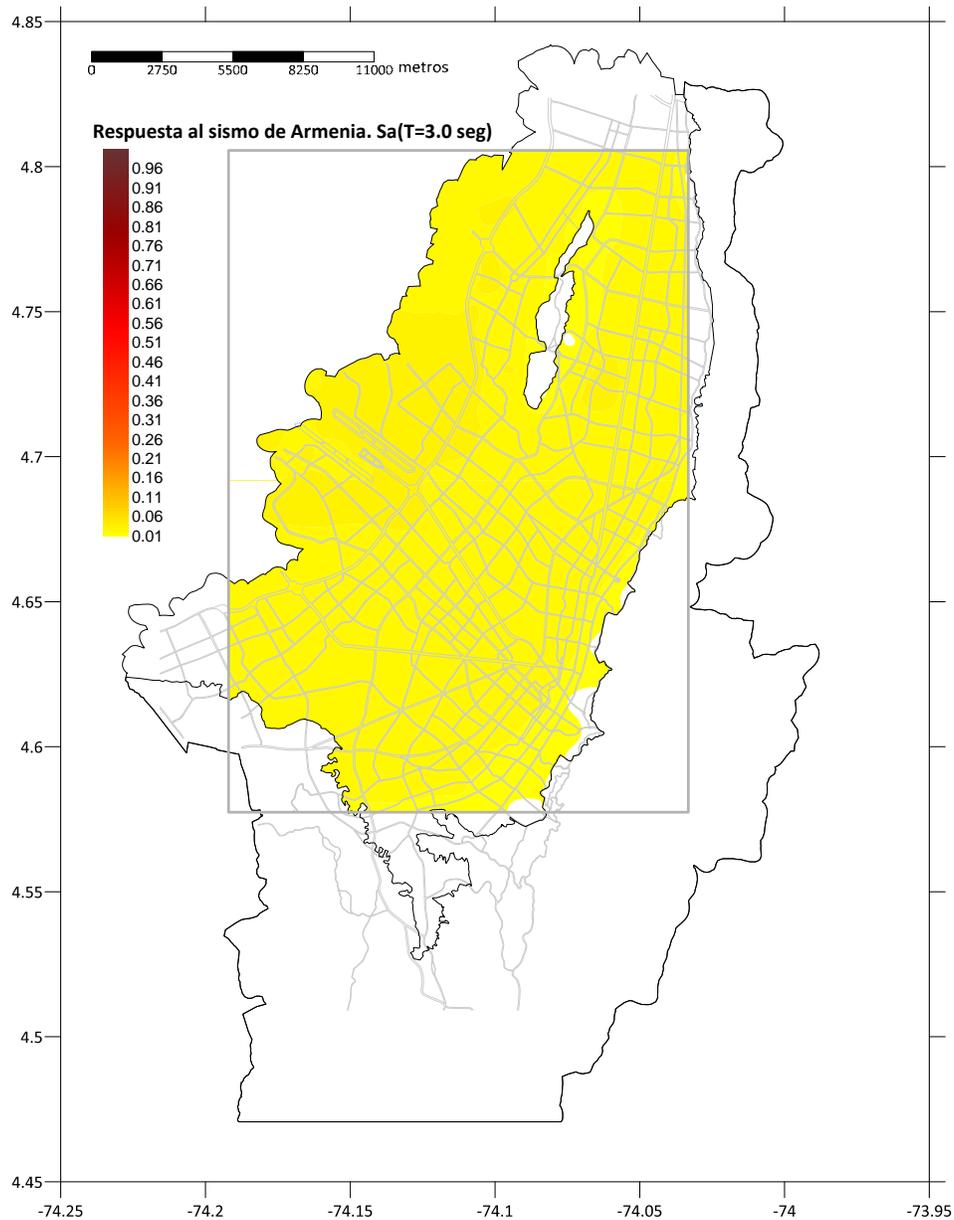


Figura 4-61. Distribución espacial de $S_a(T=3 \text{ seg})$ para el sismo de Armenia (1999).

En futuras investigaciones podría pensarse en la vinculación del modelo de respuesta desarrollado en esta tesis, dentro de un sistema como el SISBog-LISA, de manera que sea posible obtener estimativos del nivel de daños en las edificaciones de la ciudad tras la ocurrencia de un terremoto importante. Este sistema deberá ser administrado por las entidades encargadas de la gestión del riesgo en la ciudad, y deberá operar de manera coordinada con la red de acelerógrafos de Bogotá.

Adicionalmente, esta aplicación particular del modelo de respuesta sísmica puede emplearse como base para la evaluación de pérdidas ante escenarios sísmicos específicos, empleando acelerogramas de sismos sintéticos o reales ya ocurridos, de tal manera que puedan identificarse de manera rápida las zonas de la ciudad más afectadas por eventos de determinadas características, y de esta manera dimensionar recursos para la atención de futuras emergencias.

4.3.3 MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE BOGOTÁ

Una aplicación evidente del modelo de respuesta sísmica de los suelos de Bogotá, es la definición de los movimientos sísmicos de diseño de edificaciones. Los estudios de microzonificación sísmica usualmente proveen esta información, tomando en cuenta el efecto de la respuesta dinámica de los suelos blandos en la amplificación o deamplificación del movimiento fuerte a nivel de superficie del terreno.

Con base en un estudio de microzonificación sísmica, una ciudad puede adelantar la planificación de su desarrollo definiendo claramente las políticas de uso de la tierra y las restricciones necesarias a ciertos tipos de construcción. Paralelamente, puede adelantar proyectos de mitigación del riesgo sísmico a través del diseño de construcciones teniendo en cuenta los efectos que un sismo máximo probable pueda producir en determinada ubicación. Como consecuencia, se minimizan los efectos de eventos sísmicos futuros, como las pérdidas de vidas humanas, el número de personas afectadas por el fenómeno natural y las pérdidas económicas asociadas. En esa sección se presenta la aplicación del modelo de respuesta propuesto en esta tesis en la microzonificación sísmica de Bogotá.

4.3.3.1 Funciones de atenuación

En cada nodo de la malla de cálculo se determina una función de atenuación particular, la cual es empleada para el análisis de amenaza sísmica específica de cada sitio. La Figura 4-62 presenta las funciones de atenuación, para fuente activa y subducción, para 2 sitios seleccionados al azar dentro de la malla de cálculo (uno de ellos es el sitio 226). Si bien la Figura 4-62 presenta los valores de la mediana de la aceleración máxima del terreno, para todas las ordenadas del espectro de respuesta se puede estimar su incertidumbre, haciendo uso de la ecuación 4-6 y empleando los valores calculados de $\sigma_{\ln AF}$ en cada ubicación.

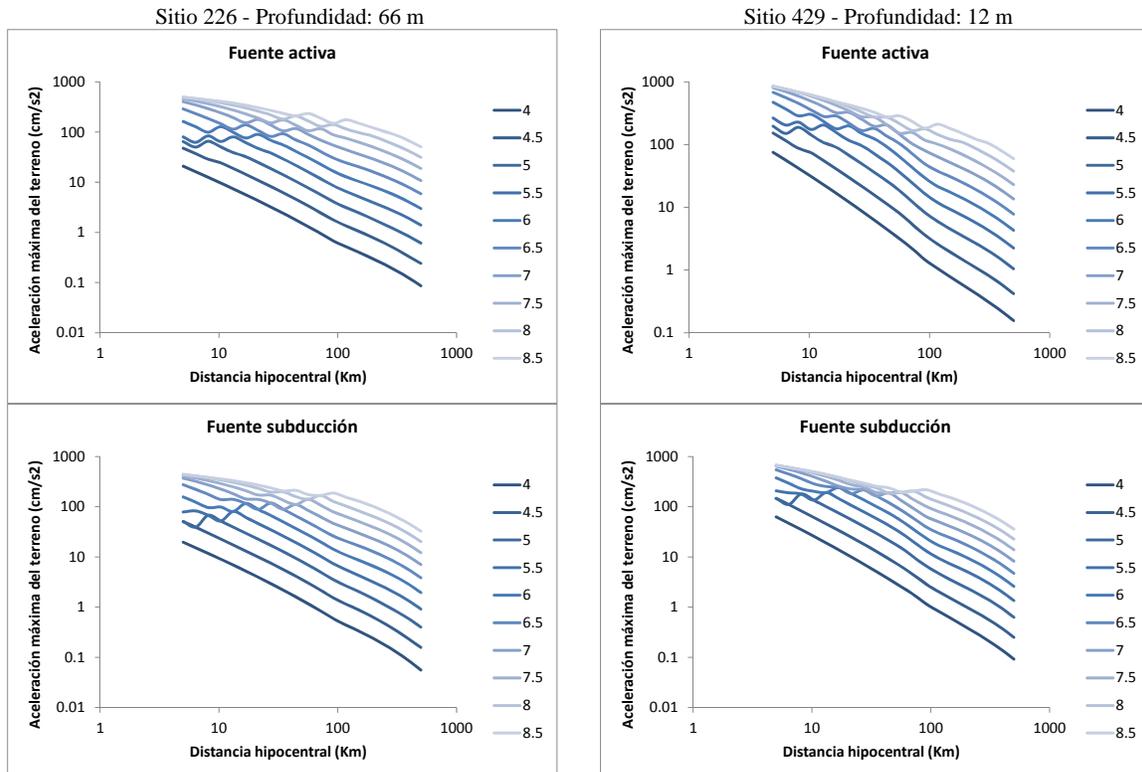


Figura 4-62. Funciones de atenuación de sitios seleccionados.

4.3.3.2 Amenaza sísmica en superficie

Empleando las funciones de atenuación calculadas, se realiza un análisis de amenaza sísmica particular en cada nodo de la malla de cálculo, empleando el mismo modelo de amenaza sísmica que para la evaluación en roca firme. La Figura 4-63 presenta los espectros de amenaza uniforme para 475 años de periodo de retorno, para los mismos sitios presentados anteriormente.

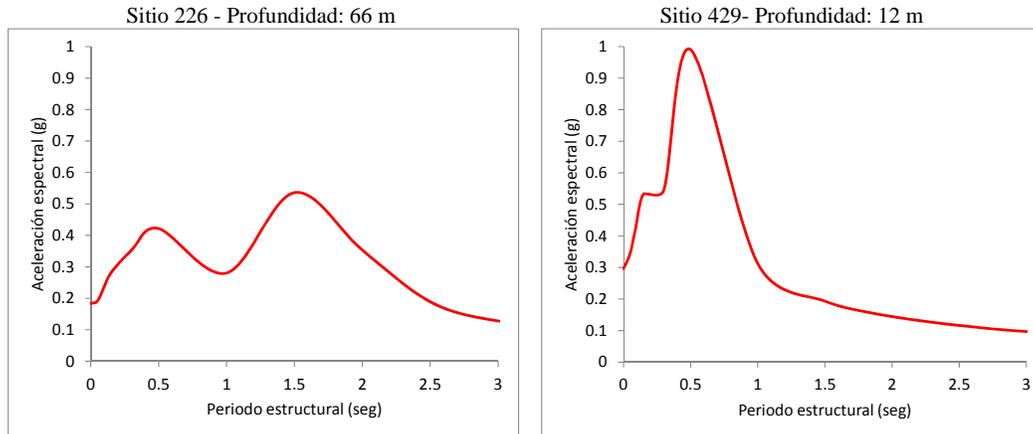


Figura 4-63. Espectros de amenaza uniforme de sitios seleccionados.

A partir del análisis de amenaza sísmica individual para cada nodo de la malla de cálculo, es posible general mapas de aceleración espectral para 475 años de periodo de retorno, para diferentes periodos de vibración de estructuras. Estos mapas muestran la variabilidad en la respuesta estructural esperada en la ciudad, por cuenta de las condiciones de respuesta sísmica de los suelos blandos. La Figura 4-64 a Figura 4-70 presentan los mapas de distribución espacial de la aceleración espectral para periodos estructurales de 0, 0.05, 0.3, 0.5, 1, 2 y 3 segundos.

De los mapas presentados puede determinarse, para cada punto que se encuentre en el perímetro urbano de la ciudad, su amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno en términos del espectro elástico de respuesta para un coeficiente de amortiguamiento del 5% respecto al crítico (es decir, para todas las variaciones posibles de edificaciones dentro de ciertos límites) y un periodo de retorno de 475 años. Dado que el resultado real de la evaluación de la amenaza sísmica en superficie es un conjunto de curvas de amenaza en cada ubicación de la malla de cálculo, una para cada periodo estructural, los resultados pueden presentarse en términos de cualquier otro periodo de retorno.

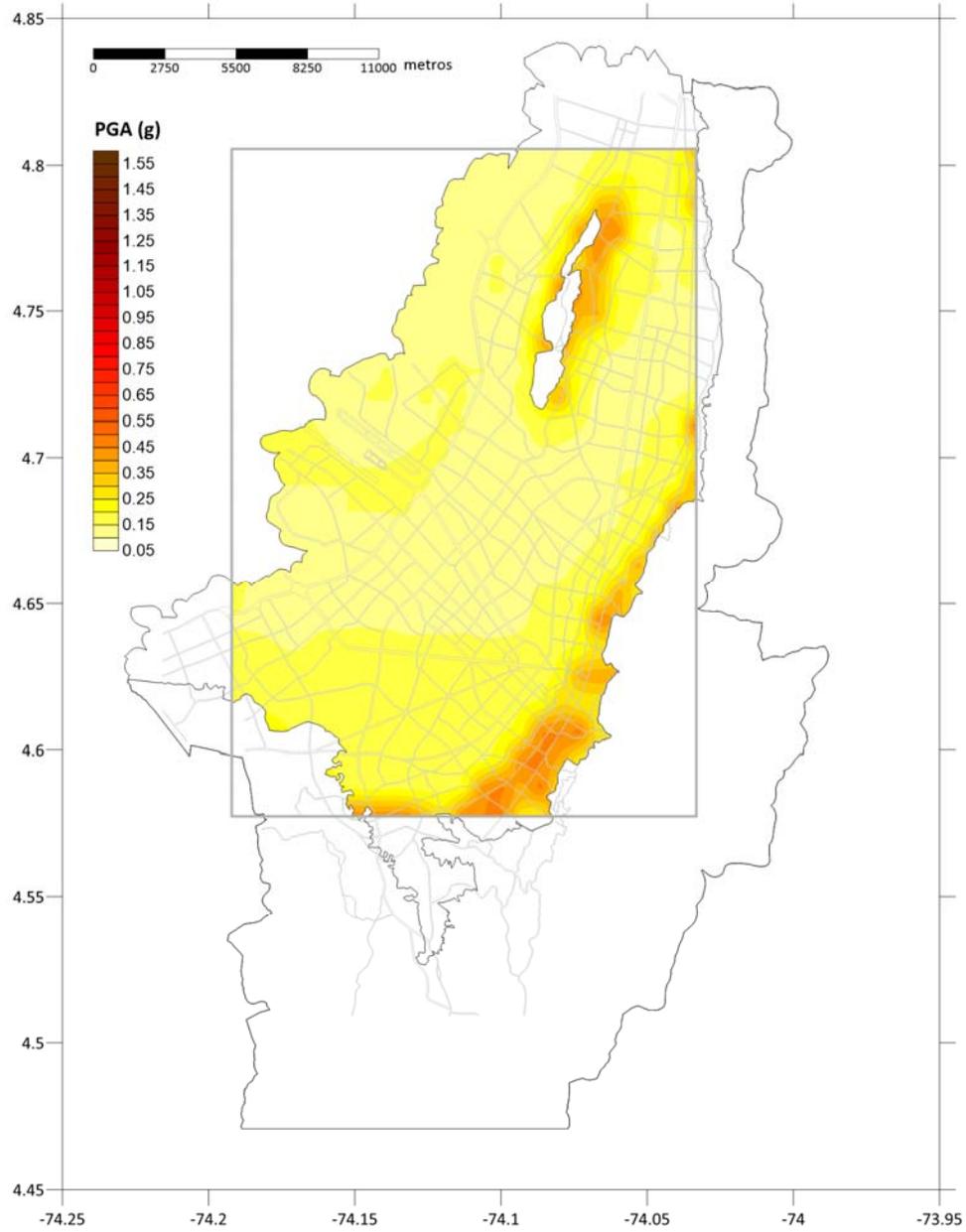


Figura 4-64. Mapa de amenaza uniforme en términos de PGA.

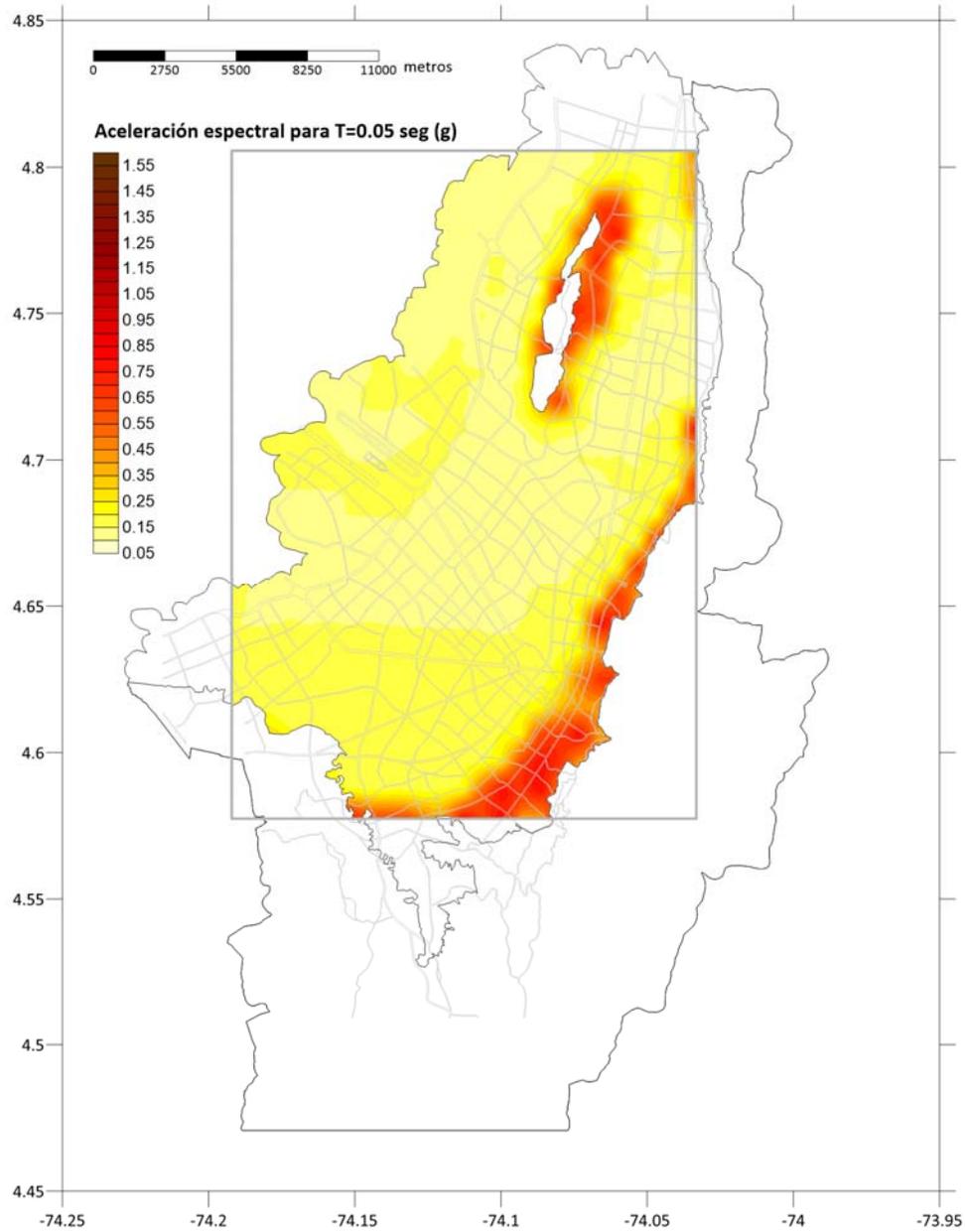


Figura 4-65. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para T=0.05 seg.

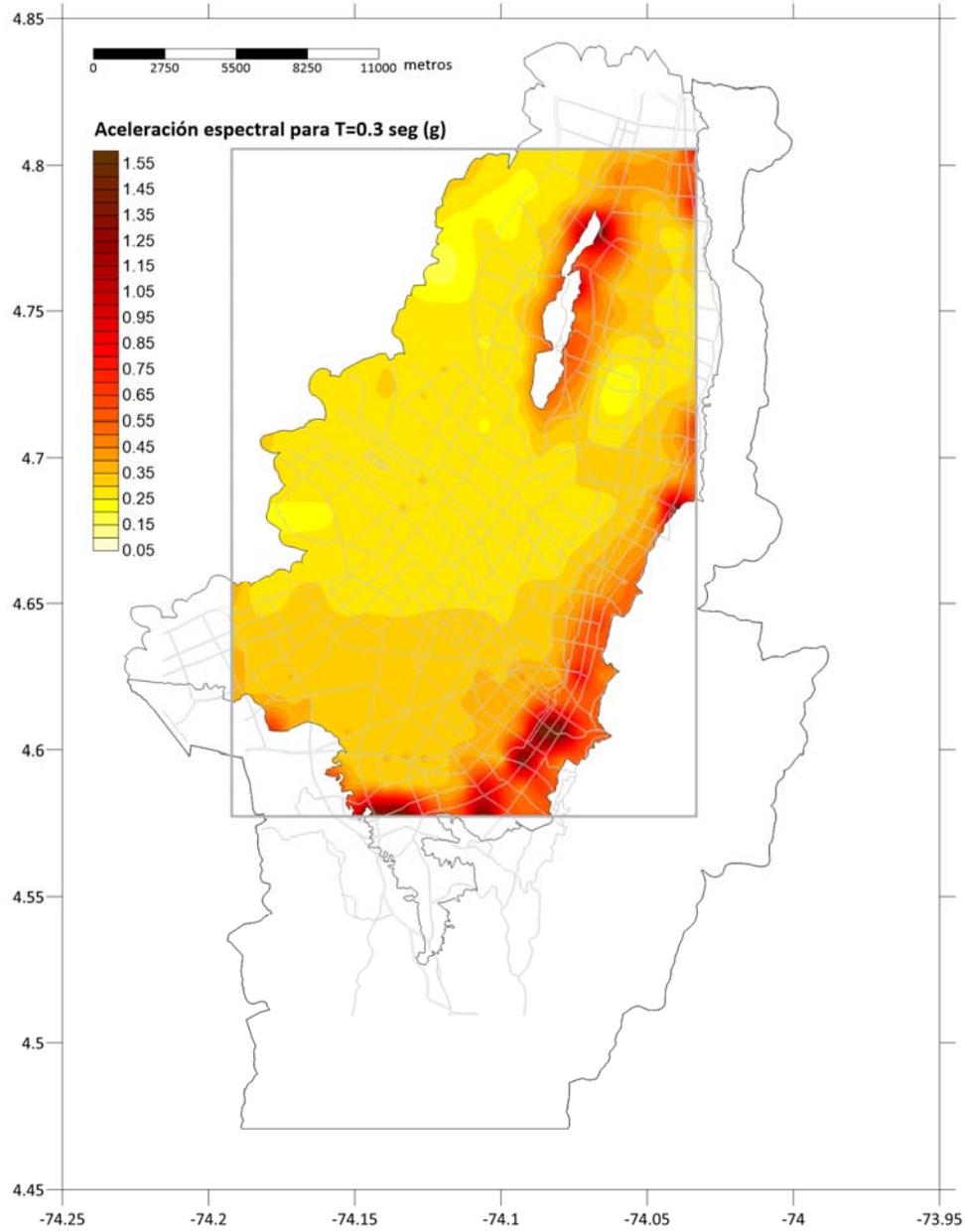


Figura 4-66. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para T=0.3 seg.

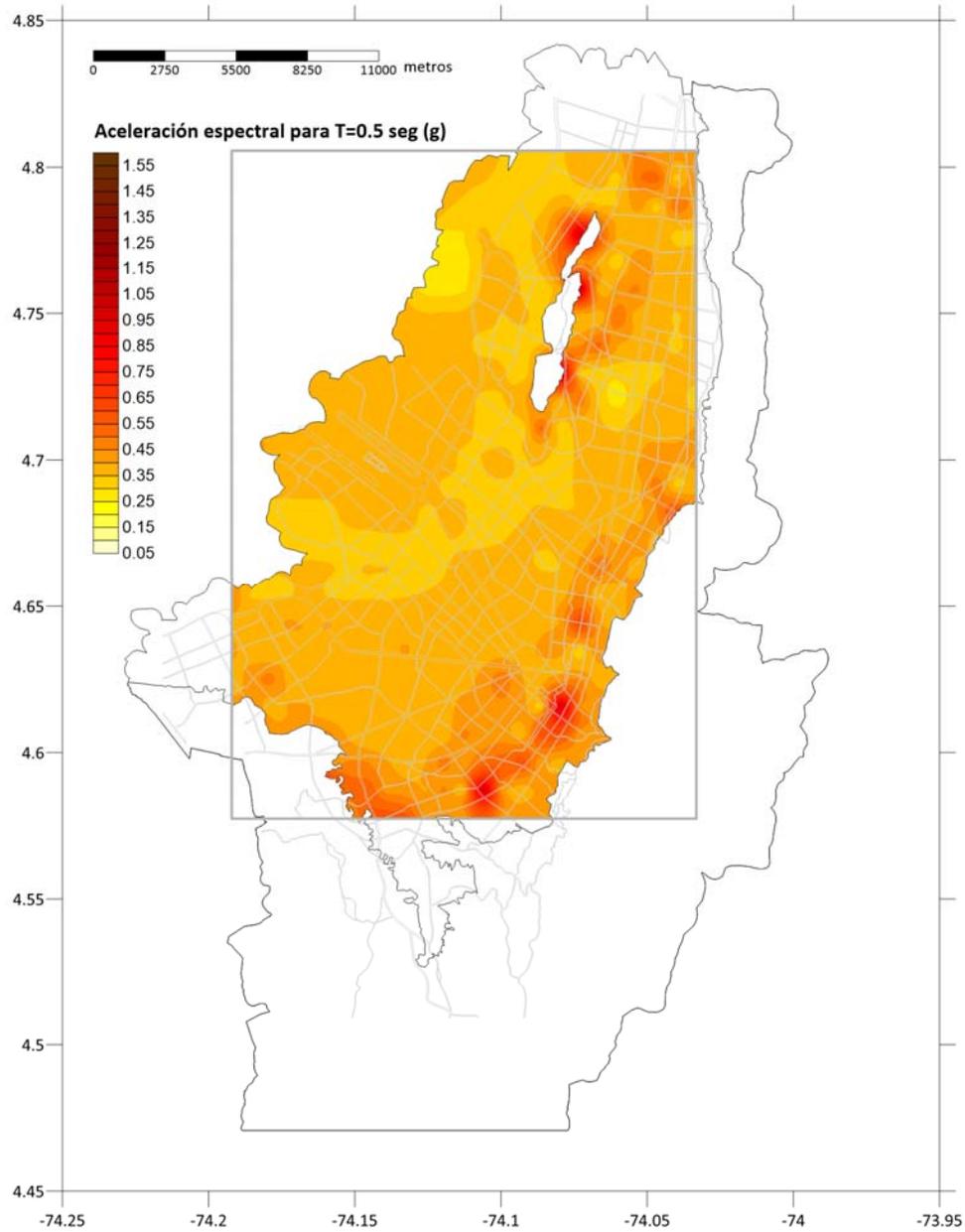


Figura 4-67. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para T=0.5 seg.

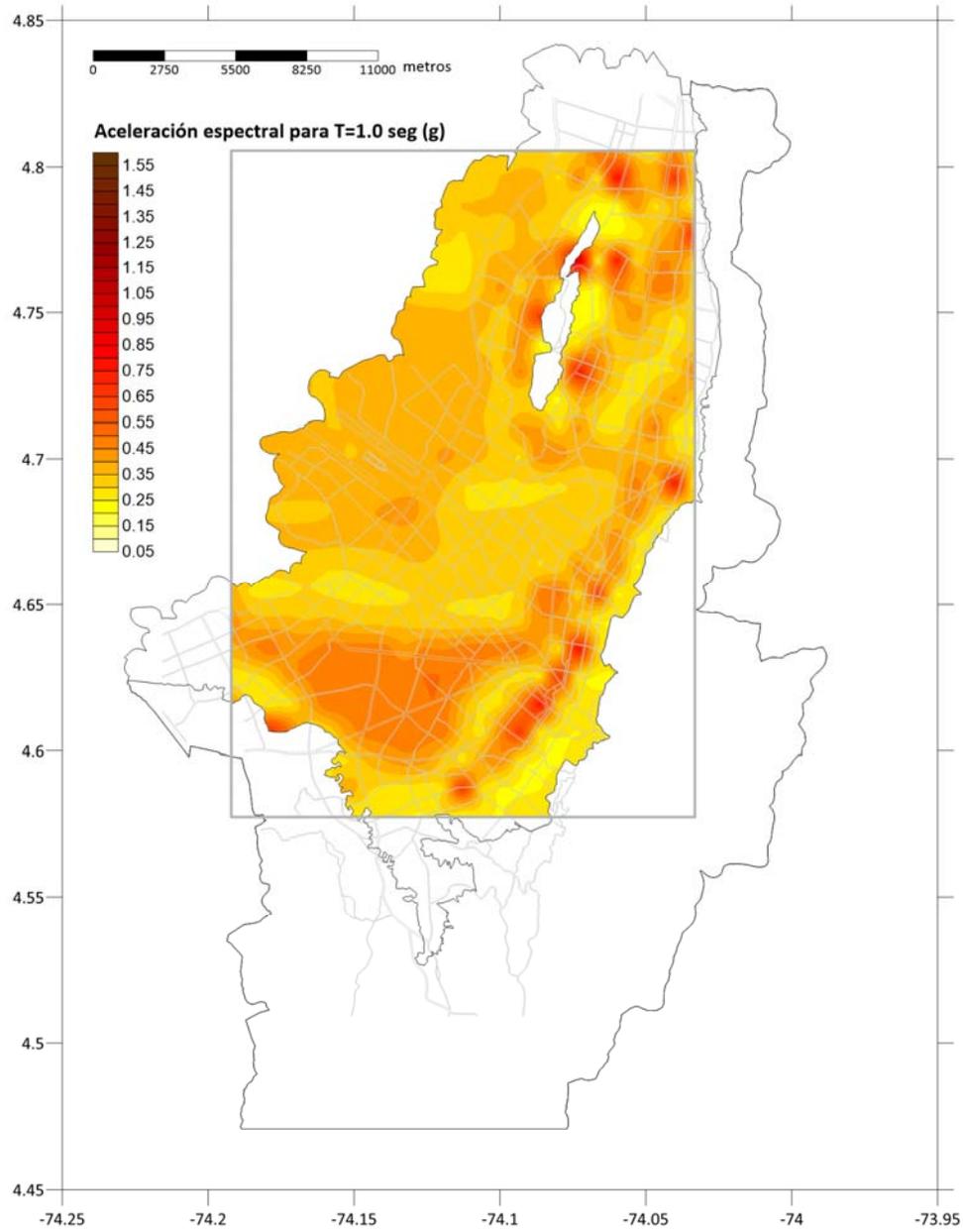


Figura 4-68. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para T=1.0 seg.

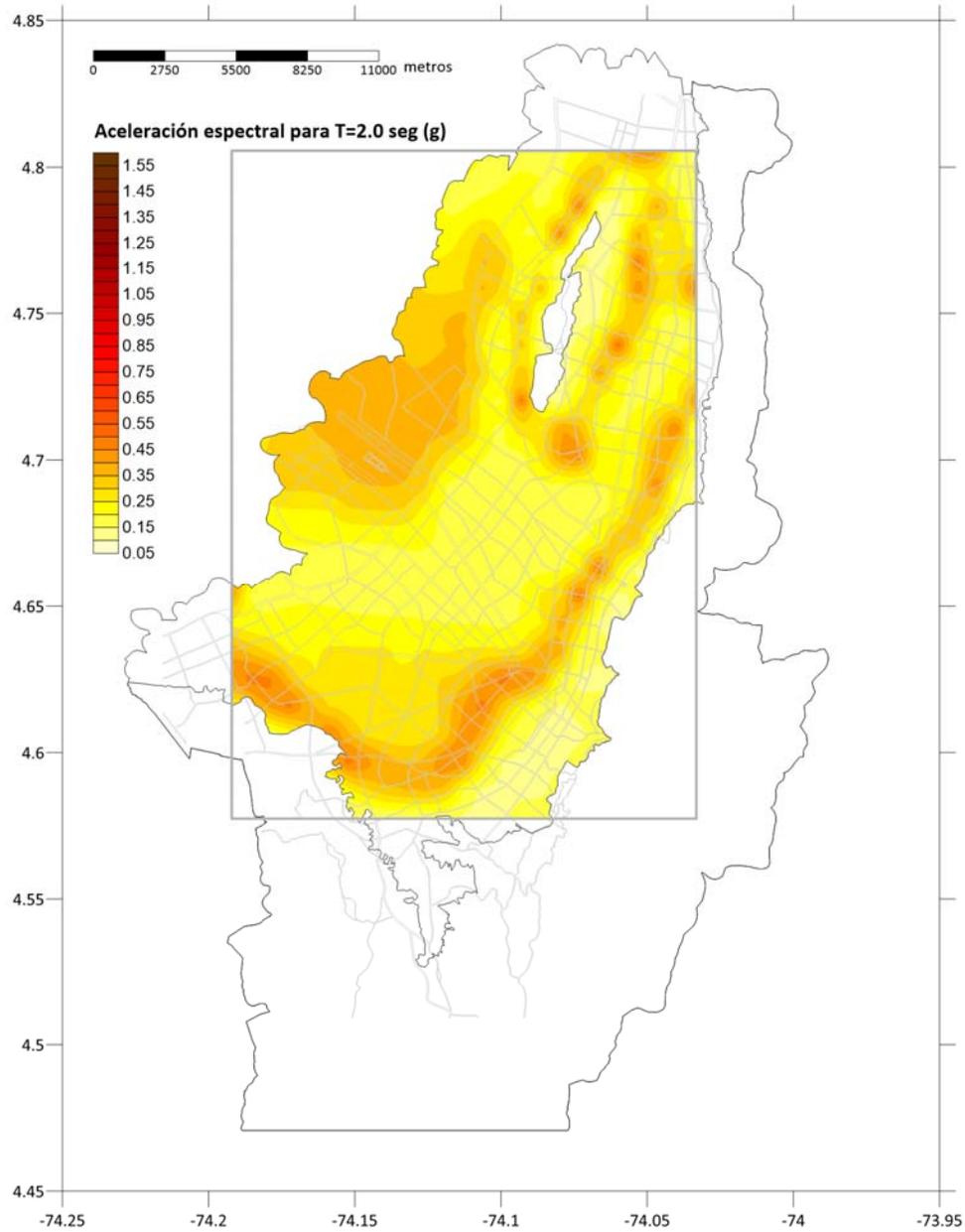


Figura 4-69. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para T=2.0 seg.

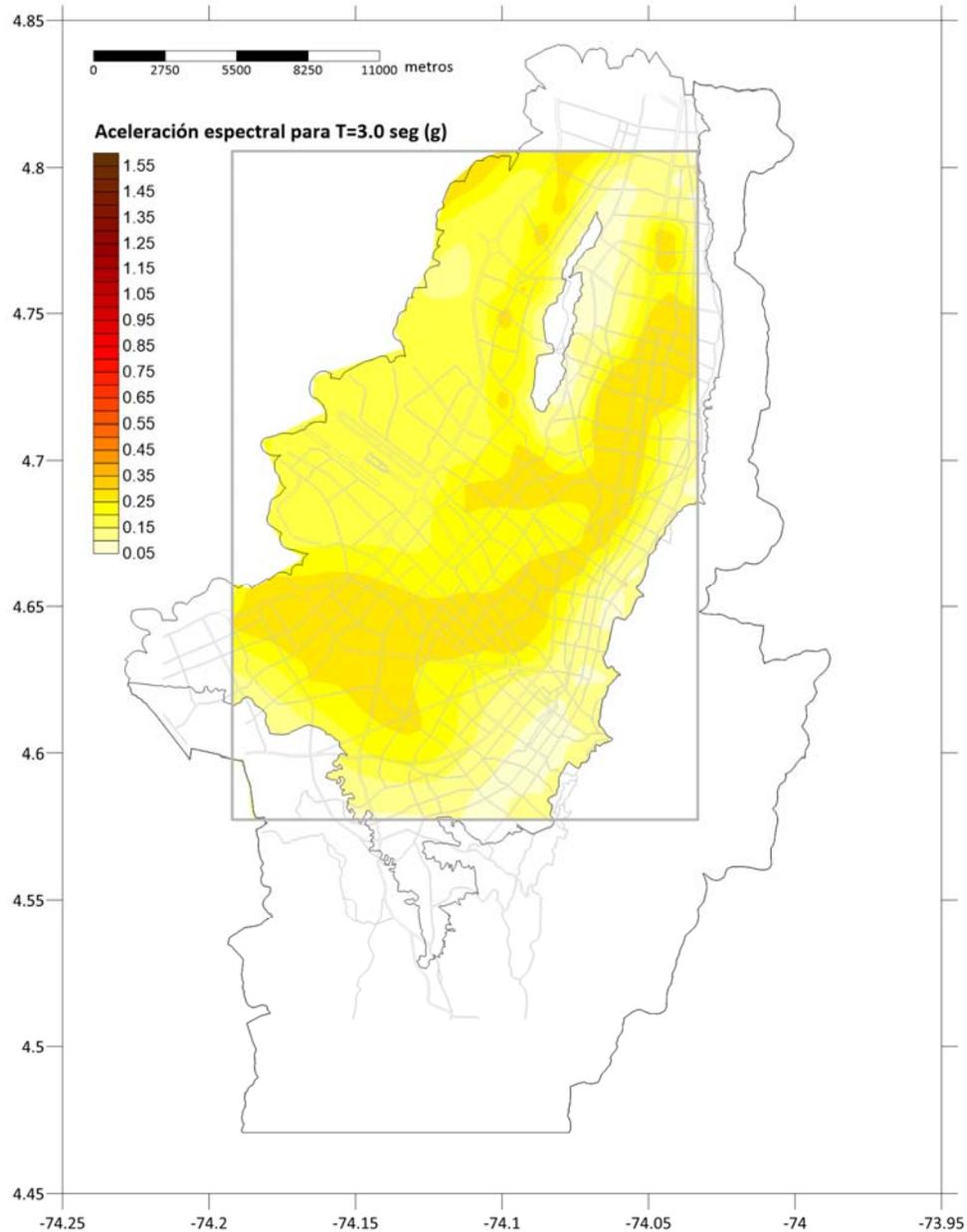


Figura 4-70. Mapa de amenaza uniforme en términos de la aceleración espectral para $T=3.0$ seg.

4.3.3.3 Armonización a la NSR-10

Los espectros de amenaza uniforme obtenidos en los análisis anteriores se utilizan como base para establecer las formas finales de los espectros de diseño. Para la armonización de las formas espectrales se emplea un procedimiento computacional mediante el cual se ajusta una forma espectral particular al espectro de amenaza uniforme calculado en cada sitio. Para garantizar un buen ajuste se minimizan tres características diferentes: i) la diferencia en el área bajo la curva de los espectros de amenaza y diseño; ii) la diferencia máxima de aceleración espectral para cualquier periodo estructural; y iii) el promedio de las diferencias de aceleración espectral para todos los periodos estructurales. Los espectros de diseño se calculan por medio de la definición

de 5 parámetros: A_a , A_v , I , F_a y F_v . La Figura 4-71 muestra la forma funcional de los espectros de diseño dados por la NSR-10.

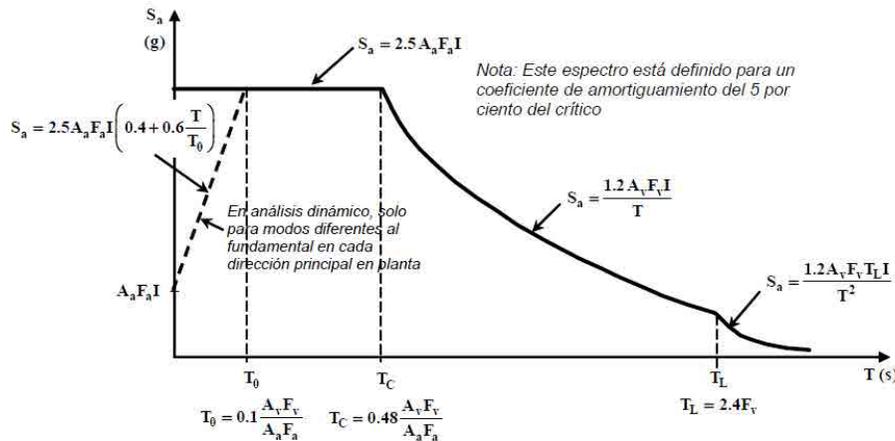


Figura 4-71. Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g. (Tomado de la NSR-10)

Con el fin de armonizar los espectros de diseño resultantes a la NSR-10, se fijan los parámetros de amenaza en roca a los especificados para la ciudad de Bogotá: $A_a = 0.15$ g y $A_v = 0.2$ g. El factor de importancia se asume como $I = 1$, dado que es un factor que puede asignarse posteriormente en función del tipo de edificación a diseñar. Por último, se establecen como parámetros libres los asociados al efecto del suelo blando: F_a y F_v . Dado que se trata de un problema no lineal, no resulta factible emplear métodos estadísticos clásicos para ajustar el valor óptimo de los parámetros del espectro de diseño. Por lo tanto, el procedimiento de ajuste corresponde a una iteración sobre valores de los parámetros asociados al efecto del suelo, siguiendo un algoritmo genético, con el fin de garantizar la convergencia a la solución de la iteración realizada. El algoritmo genético sigue la misma estructuración que el empleado para la calibración del modelo de espectro de fuente en el capítulo 4 de esta tesis. Los individuos corresponden a diferentes espectros de diseño, por lo cual su genotipo es una combinación de F_a y F_v .

La aplicación del procedimiento de ajuste resulta en la definición de un espectro elástico de diseño sismo resistente, para cada punto de la malla de cálculo, el cual cumple con los parámetros establecidos por la norma NSR-10 para edificaciones. La Figura 4-72 muestra los espectros de diseño ajustados en comparación con los espectros de amenaza uniforme para los sitios 226 y 429. La distribución espacial de los parámetros F_a y F_v se presenta en la Figura 4-73 y Figura 4-74, respectivamente. Es posible entonces, para cualquier localización dentro de la ciudad, definir un espectro de diseño en función de los parámetros F_a y F_v .

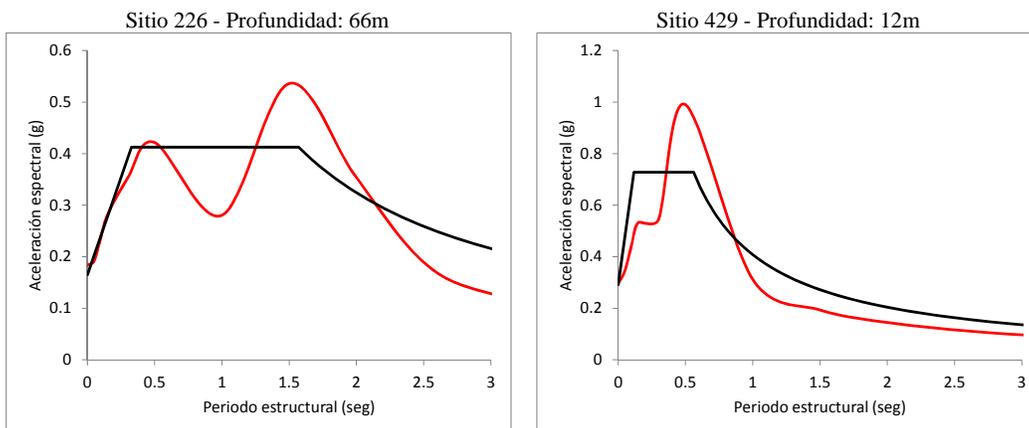


Figura 4-72. Espectros de diseño ajustados para sitios seleccionados.

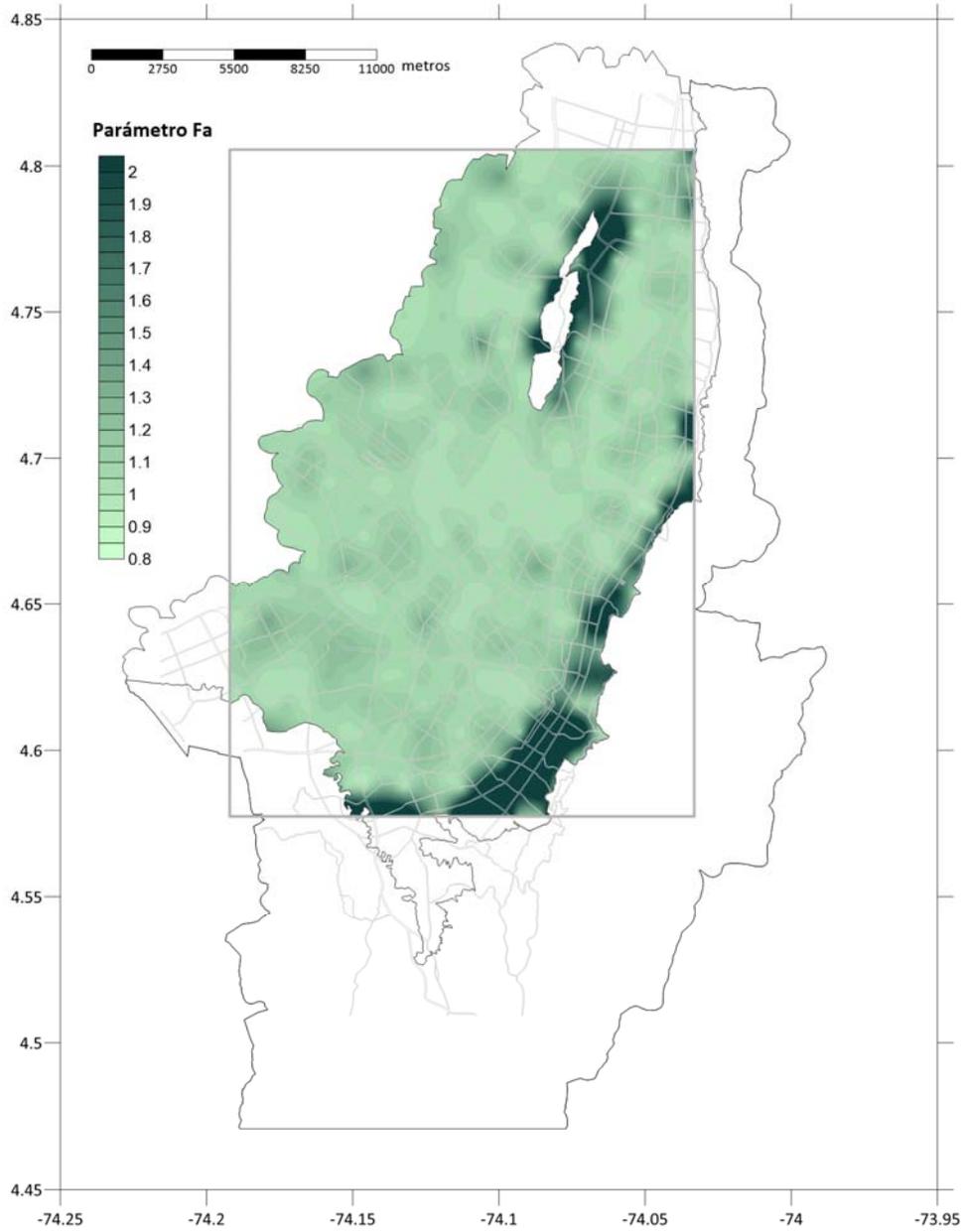


Figura 4-73. Mapa de distribución geográfica del parámetro F_a .

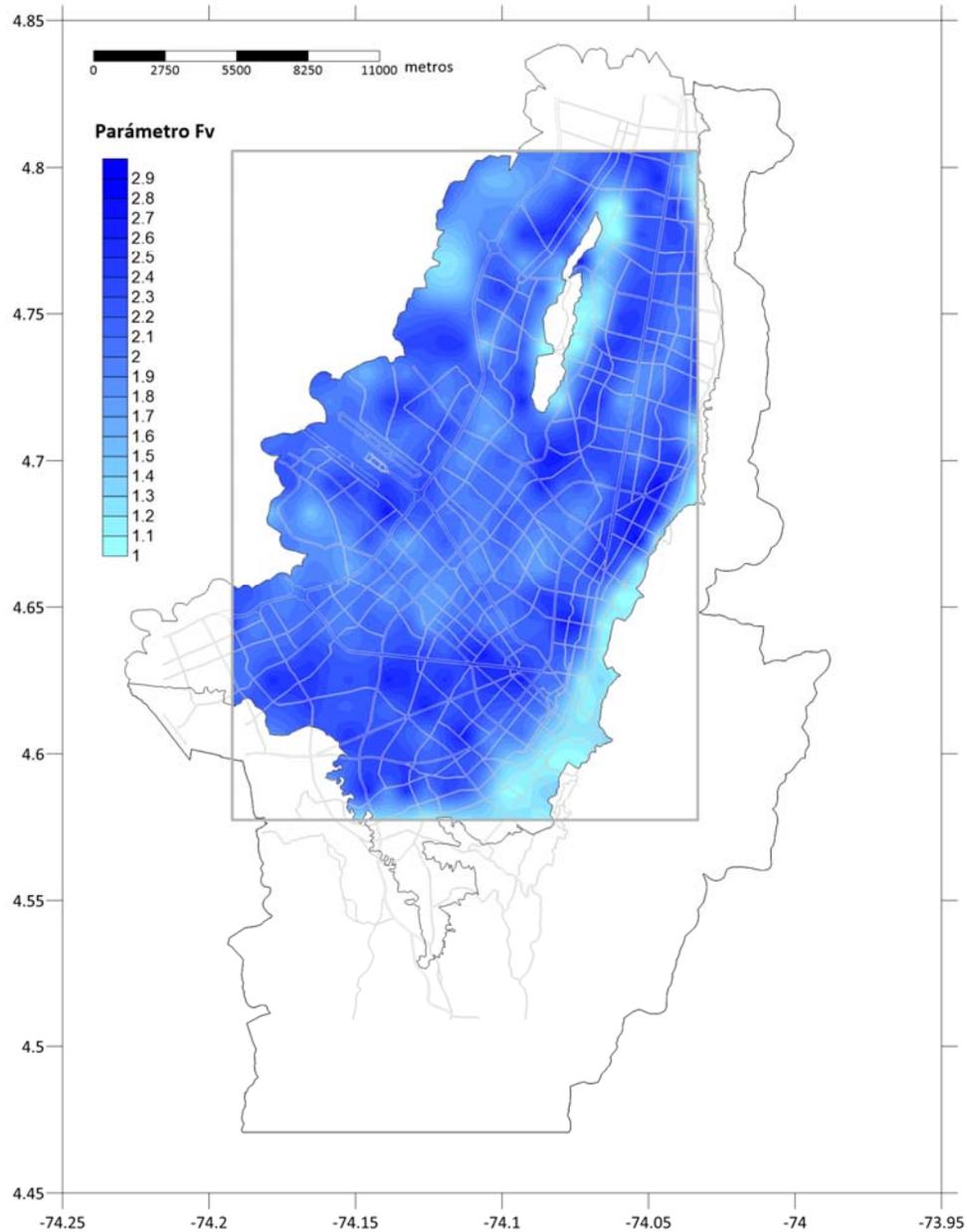


Figura 4-74. Mapa de distribución geográfica del parámetro F_v .

De esta manera se obtienen los movimientos sísmicos de diseño de edificaciones nuevas en toda la extensión de la ciudad, lo cual es el objetivo último de un estudio de microzonificación sísmica. El trabajo presentado constituye un punto de partida en la investigación de nuevas maneras de abordar el problema de los efectos de sitio en ciudades, al abarcar todas las características relevantes en la problemática, desde la evaluación de la amenaza sísmica en roca, pasando por la geometría de las formaciones geológicas, las características de los suelos y la respuesta de los depósitos blandos, hasta la evaluación de la amenaza sísmica a nivel de superficie del terreno y su armonización con la normativa aplicable.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Dentro de la evaluación probabilista del riesgo sísmico, la estimación de la amenaza juega un papel fundamental, al proveer la distribución espacial de las intensidades de movimiento fuerte, entendidas como variables aleatorias, así como la frecuencia de ocurrencia de los terremotos. La evaluación de la amenaza sísmica requiere de diversos componentes, dentro de los cuales se encuentran la atenuación del movimiento fuerte como función de la distancia fuente-sitio para diferentes magnitudes sísmicas, y los efectos de sitio que caracterizan la amplificación en el movimiento fuerte que se da por la vibración de los depósitos superficiales de suelo blando.

En las décadas recientes se han dado grandes avances en el estudio de todos los componentes relevantes dentro del cálculo de la amenaza sísmica, particularmente los dos mencionados anteriormente. Si bien estos avances marcan la ruta sobre la cual se desarrolla esta tesis, es notable como su estudio y entendimiento está, en esencia, desligado de la evaluación del riesgo. En el mundo académico de la ingeniería sísmica, la amenaza se entiende como un fin, principalmente enfocada a la definición de coeficientes sísmicos de diseño para edificaciones e infraestructura. Si bien esta es una aplicación muy importante de la evaluación de la amenaza, su carácter de componente en el cálculo del riesgo parece ser despreciado.

En esta tesis se desarrollaron metodologías para la modelación, cálculo y calibración de los parámetros mencionados (atenuación del movimiento fuerte y efectos de sitio), que si bien son componentes de la evaluación de la amenaza sísmica, hacen también parte de un modelo más amplio, con objetivos más ambiciosos, que es el de cálculo del riesgo sísmico. Teniendo entonces claro el objetivo final de la evaluación del riesgo, el cual no es otro que la estimación de la distribución de probabilidad de las pérdidas que pueden presentarse tras la ocurrencia de terremotos, se presentan en esta memoria metodologías para la definición de modelos de atenuación y de efectos de sitio, más completos y cercanos a la realidad, dentro del nivel de detalle y refinamiento necesario para la correcta evaluación de las pérdidas.

En esta sección se presentan las principales conclusiones sobre las metodologías desarrolladas y los resultados obtenidos en las aplicaciones prácticas incluidas. Se plantean también futuras líneas de investigación y desarrollo, y se presenta un resumen de los artículos publicados y proyectos realizados durante el tiempo del doctorado.

5.1 CONCLUSIONES SOBRE LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DEL ESPECTRO DE FUENTE

El modelo de espectro de fuente empleado permite obtener la solución teórica del espectro de amplitudes de Fourier del movimiento fuerte, para una magnitud y distancia hipocentral dadas. Este modelo considera los principales fenómenos que tienen relevancia dentro de la atenuación del movimiento fuerte, como son el escalamiento con el momento sísmico, la atenuación geométrica, la predominancia de ondas superficiales o de cuerpo, la anelasticidad del medio de tránsito y la atenuación local de la intensidad de alta frecuencia. Adicionalmente, se emplean dos modelos de espectro de fuente, uno para el campo cercano y otro para el campo lejano.

Mediante el uso de teoría de vibraciones aleatorias, es posible determinar el valor esperado de la intensidad de movimiento fuerte, en el dominio del tiempo, como una función del espectro de amplitudes de Fourier. El procedimiento puede expandirse a ordenadas del espectro de respuesta mediante la modificación del espectro de amplitudes de Fourier por la función de transferencia de un oscilador de un grado de libertad. Al calcular entonces las intensidades en el dominio del tiempo, para diferentes combinaciones de magnitud y distancia hipocentral, es posible construir funciones de atenuación.

Los parámetros sismológicos que definen el modelo de espectro de fuente, son calibrados usando un algoritmo genético, con el fin de minimizar el sesgo entre los datos observados, provenientes de una red de acelerógrafos, con los valores calculados usando el espectro de fuente. Este procedimiento permite obtener el juego de parámetros sismológicos óptimos con los cuales se obtienen estimaciones insesgadas del movimiento fuerte. Este procedimiento puede aplicarse en cualquier región del mundo que cuente con una red de acelerógrafos operativa y un número suficiente de registros. Los registros acelerográficos deben ser depurados y procesados antes de aplicar la metodología con el fin de evitar una estimación errónea de los sesgos y desviaciones estándar.

El algoritmo de calibración fue implementado en el software Strong Motion Analyst, el cual es un programa de uso académico libre, que puede ser usado para obtener funciones de atenuación en diversas regiones del mundo.

5.2 CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO DE ATENUACIÓN GENERADO PARA COLOMBIA

Se aplicó la metodología en Colombia, usando como base de calibración 206 acelerogramas obtenidos de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia, dentro de los cuales, 87 están asociados a 22 sismos corticales, y 119 están asociados a 15 sismos de subducción. Se calibró entonces un modelo de atenuación diferente por tipo de mecanismo focal, y para diferentes periodos estructurales de vibración. Estas funciones de atenuación presentan el menor sesgo y desviación estándar comparadas con otras usadas en estudios de amenaza sísmica en el país.

Se calculó la amenaza sísmica en todo el territorio colombiano, a nivel de roca firme, empleando los modelos de atenuación calibrados. El cálculo se realizó mediante el procedimiento clásico de evaluación probabilista de la amenaza sísmica, así como por medio de un conjunto de escenarios generados de manera estocástica. Como se ha mencionado en esta memoria, ambos enfoques son equivalentes, sin embargo, la representación por escenarios es necesaria para la correcta evaluación probabilista del riesgo.

El resultado obtenido en términos de amenaza sísmica para Colombia, está actualmente incluido en la versión más reciente del Código Colombiano de Puentes (AIS, 2014), como base para la definición de coeficientes sísmicos de diseño.

5.3 CONCLUSIONES SOBRE EL PROCEDIMIENTO PARA LA DEFINICIÓN DE UN MODELO INTEGRAL DE EFECTOS DE SITIO

La respuesta dinámica de los suelos genera grandes diferencias tanto en amplitud como en el contenido frecuencial de registros de movimiento fuerte en superficie, en comparación con las señales a nivel de roca firme. Los cambios en las señales sísmicas generados por la propagación de onda en los estratos de suelo inciden directamente en las solicitaciones y el comportamiento de las edificaciones ante un terremoto. Por esta razón es de vital importancia estimar de manera adecuada los efectos generados por los depósitos superficiales de suelo blando.

Para determinar la respuesta dinámica en una ubicación específica, se requiere conocer las características estratigráficas y propiedades geotécnicas de los suelos existentes. Estos factores son cruciales para la correcta determinación de los valores de amplificación asociados al comportamiento dinámico del suelo en condiciones de movimiento fuerte.

En esta tesis se desarrolló una metodología para la evaluación de efectos de sitio en ciudades, la cual está basada en la geometría de las formaciones geológicas que dan origen a los suelos blandos. Esta metodología permite calcular la respuesta dinámica del suelo en cualquier punto

dentro de una ciudad. El modelo de efectos de sitio que resulta puede ser aplicado en evaluación del riesgo, generación de shakemaps o microzonificación para diseño estructural.

La metodología implica la construcción de un modelo geotécnico tridimensional, el cual puede ser fácilmente mejorado y ajustado en la medida que se recopile más y mejor información geotécnica. Este modelo provee toda la información necesaria para el cálculo de la respuesta dinámica del suelo en cualquier ubicación dentro de la ciudad. El desarrollo del modelo geotécnico involucra el conocimiento de la geología superficial de la ciudad, y en particular de las formaciones geológicas que dan origen a los suelos blandos. Adicionalmente permite establecer una relación directa entre dicha geología y las propiedades de los suelos blandos de la ciudad.

Los resultados no se presentan por zonas sino de manera rasterizada, lo cual implica el cálculo de la respuesta sísmica de los depósitos de suelo en un gran número de ubicaciones, de las cuales la gran mayoría no han sido exploradas aún. Esto implica un salto cualitativo desde la concepción tradicional de la microzonificación sísmica por zonas, a una concepción por puntos dentro de una malla de cálculo, y en general en cualquier ubicación seleccionada haciendo uso del modelo geotécnico desarrollado.

La incertidumbre asociada al desconocimiento de las características geotécnicas de los suelos está debidamente incluida en el análisis, de manera que puede ser incorporada en posteriores evaluaciones de la amenaza sísmica siguiendo la metodología probabilista. Esto implica un salto cualitativo en lo que se refiere a considerar, en la evaluación de los movimientos sísmicos en superficie, todas las fuentes de incertidumbre de manera integral. En enfoques anteriores al acá propuesto, la respuesta dinámica de los suelos era considerada como determinista y no aportaba ningún nivel de incertidumbre al resultado final de amenaza.

La metodología de cálculo de efectos de sitio fue implementada en el software Seismic Microzonation Studio, el cual es un programa de uso académico libre, que puede ser usado para generar modelos de respuesta dinámica de suelos en cualquier ciudad del mundo.

5.4 CONCLUSIONES SOBRE EL MODELO DE EFECTOS DE SITIO DE BOGOTÁ

Se construyó un modelo de efectos de sitio para Bogotá, haciendo uso de la mejor información disponible en el momento. Con este modelo se calculó la respuesta dinámica en 625 ubicaciones dentro de la ciudad, para 20 simulaciones de estratigrafía por sitio, con el fin de considerar la incertidumbre en los valores de las propiedades geotécnicas. Este modelo constituye un avance importante en la definición de los movimientos sísmicos a nivel de superficie del terreno en Bogotá, debido a que es fácilmente actualizable a medida que se cuente con más y mejor información, y permite calcular la respuesta dinámica en cualquier ubicación dentro de la ciudad.

Se presentan tres aplicaciones directas del modelo de efectos de sitio. La primera tiene que ver con la evaluación del riesgo sísmico incluyendo de manera adecuada las amplificaciones sísmicas asociadas a la vibración de los depósitos de suelo blando. Con este fin, se calculan las funciones de transferencia del espectro de respuesta, a partir de las cuales es posible calcular las pérdidas en un portafolio de edificaciones, considerando los efectos de sitio. Se realizó el cálculo del riesgo para el portafolio de edificaciones del sector educación de Bogotá, y se comparó el resultado con y sin incluir los efectos de sitio en el cálculo. Es evidente la importancia de los efectos de sitio en la estimación probabilista de las pérdidas, así como la importante subestimación del riesgo que puede darse en caso de no considerar adecuadamente estos efectos.

La segunda aplicación está asociada con la estimación de la intensidad sísmica en superficie del terreno tras la ocurrencia de un terremoto. Dentro del marco de operación del sistema SISBOG, desarrollado específicamente para Bogotá, se plantea la actualización de dicho sistema haciendo uso del modelo de efectos de sitio generado. Este modelo es capaz de calcular la respuesta

dinámica en las 625 ubicaciones seleccionadas, en 2.3 minutos, de manera que permite generar mapas de sacudida (Shakemaps) mediante la interpretación directa de los acelerogramas resultantes en los sitios de cálculo. Si el acelerograma es registrado en tiempo real, el sistema puede también hacer el cálculo del shakemap en tiempo real y reportar el resultado a las agencias e instituciones encargadas de la respuesta a emergencia. Adicionalmente el SISBOG permite estimar el nivel de daño en todas las edificaciones de Bogotá, haciendo uso de funciones de vulnerabilidad pre asignadas. El uso de un modelo de respuesta más detallado, como el generado en esta tesis, permitirá a un sistema como el SISBOG generar estimativos de daño más ajustados a la realidad.

La tercera aplicación corresponde a la definición de coeficientes sísmicos de diseño, lo cual es comúnmente conocido como la microzonificación sísmica de la ciudad. La microzonificación resultante permite generar espectros elásticos de diseño de edificaciones, armonizados a la normativa nacional, por medio de la definición de los parámetros que están asociados a la respuesta del suelo. Del cálculo de la amenaza sísmica en superficie del terreno, se obtuvieron espectros de amenaza uniforme para 475 años de periodo de retorno, los cuales se usaron como base de calibración para ajustar un espectro elástico de diseño, mediante la optimización de los parámetros asociados con la respuesta de sitio. Esto permite entonces contar con una microzonificación sísmica definida de manera suavizada para cualquier ubicación dentro de la ciudad. Esta manera de presentar la información acerca de los espectros de diseño constituye un salto cualitativo dado que se elimina la necesidad de definir zonas y, por lo tanto, los problemas que comúnmente se presentan para la utilización de los espectros de diseño en las fronteras de las zonas. Finalmente, dentro de un hipotético acto administrativo mediante el cual la ciudad adoptase como normativos los resultados de esta microzonificación, es muy simple, desde el punto de vista legal, adoptar los mapas de los parámetros F_a y F_v como base de aplicación de la normativa.

Es importante resaltar que si bien el modelo propuesto permite determinar de manera analítica la respuesta sísmica en cualquier ubicación, es fundamental mantener una estrategia de investigación local de las características dinámicas de los suelos. Para este fin, recomienda la instalación de acelerómetros en profundidad mediante la construcción de boreholes, de manera que en el caso de la ocurrencia de un sismo real, sea posible registrar la señal en roca base y simultáneamente en superficie, para obtener valores medidos de las funciones de transferencia. También es importante fomentar campañas de investigación y caracterización geotécnica de los suelos de la ciudad. A la fecha se cuenta con información geotécnica de alta calidad solamente en algunos pocos sitios, de manera que debe mejorarse la cantidad de sitios explorados en donde se recabe información detallada. Debe también fomentarse el uso de métodos de investigación geofísica con el fin de determinar de manera rápida parámetros fundamentales como la velocidad de onda de cortante. En cuanto a la ubicación de posibles nuevos puntos de investigación, deberá darse prioridad a las zonas de expansión de la ciudad y las zonas en las cuales la densidad de perforaciones existentes es baja. Adicionalmente, con el fin de complementar el modelo desarrollado, debe extenderse el dominio del análisis para cubrir la extensión real de los depósitos de suelo blando de Bogotá. Adicionalmente deben incluirse modelaciones de respuesta bidimensional en las zonas de piedemonte, así como consideraciones sobre la amplificación topográfica en los cerros y colinas.

Finalmente, con el uso del modelo de efectos de sitio presentado, la ciudad puede establecer una política integral de gestión del riesgo sísmico que comprenda la definición de alternativas de mitigación de la vulnerabilidad en edificaciones, estrategias de retención y transferencia del riesgo financiero, la elaboración de planes de respuesta a emergencias, la implementación de un sistema de evaluación automática de daños post-terremoto, y la adopción de una microzonificación sísmica más detallada dentro del código local de construcciones.

5.5 FUTUROS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

En esta tesis se abordaron las temáticas de la atenuación del movimiento fuerte y los efectos de

sitio, con un enfoque a su aplicabilidad en modelos de evaluación probabilista del riesgo y a la gestión del riesgo sísmico en general. Si bien estos temas en sí mismos presentan grandes oportunidades para la investigación y el avance del conocimiento, quiere hacerse énfasis en que, dentro del marco de esta tesis, su desarrollo está asociado a la evaluación probabilista del riesgo. Con esto en mente, se presentan a continuación algunas propuestas de futuros trabajos de investigación, derivados de los desarrollos de esta tesis.

5.5.1 REFINAMIENTO DEL MODELO DE ESPECTRO DE FUENTE

Como se ha mencionado, el modelo de espectro de fuente usado incluye los principales fenómenos que participan en la atenuación del movimiento fuerte. Sin embargo, es posible incluir, mediante formulaciones adecuadas, otros efectos observados, como por ejemplo los efectos de Foot-wall y Hanging-wall que han sido observados en terremotos ocurridos en fallas de cabalgamiento. Así mismo, es interesante modificar el modelo de espectro de fuente finita empleado en esta tesis, para considerar una geometría de ruptura no circular, y una ubicación del sitio no perpendicular al vector normal al plano de la ruptura. Estas adiciones proveerán mayor robustez al modelo final de atenuación del movimiento fuerte que se derive de la calibración.

5.5.2 CÁLCULO DE MODELOS DE ATENUACIÓN PARA DIFERENTES REGIONES DEL MUNDO

Si bien el modelo de atenuación generado para Colombia en esta tesis es, sin duda, el más ajustado a los datos observados, constituyendo así un caso exitoso de aplicación de la metodología de calibración, es importante aplicar la metodología a otras regiones del mundo, con entornos tectónicos diferentes, de manera que sea posible determinar su aplicabilidad real así como observar posibles limitaciones. También es interesante la generación de modelos de atenuación de aplicabilidad global, usando bases de acelerogramas mundiales, como la del proyecto NGA del PEER (Universidad de California en Berkeley), de manera que sea posible comparar los sesgos y desviaciones estándar obtenidos con esta metodología, con los reportados por otros autores para modelos de atenuación calibrados con la misma base de información.

5.5.3 REFINAMIENTO DEL MODELO DE EFECTOS DE SITIO

El modelo de efectos de sitio presentado tiene un alcance que puede mejorarse al incluir aspectos asociados a la respuesta bidimensional y a la amplificación por efectos topográficos, ambos aspectos de gran importancia en algunas ciudades del mundo.

Por otra parte, es interesante explorar la posibilidad de incluir en la aplicación de la microzonificación sísmica, aspectos relevantes en el diseño y construcción de edificaciones. Por ejemplo, es posible determinar parámetros sísmicos de diseño (F_a y F_v , o los que correspondan a la normativa local) para diferentes profundidades de cimentación, teniendo en cuenta que, en la gran mayoría de los casos, las estructuras no son cimentadas a nivel de la superficie del terreno. A esto pueden sumarse consideraciones generales acerca de la interacción dinámica suelo-estructura, para sistemas típicos de cimentación.

5.5.4 MODELACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA BASADA EN FUNCIONES DE TRANSFERENCIA ESTRUCTURAL

Se propone el desarrollo de un nuevo marco metodológico para la modelación de la vulnerabilidad sísmica de edificaciones en la evaluación probabilista del riesgo sísmico. En este enfoque, el edificio se entiende como un sistema compuesto por diferentes componentes (sistema estructural, elementos no estructurales y contenidos), que pueden ser afectados por una demanda sísmica en particular. La vulnerabilidad de cada componente se caracteriza mediante una función de pérdida que indica la variación de los momentos de probabilidad (valor esperado y varianza) de la pérdida económica del elemento, con la demanda sísmica transmitida por la estructura. La demanda

sísmica en cada elemento de la estructura se calcula usando un conjunto de funciones de transferencia que relacionan el fuerte movimiento de entrada, en la base del edificio, con parámetros sísmicos relevantes para cada elemento en el interior del edificio (por ejemplo la aceleración máxima, la deriva de entrepiso, etc). Este enfoque permitiría el cálculo de una función de densidad de probabilidad de la pérdida económica para diferentes valores de intensidad de movimiento fuerte en la base de la edificación, y en consecuencia la definición de funciones de vulnerabilidad consistentes con la metodología de evaluación de riesgo presentada en esta tesis.

5.5.5 MODELACIÓN DEL RIESGO EN SISTEMAS DE ELEMENTOS EXPUESTOS

Cuando se realiza un análisis de riesgo en ciertos sistemas de infraestructura, particularmente en líneas vitales y sistemas de transporte, la pérdida que ocurre en cada uno de los elementos que componen el sistema, calculada únicamente a partir de su función de vulnerabilidad, es la pérdida directa ocurrida después del terremoto, es decir, establece lo que cuesta reparar o reponer dicho componente de infraestructura. Sin embargo, en estos casos, el análisis no debe limitarse únicamente a la estimación de pérdidas directas dado que cada componente del sistema cumple una tarea específica y, por lo tanto, los daños que ocurran en unos de ellos afectan el funcionamiento del sistema completo.

Se propone el desarrollo de una metodología de evaluación del riesgo considerando pérdidas indirectas y consecuenciales tras la ocurrencia de los terremotos en sistemas de elementos expuestos. Conviene explorar la teoría de simulación por eventos discretos, de manera que sea posible simular la respuesta de un sistema particular ante daños o pérdidas en algunos de sus componentes. Mediante este tipo de modelación es posible realizar un número significativo de simulaciones, de manera que puedan establecerse estadísticas y ajustar funciones de distribución de probabilidad a variables de particular interés como: tiempo de interrupción en el servicio, costo de la recuperación, número de usuarios sin servicio, etc.

REFERENCIAS

- Abrahamson, N. y Silva, W. 2008. Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*, Vol 24, N° 1, pp 67-98. Febrero 2008.
- Abramowitz, M., and Stegun, I. A. 1964. Handbook of mathematical functions. National Bureau of Standards. Applied Mathematics Series.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). 2010. Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia. Comité AIS-300
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). 2014. Código Colombiano de Puentes. Comité AIS-200
- Aki, K. 1967. Scaling Law of Seismic Spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 72, pp. 1217-1231.
- Aki, K., Richards, P.G. 2002. *Quantitative Seismology*, Second Ed. University Science Books, Sausalito, CA.
- Atkinson, G. M. 1995. Attenuation and Source Parameters of Earthquakes in the Cascadia Region. *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol. 85, No. 5, pp. 1327-1342
- Bardet, J. P., Ichii, K. y Lin, C. H. 2000. EERA: A Computer Program for Equivalent-Linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- Bazurro, P., y Cornell, A. C. 2004. Nonlinear Soil-Site Effects in Probabilistic Seismic-Hazard Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 94-6, pp. 2110-2123.
- Bernal, G. 2009. Sistema automático de evaluación del daño post-terremoto para la ciudad de Bogotá. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Bogotá.
- Boore, D. M. y Atkinson, G. M. 2008. Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s. *Earthquake Spectra*, Vol 24, N° 1, pp 99-138. Febrero 2008.
- Brune, J.N. 1970. Tectonic Stress and the Spectra of Seismic S Waves from Earth. *Journal of Geophysical Research*, 75, pp. 4997-5009.
- Campbell, K.W. 1997. Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra. *Seismological Research Letters*. 68(1), 154 -179.
- Campbell, K. W. y Bozorgnia, Y. 2008. NGA Ground Motion Model for the Geometric Mean Horizontal Component of PGA, PGV, PGD and 5% Damped Linear Elastic Response Spectra for Periods Ranging from 0.01 to 10 s. *Earthquake Spectra*, Vol 24, N° 1, pp 139-172. Febrero 2008.
- Cartwright, D. E. y Longuet-Higgins, M. S. 1956. The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function. *Proc. Roy. Soc. London*, 237, pp. 212-232.
- Castro, R. R., Anderson, J. G. and Singh, S. K. 1990. Site response, attenuation and source spectra of S waves along the Guerrero, Mexico, subduction zone. *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol. 80, No. 6, pp. 1481-1503
- Chiou, B. S.-J. & Youngs, R. R. 2008. An NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra. *Earthquake Spectra*, Vol 24, N° 1, pp 173-216. Febrero 2008.
- Cornell, C.A. 1968. Engineering Seismic Risk Analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58, pp. 1583-1606

- Cornell, C.A. y Winterstein, S. R. 1986. Applicability of the Poisson Earthquake-Occurrence Model. Seismic Hazard Methodology for the Central and Eastern United States, EPRI Research Report NP-4726, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California
- Davenport, A.G. 1964. Note on the Distribution of the Largest Value of a Random Function with Application to Gust Loading. Proc. Inst. C. E., 28, pp. 187-196.
- Der-Kiureghian, A. y Ang, A. H. S. 1977. A Fault-Rupture Model for Seismic Risk Analysis. Bulletin of the Seismological Society of America, 67, pp. 1173-1194
- ERN-América Latina. 2009. CAPRA: Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment. World Bank, IADB, UN-ISDR, CEPREDENAC.
- Esteva, L. 1970. Seismic Risk and Seismic Design Decisions. En: Hansen, R. J. (ed.). Seismic Design of Nuclear Power Plant. MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- Gallego, M. 1999. Estimación del Riesgo Sísmico en la República de Colombia. Tesis de Maestría. División de Estudios de Posgrado, UNAM.
- Gallego, M., and Ordaz, M. 1999. Construcción de leyes de atenuación para Colombia a partir de espectros fuente y teoría de vibraciones aleatorias. Revista internacional de ingeniería de estructuras. Vol. 4, 1, pp 45-60.
- Gautschi, W. & Cahill, W. F. 1965. Exponential integral and related functions. Handbook of mathematical functions. Abramowitz, M. & Stegun, I. (Ed). Dover publications, New York.
- Gilbert, F. y Backus, G. 1966. Propagator Matrices in Elastic Wave and Vibration Problems. Geophysics, 31, pp. 326-332
- Gutenberg, B. y Richter, C. F. 1944. Frequency of Earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America, 34, pp. 1985-1988
- Hardin, B.O., y Black W.L. 1968. Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay. Journal of the Soil Mechanics Foundations Division, ASCE. 94 SM2.
- Hanks, T. C. & Kanamori, H. 1979. A moment magnitude scale. J. Geophys. Res. 84, pp. 2348-2350.
- Hanks, T. C. 1982. f_{max} . Bull. Seism. Soc. Am, Vol 72, No. 6, pp. 1867-187
- Hassani, B., Zafarani, H., Farjoodi, J. and Ansari, A. 2011. Estimation of site amplification, attenuation and source spectra of S-waves in the East-Central Iran. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 31 (2011) 1397-1413
- Haskell, N. A. 1953. The Dispersion of Surface Waves in Multilayered Media. Bulletin of the Seismological Society of America, 43, pp. 17-34
- Helmens K. y Van der Hammen T. 1995. Memoria explicativa de los mapas del Neógeno y Cuaternario de la Sabana de Bogotá-cuenca alta del río Bogotá. IGAG. Análisis Geográficos. 24:91-142 p. Bogotá.
- Hermann, R B. 1985. An extension of random vibration theory estimates of strong ground motion to large distances, Bull. Seism. Soc. Am, 73, pp. 157-171.
- Huerta, A., Sarrate, J., Rodríguez-Ferran, A. 1998. Métodos numéricos: Introducción, aplicaciones y programación. Edicions UPC. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, España.
- Huerta, B., Ordaz, M., Reinoso, E. 2011. Propuesta de un formato estándar para estudios de microzonificación sísmica y la experiencia de su aplicación en sistemas computacionales. Memorias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, Agosto 2011.
- Idriss, M. I. y Seed, H. B. 1968. Seismic Response of Horizontal Soil Layers. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol 94, N° SM4, Julio 1968.

- Idriss, M. I. y Sun, J. I. 1992. SHAKE91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analysis of Horizontally Layered Soil Deposits. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil & Environmental Engineering, University of California, Davis.
- Idriss, M. I. 2008. An NGA Empirical Model for Estimating the Horizontal Spectral Values Generated By Shallow Crustal Earthquakes. *Earthquake Spectra*, Vol 24, N° 1, pp 217-242. Febrero 2008.
- Ishibashi, I. y Zhang, X. 1993. "Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay". *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol 33, No 1. 1993. pp 182-191.
- Joyner, W.B., y Boore, D.M. 1988. Measurement, characterization and prediction of strong ground motion. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II*, Proc. Am. Soc. Civil Eng. Geotech. Eng. Div. Specialty Conf. Junio 27-30, 1998, Park City, Utah.
- Kanai, k. 1951. Relation between the Nature of Surface Layer and the Amplitude of Earthquake Motions. *Bulletin*, Tokyo Earthquake Research Institute.
- Kramer, S. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- Knopoff, L. 1964. Q. *Review of Geophysics*, 2, pp. 625-660.
- Lysmer, J., Seed, H. B. y Schnabel, P. B. 1971. Influence of Base-Rock Characteristics on Ground Response. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 61, pp 1213-1232
- Marulanda, M., C. 2013. Modelación probabilista de pérdidas económicas por sismo para la estimación de la vulnerabilidad fiscal del estado y la gestión financiera del riesgo. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Matthiesen, R. B., Duke, C. M., Leeds, D. J. y Fraser, J. C. 1964. Site Characteristics of Southern California Strong-Motion Earthquake Stations, Part Two. Report N° 64-15, Department of Engineering, University of California, Los Angeles, Agosto 1964.
- NSR-10. 2010. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Ordaz, M., and Singh, S. K. 1992. Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City. *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol. 82, No. 1, pp. 24-43
- Ordaz, M. 2000. Metodología para la evaluación del riesgo sísmico enfocada a la gerencia de seguros por terremoto. Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.
- Ordaz, M., Aguilar, A. y Arboleda, J. 2007. CRISIS2007: Program for Computing Seismic Hazard. Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ordaz, M. 2008. Relaciones entre curvas de fragilidad, matrices de probabilidad y funciones de vulnerabilidad. Nota técnica ERN Ingenieros Consultores S.C.
- Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina - LA RED. 1993. Los desastres no son naturales. Compilador: Andrew Maskrey.
- Salgado M. 2010. Evaluación probabilista y espectral de la amenaza sísmica de Colombia: Estudio general con fines de diseño sismo resistente. Universidad de Los Andes. Bogotá, Colombia.
- Salgado M., Bernal G., Yamín L., Cardona O. 2010. Evaluación de la amenaza sísmica de Colombia. Actualización y uso en las nuevas normas colombianas de diseño sismo resistente NSR-10. *Rev. de Ing.* 32: 28-37. Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.
- Sociedad Colombiana de Geotecnia - SCG. 2006. Modelo geotécnico de la Sabana de Bogotá.
- Singh, S. K., Apsel, R., Fried, J., y Brune, J. N. 1982. Spectral Attenuation of SH Waves along the Imperial Fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72, pp. 2003-2016.

- Singh, S. K., Ordaz, M., Anderson, J.G., Rodriguez, M., Quaas, R., Mena, E., Ottaviani, M., and Almora, D. 1989. Analysis of near source strong ground motion recordings along the Mexican subduction zone. *Bull. Seism. Soc. Am.* 70, pp. 903-914.
- Singh, S. K., Iglesias, A., García, D., Pacheco, J. F. and Ordaz, M. 2007. Q of Lg Waves in the Central Mexican Volcanic Belt. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 97, No. 4, pp. 1259–1266
- Stewart, P., y Goulet, C. A. (2006). Comment on “Nonlinear Soil-Site Effects in Probabilistic Seismic-Hazard Analysis” by Paolo Bazzurro and C. Allin Cornell. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 96, No. 2, pp. 745–747
- Ramberg, W. y Osgood, W. T. 1943. Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters. Technical Note 902, NACA
- Reiter, L. 1990. *Earthquake Hazard Analysis - Issues and Insights*. Columbia University Press, New York, 254 pp
- Roesset, J. M. y Whitman, R. V. 1969. Theoretical Background for Amplification Studies. Research Report N° R69-15, Soils Publications N° 231, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. y Seed, H. B. 1972. SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. Report N° UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Diciembre de 1972.
- Seed H. B. e Idriss I. M. 1969. Influence of soil conditions on ground motions during earthquakes, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 95, No. SM1, Proceedings Paper 6347, January 1969, pp. 99-137.
- Seed, H. B. e Idriss, M. I. 1970. Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis. Report N° UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Diciembre de 1970.
- Singh, S. K., Bazan, E., y Esteva, L. 1980. Expected Earthquake Magnitude from a Fault. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 70, N° 3, pp. 903-914, Junio 1980.
- Singh, S. K., Ordaz, M., Anderson, J.G., Rodriguez, M., Quaas, R., Mena, E., Ottaviani, M., y Almora, D. 1989. Analysis of Near Source Strong Ground Motion Recordings along the Mexican Subduction Zone. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 70, pp. 903-914.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B. y Richart, F. E., Jr. 1973. Soil Motion Computations by Characteristics Method. ASCE National Structural Engineering Meeting, San Francisco
- Streeter, V. L., Wylie, E. B., y Richart, F. E., Jr. 1974. CHARSOIL: Characteristics Method Applied to Soils. NISEE, University of California, Berkeley.
- Tavakoli, B., and Pezeshk, S. 2005. Empirical-Stochastic Ground-Motion Prediction for Eastern North America. *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 95, No. 6, pp. 2283–2296
- Thompson, W. T. 1950. Transmission of Elastic Waves through a Stratified Solid. *Journal of Applied Physics*, 21, pp. 89-93
- Torres, M. A., Jaimes, M. A., Reinoso, E., Ordaz, M. 2013. Event-based approach for probabilistic flood risk assessment. *International Journal of River Basin Management*. DOI: 10.1080/15715124.2013.847844
- Universidad de los Andes. 2006. Actualización de la Microzonificación Sísmica de Bogotá. CEDERI - Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos.
- Wells, D. L. y Coppersmith, K. J. 1994. New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 84, N° 4, pp. 974-1002, Agosto 1994.

- Wu, S.-C., Cornell, C.A., Winterstein, S.R. 1995 A hybrid recurrence model and its implication on seismic hazard results. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85-1, pp. 1-16.
- Youngs, R. R. y Coppersmith, K. J. 1985. Implications of Fault Slip Rates and Earthquake Recurrence Models to Probabilistic Seismic Hazard Assessments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 75, pp. 939-964
- Zafarani, H. and Soghrat, M. 2012. Simulation of Ground Motion in the Zagros Region of Iran Using the Specific Barrier Model and the Stochastic Method. *Bull. Seism. Soc. Am*, Vol. 102, No. 5, pp. 2031–2045
- Zuloaga, D. 2011. Implicaciones en la estimación del riesgo sísmico de Bogotá como resultado de una nueva interpretación sismo-tectónica. Tesis de pregrado en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes, Bogotá.

