

Parte II

Aplicación a Manizales (Colombia)

Capítulo 7

La acción sísmica

7.1 Introducción

En este capítulo se describe la amenaza sísmica existente en la ciudad de Manizales (Colombia). Se ha elegido esta ciudad, debido a que, considerando su alta densidad poblacional y urbanística y los sistemas de fallas tectónicas que la afectan directamente, la probabilidad de que se produzcan grandes desastres naturales es alta, tal y como pudo comprobarse el 13 de Noviembre de 1985, con la erupción del volcán nevado del Ruíz, la cual provocó la desaparición de una población entera (Armero) y dejó un saldo estimado de 23.000 víctimas mortales y 200.000 afectadas. Lo anterior, supone un interés especial en la definición adecuada del riesgo al que se encuentra expuesta esta ciudad y, requiere de estudios exhaustivos y detallados de la amenaza y vulnerabilidad sísmica.

La ciudad de Manizales está localizada en una zona de alta sismicidad, por lo tanto, dispone de registros de historias temporales de aceleración (acelerogramas). Por lo tanto, en este capítulo, se presenta un modelo estocástico desarrollado por Hurtado (1999), para describir la variación temporal de las ondas sísmicas esperadas en la ciudad de Manizales (Colombia) con base en los registros obtenidos allí en años recientes. A partir de este modelo, se generan acelerogramas sintéticos, que serán utilizados en los capítulos 8 y 9 para analizar la respuesta de los edificios aporricados de hormigón armado de la ciudad.

El capítulo comienza con una breve descripción de Manizales, desde el punto de vista geográfico y geológico. Posteriormente, se expone la tectónica, la sismicidad, los principales sistemas de fallamiento de la región y los mapas de amenaza sísmica propuestos por las normativas Colombianas para todo el territorio Nacional. Finalmente, se presentan dos formas de considerar la demanda sísmica para la ciudad: 1) los espectros elásticos de diseño propuestos por el primer Código de Construcciones Sismo Resistente de 1984 (CCCSR-84) y las actuales Normas Colombianas de Diseño Sismorresistente de 1998 (NSR-98) y, 2) los espectros de respuesta de acelerogramas sintéticos generados a partir del modelo estocástico desarrollado.

verse al fondo, el volcán nevado del Ruíz.



Figura 7.2. Panorámica de la ciudad de Manizales - Colombia.

7.3 La ciudad: descripción geológica

El entorno de la ciudad de Manizales está constituido por unidades de roca que se han establecido en distintos períodos de tiempo y cuya historia está contenida dentro de la misma evolución de la cordillera central, en un ambiente muy dinámico, que involucró tanto el dominio oceánico como el continental. Rocas sedimentarias depositadas en un mar cretácico poco profundo, intercaladas con productos de vulcanismo submarino constituyen la base de la columna geológica regional en el área de estudio (Formación quebrada grande, gravos del río olivares). Estas rocas subyacen principalmente bajo rocas y depósitos continentales del terciario superior (Formaciones Casablanca y Manizales) y del cuaternario, que provienen tanto de una actividad volcánica intrusiva y extrusiva, como de un origen fluviovolcánico y aluvial. La Figura 7.3 esquematiza el ambiente tectónico del país. En el informe final del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Manizales (CIMOC y CEDERI, 2002) se presenta una descripción más amplia del entorno geotectónico de la ciudad.

7.4 La ciudad: amenaza sísmica

7.4.1 Tectónica y sismicidad

Emplazamiento tectónico

Colombia está localizada dentro de una de las zonas sísmicas más activas de la tierra denominada Anillo Circumpacífico. Su emplazamiento tectónico es complejo debido a que en su territorio convergen tres placas tectónicas: la placa de Nazca, la placa Suramericana y la placa Caribe (ver Figura 7.3). Estas placas interactúan creando esfuerzos de compresión, tracción y corte dentro de la región, los cuales generan acumulación de energía. Las zonas más activas, sísmicamente hablando, están localizadas en la región andina del país, la cual está compuesta de tres cordilleras: occidental, oriental y central; de éstas la más antigua es la central y la más reciente es la oriental, conformando un ambiente morfológico complejo que en la actualidad sigue siendo motivo de investigación (Sarria, 1995).

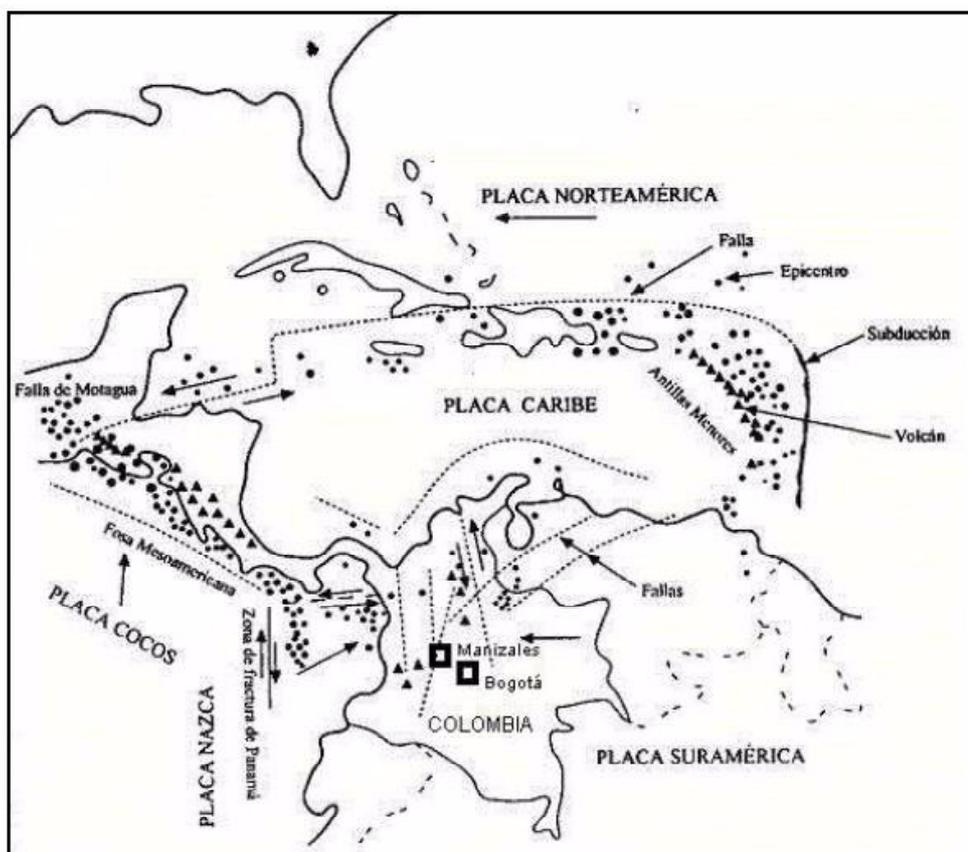


Figura 7.3. Emplazamiento tectónico del noroccidente de Suramérica (Sarria, 1995).

La geología estructural del país ha sido estudiada con diferentes grados de detalle. En general los sistemas principales de fallamiento han sido identificados gracias a estudios mineros y de explotación petrolera. Además se han realizado exploraciones geológicas detalladas para los grandes proyectos hidroeléctricos y existen numerosos trabajos sobre tectónica Colombiana realizados por INGEOMINAS y otras instituciones (AIS, 1998).

Sistemas de fallamiento

El fallamiento predominante en el país tiene dirección norte sur, coincidiendo con la dirección de las tres cordilleras. El principal accidente sismotectónico es una zona de subducción en el océano Pacífico, causada por el doblamiento de la placa de Nazca cuando subduce bajo la placa Suramericana. En esta zona se presentan muchos hipocentros de sismos con magnitudes mayores que 5 y pueden observarse notables concentraciones de epicentros en algunas zonas tales como: el límite entre Colombia y Panamá, la región del antiguo Caldas y el Nido de Bucaramanga, siendo éstas las zonas del país donde existe mayor amenaza sísmica. Además de la zona de subducción existen, en el territorio nacional, un gran número de fallas geológicas sísmicamente activas, las cuales se muestran en la Figura 7.4 (AIS, 1998).

Para el caso de la ciudad de Manizales, las fuentes que generan mayor amenaza son de 2 tipos: el primero se debe a fuentes cercanas, como es el caso de la falla Romeral, cuyo trazo pasa apenas a pocos kilómetros de la ciudad y la cual ha sido generadora de eventos como el de Popayán en 1983 y más recientemente el de Armenia-Quindío (1999). Esta fuente aunque no es generadora de grandes sismos, se encuentra a una distancia lo suficientemente pequeña como para generar fuertes intensidades, a tal punto que es considerada la mayor fuente de amenaza sísmica sobre ciudades tales como Medellín, Armenia y Pereira. Además, existen otras fallas como Palestina, Cauca o Murindó que presentan desplazamientos medios de hasta 3 mm/año y que contribuyen a la amenaza sísmica de la ciudad. El segundo tipo de amenaza se debe a fuentes con distancias intermedias pero con gran capacidad de liberación de energía, como es el caso de la zona de subducción. Estas fuentes se encuentran localizadas al occidente de la ciudad y han sido las causantes de muchos movimientos en esta región. En 1995 una de estas fuentes generó un sismo que ocasionó pérdidas apreciables en la ciudad de Pereira. En las Figuras 7.5 y 7.6 se destacan respectivamente las fuentes potencialmente generadoras de sismos en la región andina, así como en la zona de Manizales, con un mayor nivel de detalle en el trazo de los corredores de las fuentes que se encuentran cerca de la ciudad.

Recientemente se realizó el estudio de amenaza sísmica para la ciudad, mediante el cual se identificaron las participaciones de cada una de las fuentes con influencia en Manizales en términos de la aceleración máxima del suelo, utilizando un análisis clásico de amenaza. La Figura 7.7 muestra las tasas de excedencia en terreno firme de la aceleración máxima de cada una de las fuentes que aportan peligro en un punto

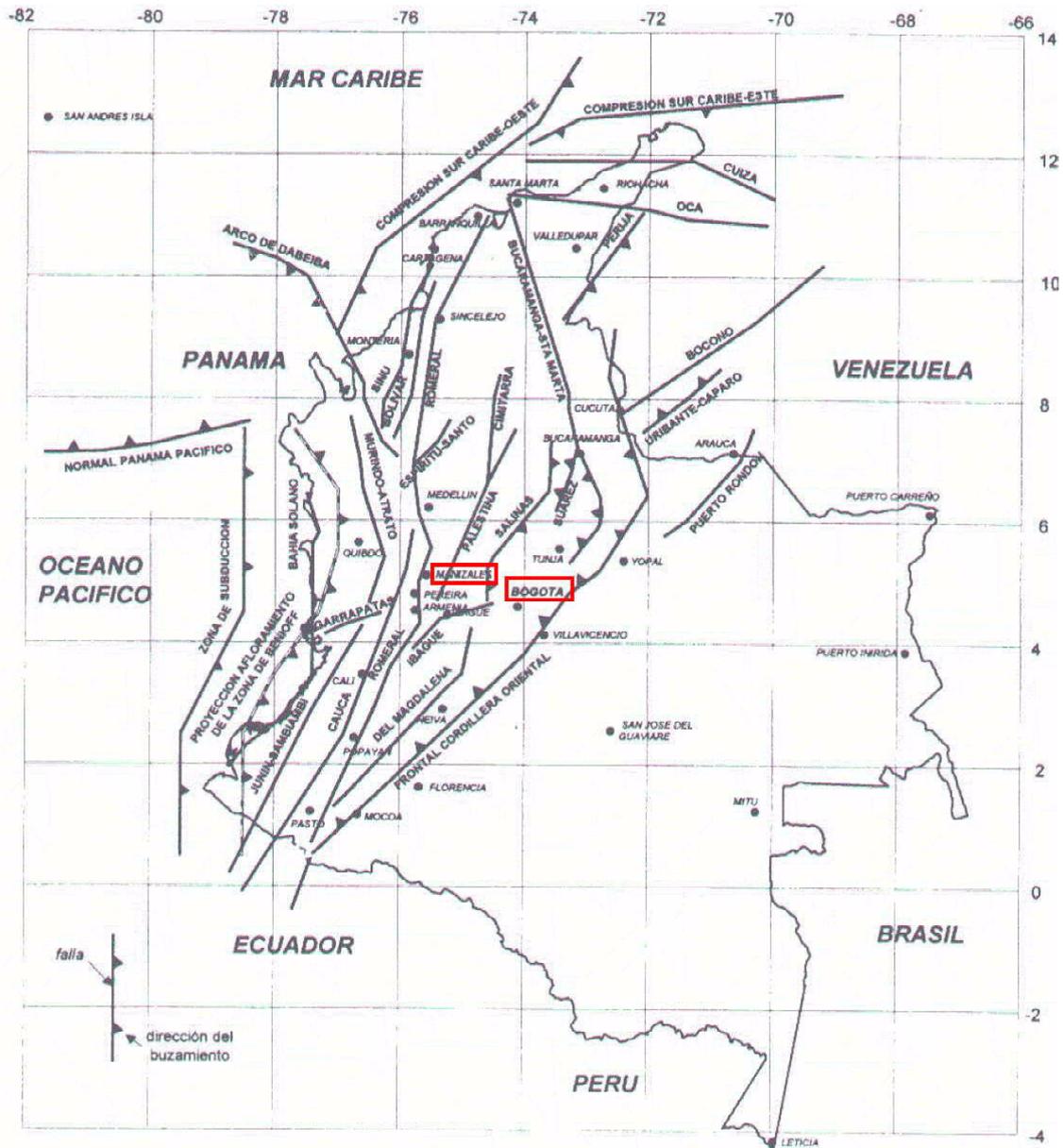


Figura 7.4. Principales sistemas de fallamiento en Colombia (AIS, 1998).

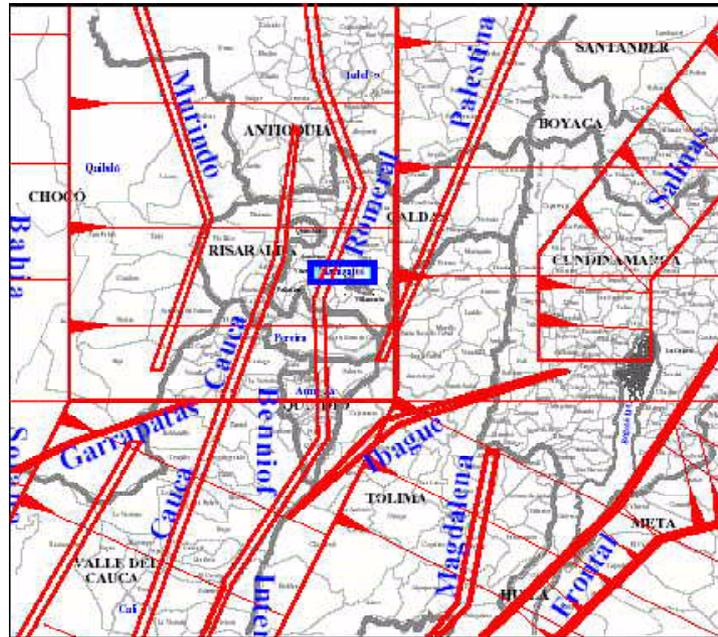


Figura 7.5. Distribución de las fuentes que pueden generar sismos en la zona Andina Colombiana (Informe del Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002).

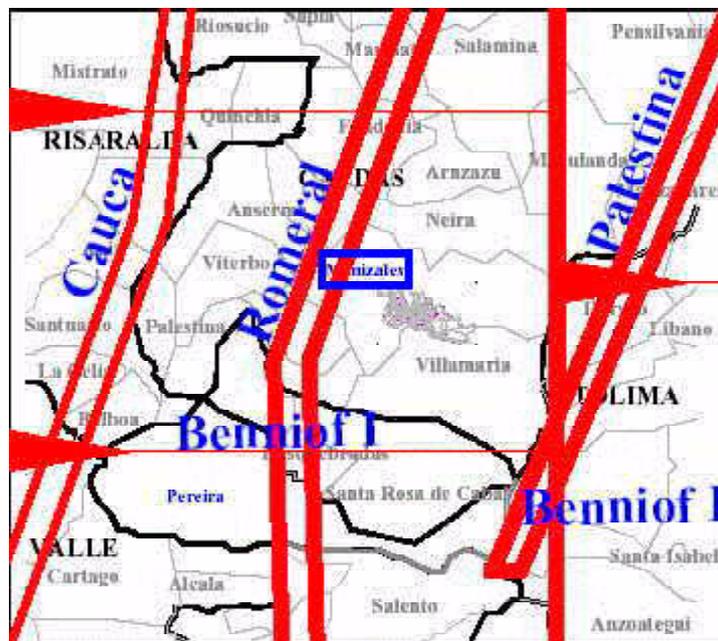


Figura 7.6. Distribución de los trazos de las fuentes que pueden generar sismos en la zona Andina Colombiana (Informe del Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002).

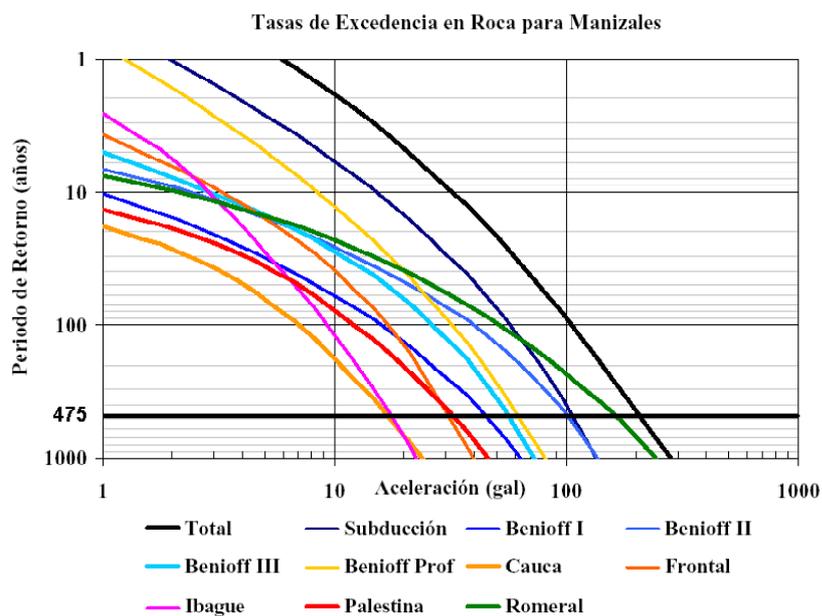


Figura 7.7. Tasas de excedencia por fuente y total para el caso de aceleración máxima en Manizales (Informe del Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002).

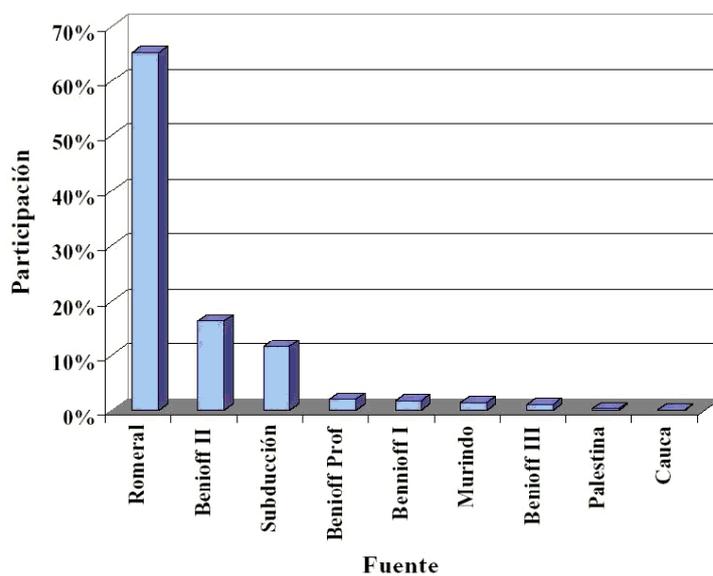


Figura 7.8. Participación de las fuentes más relevantes en la amenaza sísmica de Manizales para un período de retorno T_R de 475 años (Informe del Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002).

determinado de la ciudad. La Figura muestra además, la tasa total, es decir, la que resulta de sumar las contribuciones de cada fuente para la aceleración máxima sobre terreno firme.

En la Figura 7.8 se puede ver, en términos de porcentaje, la importancia relativa de las fuentes que aportan peligro a la ciudad en función de la aceleración máxima del suelo, para un período de retorno de 475 años. Claramente la principal fuente de amenaza sísmica es la falla de Romeral (más del 60 % de participación).

Principales sismos en Manizales

Así pues, la zona cafetera de Colombia se encuentra ubicada en una de las zonas de mayor actividad sísmica del país y está conformada por los departamentos de Caldas, Quindío, Risaralda, Tolima, Antioquia y Valle. Las fuentes sismogénicas a las cuales se asocian los sismos registrados en esta zona, son de carácter variable, destacándose los sismos provenientes de la zona de subducción del Pacífico y los sismos asociados con las fallas activas de corteza que recorren las cordilleras colombianas. La Tabla 7.1 presenta un resumen de los sismos históricos más importantes de los que se tiene algún tipo de informe para la zona del eje cafetero. Los sismos asociados con la subducción, han producido históricamente los mayores daños en el conjunto de la zona cafetera, con valores de intensidad mayores o iguales a VII. Generalmente se trata de eventos de profundidad intermedia (70 - 180 km), que generan efectos notorios y relativamente homogéneos en el conjunto de la zona. Las isosistas generalmente son alargadas en dirección N-NE debido a la presencia dominante de fallas mayores en esta dirección, que contribuyen a la atenuación de las ondas sísmicas en dirección perpendicular al tren de fallas. Las magnitudes de los sismos de subducción son del orden de 5.5 - 7.5 Ms y, la frecuencia media en el tiempo es de aproximadamente 13 años para valores de intensidad mayores o iguales a VII en la escala MSK (Espinosa, 1996).

Los sismos superficiales de la zona cafetera, están asociados a las fuentes sismogénicas locales, e históricamente han generado daños en vecindad de la zona epicentral. En el último siglo, se han identificado 19 sismos con intensidad mayor o igual a V. Sólo dos de ellos, tienen carácter local, mientras que los demás han afectado a toda la región. Los datos disponibles arrojan un promedio de un sismo con algún tipo de daño cada 5 años aproximadamente.

Fecha dd/mm/aa	Epicentro	Lat. N	Long. W	Prof. (km)	Intens. MSK	Mag.
12/07/1985	Páramo de Chingaza	4.7	73.8	30	IX	7.0
16/11/1827	Quebrada Santa Ana (Caquetá)	2.0	75.9	10	X	7.7
19/05/1875	Cúcuta (Norte de Santander)	7.9	72.5	20	X	7.7
9/02/1878	Parque Nacional de los nevados	4.8	75.5	25	VII	---
09/09/1878	Parque Nacional de los nevados	4.8	75.5	---	VIII	---
25/05/1885	Noreste de Popayán (Cauca)	2.5	76.5	20	IX	---
31/01/1906	Oceano Pacífico (Sur de Col.)	2.4	79.3	25	X	8.6
31/08/1917	Páramo de Sumapaz	4.3	74.2	40	IX	7.3
22/12/1923	Miraflores (Boyacá)	5.2	73.2	20	IX	---
10/01/1924	Cartago	4.7	76.1	---	VI	---
07/06/1925	Yotoco (Valle)	3.9	76.4	170	VII-VIII	---
04/02/1938	Neira - Aranzazu (Filadelfia)	5.4	75.6	90	VIII	---
20/12/1961	Anserma nuevo - Balboa	4.8	76.0	40	VII	---
30/07/1962	Pereira - Cartago	4.8	75.7	69	VIII	---
09/02/1967	Vegalarga (Huila)	2.9	74.8	26	IX	---
03/04/1973	Finlandia	4.7	75.7	146	VII	---
24/04/1973	Santa Rosa de Cabal	4.9	73.6	19	VII	---
23/11/1979	El Cairo (Valle)	4.8	76.2	105	VIII	5.5
29/11/1986	San José del Palmar (Chocó)	5.1	76.7	90	V-VI	5.5
23/11/1990	Pijao - Roncesvalles	4.3	75.4	129	V	---
19/11/1991	Rio San Juan (Chocó)	4.5	77.5	104	IX	---
18/10/1992	Murindó (Chocó)	7.1	76.8	33	X	7.3
08/02/1995	Calima (Valle)	4.1	76.7	100	VII	6.6
19/08/1995	Apia	4.6	75.4	118	VI	4.7
25/01/1999	Córdoba (Quindío)	4.3	75.6	35	VIII	6.2

Tabla 7.1. Principales sismos de la zona del Eje Cafetero (CIMOC y CEDERI, 2002).

En particular desde 1938 hasta hoy, han ocurrido por lo menos cinco terremotos fuertes cuyas intensidades fueron mayores o iguales a VII y sus magnitudes superiores a 6.0, los cuales se describen a continuación:

- Sismo de Filadelfia, 4 de Febrero de 1938: se sintió en toda el territorio Nacional y ocasionó daños de consideración en las poblaciones de la cordillera central, especialmente en la ciudad de Manizales, donde los daños fueron bastante severos y se produjeron dos víctimas mortales.
- Sismo del Viejo Caldas, 30 de Julio de 1962: causó el colapso de la torre de la catedral de Manizales y muchas edificaciones y residencias sufrieron daños, entre ellas, el Palacio Nacional.

- Sismo de Santa Rosa de Cabal, 23 de Noviembre de 1979: se destruyeron y derrumbaron muchas casas y se presentaron daños en edificios, iglesias y hospitales. Se registraron en total 55 víctimas mortales y 439 heridos graves.
- Sismo de Apía, 8 de Mayo de 1995: se presentaron daños estructurales severos en la ciudad de Pereira y 34 víctimas mortales.
- Sismo del Quindío, 25 de Enero de 1999: los daños ocasionaron una verdadera catástrofe sísmica. Varios barrios de la ciudad de Armenia fueron destruidos, dejando como resultado un total de 1230 víctimas mortales.

La Tabla 7.1 contiene los principales parámetros de estos 5 terremotos.

7.4.2 Mapas de amenaza sísmica

En las Figuras 7.9 y 7.10 se muestra el mapa de zonificación sísmica de Colombia y el mapa correspondiente a los valores de la aceleración pico efectiva A_a , respectivamente. Estos valores tienen una probabilidad de excedencia de tan solo el 10 % en un lapso de 50 años, lo cual corresponde a un período de retorno promedio de 475 años. Es importante tener en cuenta que estos valores corresponden a aceleraciones en roca, sin que se haya incluido el efecto local de amplificación de ondas causadas por el suelo.

La aceleración pico efectiva, A_a , es un parámetro utilizado por las normativas Colombianas para caracterizar la intensidad del movimiento sísmico de diseño, a partir de las recomendaciones propuestas por el ATC-3. Sin embargo, no parece tener una definición precisa en términos físicos, aunque su significado puede entenderse mejor de la siguiente forma: A_a es un factor normalizador para la construcción de los espectros suavizados de las normativas de diseño y es proporcional a las ordenadas espectrales para períodos en el rango entre 0.1 a 0.5 segundos. La constante de proporcionalidad (para un espectro con un amortiguamiento del 5 %) es un valor estándar igual a 2.5. Este parámetro es menor que la aceleración máxima del terreno para frecuencias muy altas, no obstante, para propósitos de cálculo, se puede decir que A_a , es aproximadamente igual a PGA , para períodos comprendidos entre 0.1 y 0.5 segundos (ATC, 1978). En este caso en particular se hace uso de esta aproximación y en adelante se hablará solo de aceleración máxima del terreno para caracterizar la acción sísmica.

El concepto de aceleración efectiva, se define también en trabajos sobre diseño sísmico especial. Newmark y Hall (1987) lo recogen de la siguiente manera: "*es aquella aceleración relacionada con la respuesta estructural y el potencial destructivo de un sismo. Difiere y es menor que la aceleración máxima del terreno en campo libre (PGA) y es una función del área cargada y del contenido frecuencial de la excitación, que a su vez, depende de la cercanía de la fuente y del peso, empotramiento, amortiguamiento y rigidez de la estructura y sus cimientos*". Tal como se usa para

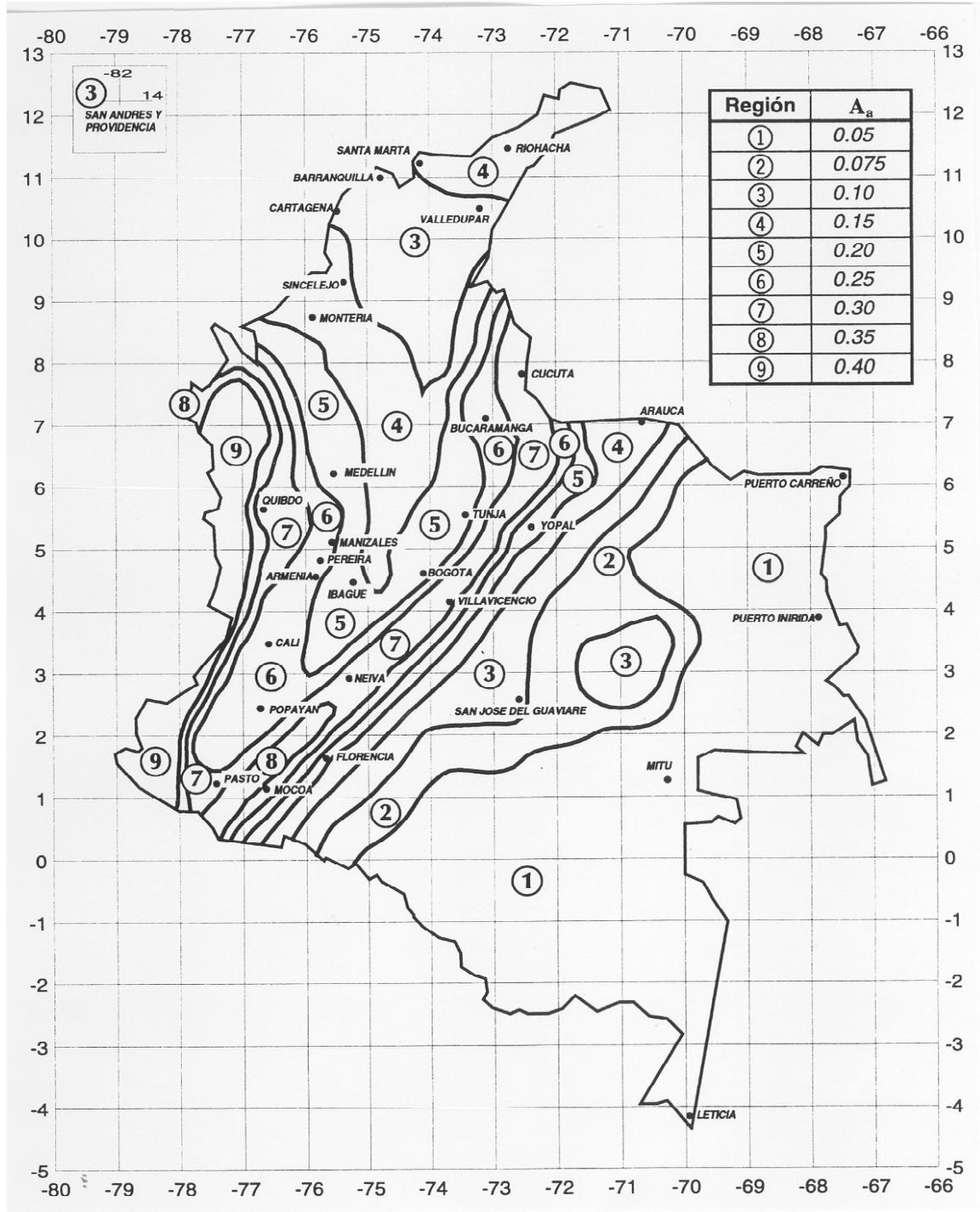


Figura 7.10. Mapa de valores de aceleración efectiva del terreno en roca A_a (AIS, 1998).

el diseño y revisión de instalaciones y servicios críticos, el término "aceleración efectiva", se asocia a la parte significativa del movimiento del suelo que contiene porciones repetitivas del movimiento, que poseen un fuerte contenido de energía y que produce deformaciones lineales y no lineales, significativas. Obviamente, tanto la duración de la sacudida como su amplitud y características en el dominio frecuencial y temporal, se hallan entre los parámetros más importantes a considerar. En base a estas y otras consideraciones, Newmark y Hall concluyen que: "la aceleración efectiva normalmente no es el pico de las aceleraciones instrumentalmente registradas en las altas frecuencias que comúnmente ocurren cerca del foco, especialmente en las cimentaciones de las estructuras de considerable peso y tamaño. Por el contrario, la aceleración efectiva, se esperaría que fuese muy parecida a la aceleración pico instrumental en lugares donde normalmente no existen estos picos de aceleración de altas frecuencias" (Newmark y Hall, 1987).

La Figura 7.9 muestra claramente que el territorio Colombiano está dividido en 3 zonas (baja, intermedia y alta) en función de la aceleración máxima del terreno (Tabla 7.2). En el caso particular de Manizales, las normativas establecen una aceleración igual a 0.25 g que corresponde a una zona de amenaza sísmica alta.

Zona de amenaza sísmica	PGA
Baja	≤ 0.10
Intermedia	0.10-0.20
Alta	≥ 0.20

Tabla 7.2. Clasificación de las zonas de amenaza sísmica (AIS, 1998).

De acuerdo con los estudios realizados para la determinación del grado de amenaza sísmica de las diferentes regiones del país se encontró que alrededor de 12 millones de colombianos de 475 municipios se encuentran en zonas de amenaza sísmica alta, es decir el 35 % de la población; aproximadamente 17 millones de habitantes de 435 municipios localizados en zonas de amenaza sísmica intermedia, equivalentes al 51 % de la población del país; y aproximadamente 5 millones de habitantes en 151 municipios localizados en zonas de amenaza sísmica baja, es decir el 14 % del total de la población según la última información suministrada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). En otras palabras, el 86 % de los colombianos se encuentran bajo un nivel de riesgo sísmico apreciable, que no solamente depende del grado de amenaza sísmica sino también del grado de vulnerabilidad que, en general, tienen las edificaciones en cada región (AIS, 1998).

7.4.3 Modelo estocástico

La ciudad de Manizales, a pesar de estar localizada en una zona de amenaza sísmica alta, no cuenta "desafortunadamente" con una cantidad suficiente de registros que permitan definir la acción sísmica para diferentes niveles de aceleración máxima y

contenidos frecuenciales que representen de forma adecuada las características del terreno. Por lo tanto, para superar estas limitaciones se ha desarrollado, a partir de la información existente en la zona, un modelo estocástico de la acción sísmica, para representar la demanda sísmica desde una óptica probabilista. A partir de este modelo, es posible generar un grupo de acelerogramas sintéticos, que se utilizan para el análisis dinámico no lineal de los edificios, mediante los cuales se generan las curvas de fragilidad. Adicionalmente, los espectros de respuesta de las señales simuladas, se utilizan para definir la demanda sísmica y evaluar el punto de desempeño para los principales edificios de HA de la ciudad.

Modelo evolutivo de densidad espectral

Los sismos son aleatorios en un doble sentido. De hecho, no solamente la ocurrencia es estocástica en el tiempo sino también la trayectoria espacial impone a sus ondas una forma altamente errática. Esto explica por qué, junto con otras acciones estructurales tales como el empuje del viento y las ondas del océano, ha habido un interés persistente en la ingeniería estructural en examinarlos desde un punto de vista estocástico a lo largo de los últimos decenios (Hurtado, 1999). Para considerar la naturaleza evolutiva de los sismos, entendiendo por esta expresión que tanto la amplitud como las frecuencias dominantes varían con el tiempo, Hurtado (1999) propone un modelo estocástico desarrollado a partir de información contenida en los registros de aceleraciones existentes en la ciudad de Manizales. Se ha elegido el modelo evolutivo de densidad espectral de potencia propuesto por Yeh y Wen (1990), por su facilidad de acoplamiento con las ecuaciones de la dinámica del sistema estructural, lo que facilita su uso en el campo de los métodos analíticos de vibraciones aleatorias. El modelo está definido por la siguiente ecuación:

$$F(\omega, t)^{YW} = \xi(t)^2 \frac{1}{\dot{\kappa}(t)} G\left(\frac{\omega}{\dot{\kappa}(t)}\right) \quad (7.1)$$

$F(\omega, t)^{YW}$ es la densidad espectral evolutiva de Yeh-Wen (YW), que depende de la frecuencia, ω , y del tiempo, t , $\xi(t)$ es una función de modulación de amplitudes, $\kappa(t)$ es una función que describe la evolución de las frecuencias dominantes del registro y $G(\cdot)$ una función de densidad espectral de potencia de un proceso estacionario de fondo. Puede observarse que en la ecuación (7.1), la división de ω por la derivada de la función de modulación de frecuencias $\dot{\kappa}(t)$ causa una modificación temporal de la densidad espectral, lo que confiere al modelo un carácter no estacionario en frecuencia, mientras que la no estacionaridad en amplitudes está dada por la función $\xi(t)$. Generalmente, estas funciones se estiman a partir de registros reales tomando como referencia algún modelo adecuado. En lo que respecta a la densidad espectral del proceso estacionario de fondo $G(\cdot)$, se decidió adoptar el modelo de Clough-Penzien dado por:

$$G(\omega)^{CP} = \frac{\omega^4}{(\omega_f^4 - \omega^2)^2 + 4\nu_f^2\omega_f^2\omega^2} \cdot \frac{\omega_g^4 + 4\nu_g^2\omega_g^2\omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\nu_g^2\omega_g^2\omega^2} \cdot G_W \quad (7.2)$$

G_W es la densidad espectral de potencia de un ruido blanco, ω_g y ν_g son la frecuencia y el amortiguamiento de un filtro que caracteriza básicamente al suelo regional (conocido como filtro de Kanai - Tajimi), mientras que ω_f y ν_f son los parámetros de un filtro paso-alta. Los valores más importantes y relevantes del modelo son ω_g y ν_g , ya que ω_f y ν_f sólo determinan la caída de la densidad espectral hacia cero en la zona de muy bajas frecuencias. Por su parte, G_W puede determinarse a partir de la aceleración máxima estimada de acuerdo a los estudios de sismicidad (Casciati y Faravelli, 1991).

Estimación de los parámetros del modelo

El modelo evolutivo utilizado en este trabajo está definido por tres parámetros fundamentales: 1) la frecuencia angular del estrato de suelo predominante, ω_g , 2) el coeficiente de amortiguamiento efectivo, ν_g , y, 3) la duración de la fase fuerte del movimiento, s_0 . Este último parámetro, se utiliza para el cálculo de la función de modulación de amplitudes $\xi(t)$. Para obtener los valores de estos tres parámetros, Hurtado utiliza 25 historias de aceleración, registradas cerca de la ciudad de Manizales (ver Tabla 7.3), las cuales corresponden, en gran parte, al perfil típico de los suelos de la ciudad, formado por limos arenosos de origen volcánico de gran espesor (Aguirre y Gutierrez, 1992).

Sismo No	Registros No	Epicentro	Fecha	Estación
1	1	La Tebaida	05.18.76	Banco del Comercio
2	2,3	Belalcázar	08.15.92	El Cable
	4,5	Belalcázar	08.15.92	Universidad Nacional
3	6,7	Murindó	10.17.92	El Cable
	8,9	Murindó	10.17.92	Universidad Nacional
4	10,11	Murindó	10.18.92	El Cable
5	12,13	Toribío	06.06.94	E.P.M
6	14,15	Tauramena	01.19.95	E.P.M
7	16,17	Calima	02.08.95	El Cable
	18,19	Calima	02.08.95	Confamiliares
	20,21	Calima	02.08.95	E.P.M
8	22,23	Risaralda	08.19.95	El Cable
	24,25	Risaralda	08.19.95	E.P.M

Tabla 7.3. Registros sísmicos en Manizales (Hurtado, 1999).

En la Figura 7.11 se muestra la historia de aceleración original de la componente EW del sismo de Belalcázar, el 15 de agosto de 1992, registrado en el sitio de "El Cable" en la ciudad de Manizales (Sismo No. 2 de la Tabla 7.3).

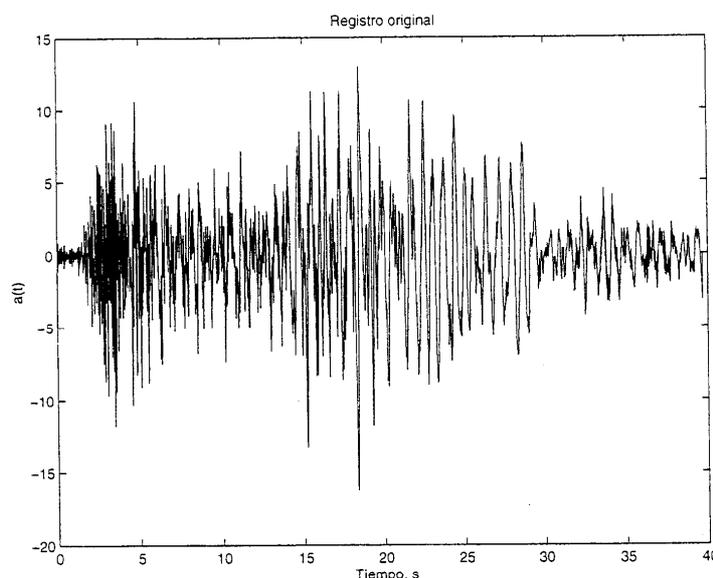


Figura 7.11. Acelerograma del sismo de Belalcázar, registrado en la estación "El cable" en Manizales [unidades: cm/s^2].

El procedimiento empleado para estimar los parámetros del modelo (ω_g , ν_g y s_0) se resume a continuación:

1. Cálculo de las funciones empíricas de modulación de amplitudes $\hat{\xi}(t)$ y de frecuencias $\hat{\kappa}(t)$. La primera se estima a partir de la energía del acelerograma y utilizando técnicas de identificación no lineal (Press et al., 1992), mientras que la segunda se calcula a partir del valor acumulado de cruces del acelerograma por el nivel cero.
2. Estabilización estacionaria del registro, es decir, cálculo de un registro estacionario equivalente obtenido al remover las tendencias no estacionarias en amplitud y frecuencia caracterizadas por $\hat{\xi}(t)$ y $\hat{\kappa}(t)$. Este proceso se realiza en dos fases. Inicialmente se estabiliza cada registro en amplitudes dividiéndolo por la función empírica $\hat{\xi}(t)$, esto es:

$$q_1(t) = \frac{a(t)}{\hat{\xi}(t)} \quad (7.3)$$

a continuación, la señal $q_1(t)$ se mapea sobre el eje del tiempo real desde el eje de tiempo ficticio construido por la función de modulación de frecuencias $\hat{\kappa}(t)$:

$$q(t) = q_1\left(\hat{\kappa}(t)\right) \quad (7.4)$$

3. Cálculo de las densidades espectrales de potencia de los registros estabilizados $q(t)$ como el promedio de las densidades de tres segmentos, de acuerdo con el método de Welch (Soong y Grigoriu, 1993). Para el cálculo se utilizó la ventana espectral de Hanning (Pollock, 1999).
4. Determinación de los parámetros del modelo espectral de Clough y Penzien. A los parámetros ω_f y ν_f se les asignaron unos valores fijos juzgados como adecuados por inspección de los periodogramas de los registros estabilizados $q(t)$, mientras que los parámetros (ω_g y ν_g) del filtro de Kanai-Tajimi se calcularon siguiendo el método de ajuste de los momentos espectrales (Lai, 1982; Faravelli, 1988), el cual consiste en el cálculo de los parámetros del modelo igualando los momentos espectrales de éste con los propios del periodograma. Lo anterior conduce a un sistema de ecuaciones no lineales en G_W , ω_g y ν_g , cuyo planteamiento se facilita por las expresiones explícitas obtenidas por Faravelli (1988). La solución de este sistema debe hacerse por medio de un algoritmo de estimación no lineal, En este caso se utilizó el método propuesto por Levenverg - Marquart (Press et al., 1992). Los parámetros obtenidos de los registros se muestran en la Tabla 7.4.
5. Cálculo de la duración de la fase fuerte s_0 para cada uno de los 25 registros a partir de la definición propuesta por Vanmarcke y Lai (1980):

$$s_0 = \left\{ \begin{array}{ll} 2 \ln \left(\frac{2s_0}{T_s} \right) \frac{E_\infty}{\max(a(t))}, & s_0 \geq 1.36T_s \\ 2 \frac{E_\infty}{\max(a(t))}, & s_0 < 1.36T_s \end{array} \right\}$$

T_s es el período dominante de las ondas en la fase fuerte y E_∞ es la energía del registro definida como:

$$E_\infty = \int_0^\infty a^2(t) dt \quad (7.5)$$

Los resultados se muestran igualmente en la Tabla 7.4. Sobre esta base se calcula la siguiente regresión entre la duración de la fase fuerte s_0 y la aceleración máxima del terreno PGA :

$$\ln s_0 = -0.0102 PGA + 3.1707 + \epsilon \quad (7.6)$$

En esta expresión ϵ es una variable aleatoria normal con media nula y desviación estándar igual a 0.287.

Registro No	s_0 (s)	PGA ($\frac{cm}{s^2}$)	ω_g ($\frac{rad}{s}$)	ν_g
1	9.73	48.60	8.85	0.150
2	12.04	16.30	16.34	0.247
3	20.24	16.25	17.49	0.262
4	14.31	16.29	13.93	0.250
5	13.33	14.88	15.55	0.233
6	21.34	6.22	10.92	0.093
7	21.36	6.75	10.86	0.135
8	22.17	6.34	10.17	0.093
9	22.85	5.86	9.11	0.119
10	30.70	14.83	12.09	0.145
11	32.99	13.92	11.03	0.149
12	21.46	9.44	8.83	0.052
13	29.93	5.90	9.24	0.069
14	20.34	12.30	9.11	0.077
15	13.16	19.99	9.32	0.086
16	16.53	26.42	13.66	0.191
17	20.46	38.02	13.48	0.184
18	25.34	22.98	11.23	0.133
19	14.10	28.53	11.31	0.122
20	12.94	55.86	9.01	0.136
21	25.46	35.38	9.53	0.110
22	16.14	51.58	17.03	0.229
23	11.91	46.78	18.93	0.231
24	19.30	35.26	13.22	0.181
25	24.46	34.06	12.16	0.178

Tabla 7.4. Valores de los parámetros del modelo estocástico (Hurtado, 1999).

Incertidumbre en los parámetros dinámicos Con base en los datos de ω_g y ν_g que aparecen en la Tabla 7.4, se obtiene los respectivos histogramas de frecuencia, a partir de los cuales es posible inferir una función de distribución de probabilidad adecuada para cada parámetro. Hurtado (1999) propone una distribución tipo Weibull (Figura 7.12 y ecuación (7.7)) para la frecuencia angular ω_g y una distribución Log-normal (Figura 7.13 y ecuación (7.8)) para el coeficiente de amortiguamiento efectivo ν_g , esto es:

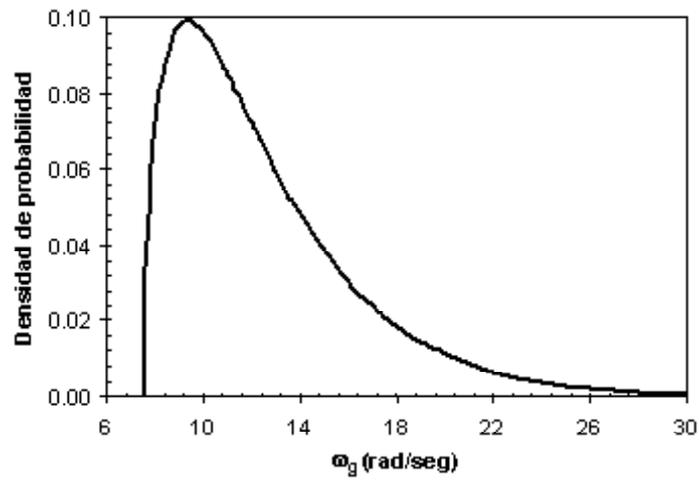


Figura 7.12. Modelo probabilista de la frecuencia ω_g de Kanai-Tajimi para la ciudad de Manizales (Hurtado, 1999) - Tipo Weibull.

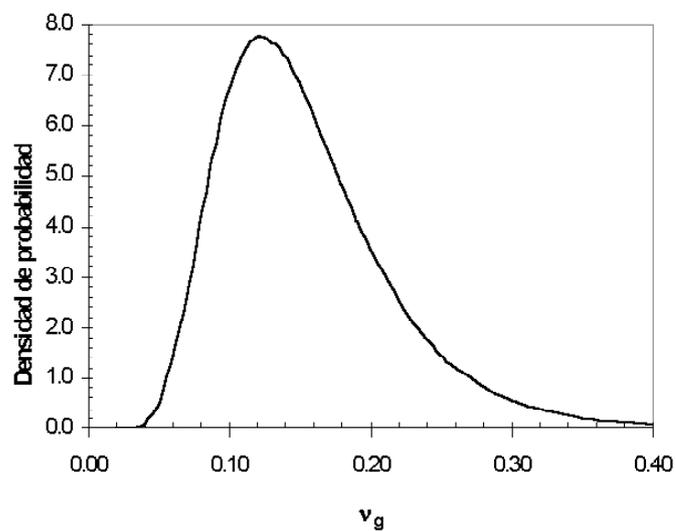


Figura 7.13. Modelo probabilista del amortiguamiento ν_g de Kanai - Tajimi para la ciudad de Manizales (Hurtado, 1999) - Tipo Lognormal.

$$f(\omega_g) = \frac{1.55}{5.1} \left(\frac{\omega_g - 7.5}{5.1} \right)^{0.55} \exp \left[- \left(\frac{\omega_g - 7.5}{5.1} \right)^{1.55} \right] \quad (7.7)$$

$$f(\nu_g) = \frac{1}{0.3865\sqrt{2\pi\nu_g}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \nu_g + 1.9442}{0.3865} \right)^2 \right] \quad (7.8)$$

Función de modulación de amplitudes $\xi(t)$

Se trata de una función determinista $\xi(t)$ que da al registro un carácter no estacionario en amplitud. En este aspecto es de gran importancia modelar adecuadamente la duración de la fase de la señal en que tiende a comportarse como estacionaria y que corresponde a las máximas aceleraciones. En el caso de Manizales, se dispone de la ecuación (7.6) que permite obtener a partir de la aceleración máxima PGA , el valor de la duración de la fase estacionaria en roca s_0 . Considerando el uso de este parámetro, es importante emplear una función de modulación de amplitudes en la que se tenga una fase plana que deje libre el acelerograma de tomar una forma estacionaria en ella. Una función así fue propuesta Amin y Ang (1960) y está dada por la siguiente ecuación:

$$\xi(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_1} & t \leq t_1; \\ 1 & t_1 \leq t \leq t_2; \\ e^{-c(t-t_2)} & t_2 \leq t. \end{cases} \quad (7.9)$$

c es un parámetro mayor que cero, t_1 corresponde aproximadamente al tiempo de llegada de las ondas de corte ($t_1 = t_s$) y la diferencia $t_2 - t_1$ es la duración de la fase fuerte s_0 , que corresponde a la duración de la fase estacionaria del movimiento. Se adoptó un valor de $c = 0.18$, ampliamente usado en la literatura internacional y t_1 igual a 5 s para sismos con distancias epicentrales menores de 55 km y 10 para el caso contrario. El valor de t_2 depende del valor generado de la variable aleatoria s_0 . La Figura 7.14 muestra la forma de este tipo de función.

Función de modulación de frecuencias $\kappa(t)$

Como se dijo al inicio de esta sección, es importante considerar la evolución natural de las frecuencias para que los acelerogramas simulados presenten un aspecto realista. Esto se debe a que los fenómenos de respuesta no lineal de suelos y estructuras son muy sensibles a dicha evolución. En el caso de las bajas frecuencias, éstas tienden a presentarse al final de los sismogramas, justamente cuando se ha dado una degradación de las propiedades iniciales del material que han alargado su período. Por tanto, si se omite la evolución frecuencial en la simulación de acelerogramas, no se detecta la susceptibilidad del sistema a la temporalidad del arribo de

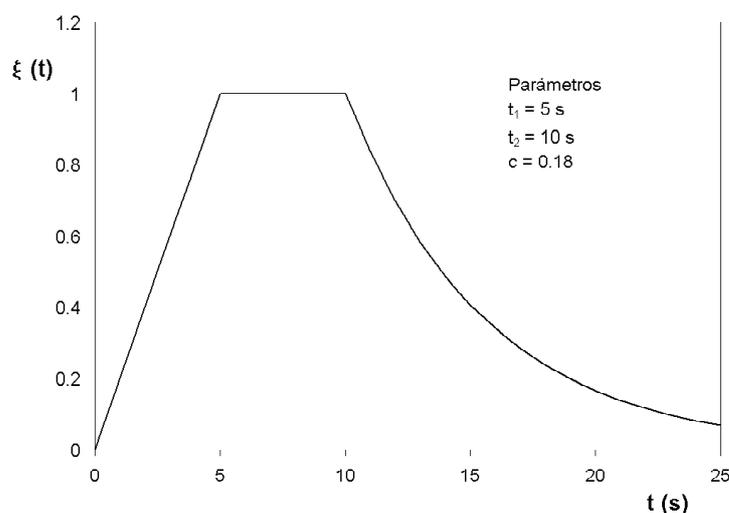


Figura 7.14. Función de modulación de amplitudes de Amin y Ang (1966).

las ondas sísmicas (Yeh, 1989; Hurtado, 1998). Por lo tanto, para representar la evolución de frecuencias de los acelerogramas sintéticos, esto es; el número de ceros de la señal desde el inicio del registro hasta el tiempo t , se utiliza en este caso la función continua y estrictamente creciente $\kappa(t)$ propuesta por Yeh y Wen (1990):

$$\kappa(t) = \frac{\eta(t)}{\dot{\eta}(t_s)} \quad (7.10)$$

$\eta(t)$ es una función polinomial del tiempo ajustada a la función real de cruces por cero (ver Figura 7.15) definida como:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^M r_i t^i \quad (7.11)$$

M es el orden del polinomio y r_i son los coeficientes del polinomio ajustado. El tiempo t_s es el comienzo de la fase fuerte del movimiento y se puede estimar por simple inspección en la función de energía del registro, ya que corresponde al primer punto de inflexión.

A diferencia de la variación no estacionaria de amplitudes, la variación de frecuencias no ha sido estudiada a fondo de manera estadística, salvo en algunos países como Japón (Kameda y Nojima 1988). Ante la carencia de información instrumental abundante en la región, se ha optado por utilizar una función de modulación de frecuencias cuyos parámetros corresponden a los valores ajustados para el sismo del Quindío (Colombia), esto es: $r_1 = 10.9787$, $r_2 = -5.1611 \cdot 10^{-2}$, $r_3 = 1.3546 \cdot 10^{-4}$ y $\dot{\eta}(t_s) = 10.0730$.

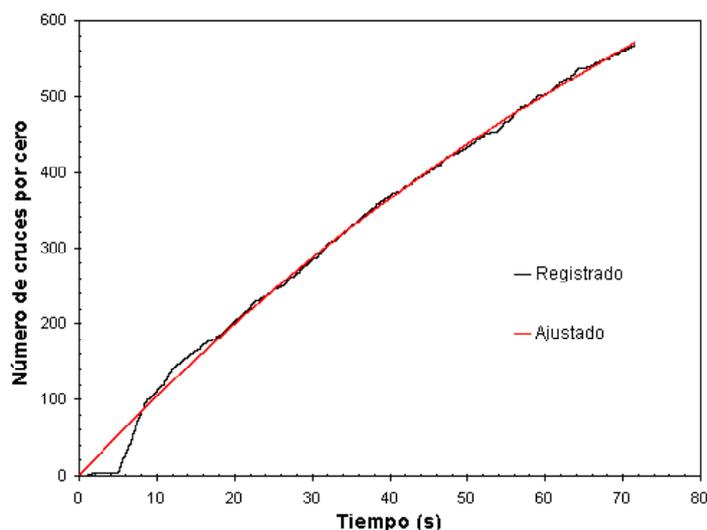


Figura 7.15. Función de modulación de frecuencias $\kappa(t)$ para el sismo del Quindío - Colombia (Bonnett et al., 2002).

Generación de acelerogramas sintéticos

Con el fin de utilizar el modelo evolutivo definido para generar acelerogramas sintéticos consistentes con la amenaza sísmica de Manizales, se hace necesario examinar la relación existente entre los valores de s_0 , ω_g y ν_g y la aceleración máxima, PGA , debido a que la amenaza se encuentra definida para todo el territorio Colombiano en términos de este parámetro.

La Figura 7.16 muestra la relación entre la duración de la fase fuerte del movimiento s_0 y la aceleración máxima PGA de los registros de Manizales y de algunos datos de la costa Oeste Norteamericana evaluados por Lai (1982). Puede observarse que los datos de Manizales muestran la misma tendencia a una correlación negativa de s_0 con respecto a a_{\max} , lo cual se explica principalmente por el hecho que la duración crece con la distancia epicentral contrario a la aceleración máxima. Así mismo puede verse que la dispersión de los datos de Manizales, en el pequeño rango de aceleraciones que ha sido posible registrar hasta el momento, es muy inferior a la dispersión de los datos usados por Lai (1982), lo que probablemente se debe a la mayor homogeneidad de la muestra. Lo anterior, deja clara la necesidad de utilizar información de la zona de interés para estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico.

De otra parte, las Figuras 7.17 y 7.18 muestran que no existe ninguna tendencia definida de ω_g y ν_g a crecer o disminuir con la aceleración máxima, lo cual hace que, a efectos prácticos, puedan ser consideradas como propiedades estocásticas de los suelos bajo estudio, modeladas por las ecuaciones (7.7) y (7.8). Para estudios de vulnerabilidad y riesgo, en los cuales es necesario generar acelerogramas artificiales para un rango amplio de aceleraciones máximas, esta independencia de los paráme-

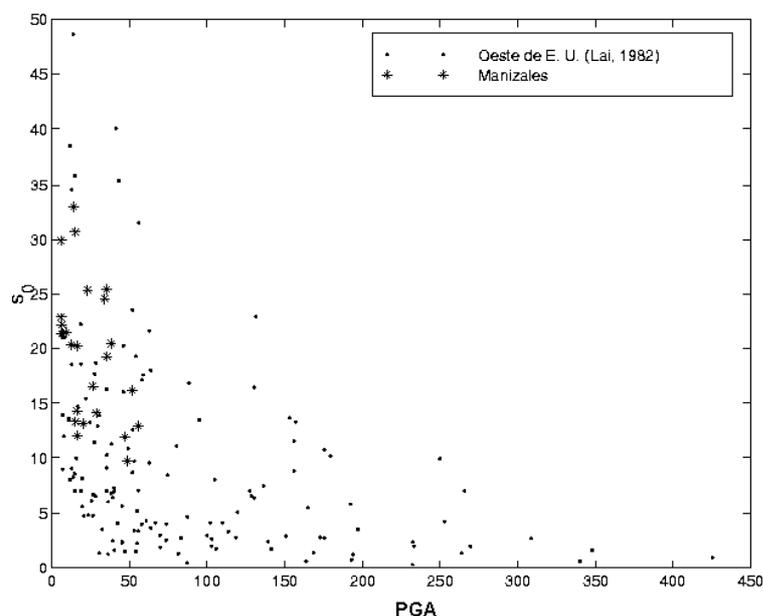


Figura 7.16. Relación la aceleración máxima PGA y la duración de la fase fuerte s_0 [unidades: cm/s^2 , s] (Hurtado, 1999).

tros espectrales del nivel de aceleración sísmica, permite generar las señales a partir de una misma densidad espectral caracterizada por los parámetros aleatorios. En consecuencia, el proceso de generación de acelerogramas sintéticos propuesto para la ciudad, a partir del modelo estocástico es el siguiente:

1. Definición de la aceleración máxima del registro (PGA).
2. Generación de una duración aleatoria de la fase fuerte s_0 , teniendo en cuenta que el parámetro ϵ en la ecuación (7.6) es aleatorio.
3. Generación de valores aleatorios de los parámetros ω_g y ν_g a partir de sus funciones de distribución (ecuaciones 7.7 y 7.8).
4. Definición de los parámetros de las funciones de modulación de amplitudes $\xi(t)$ y de frecuencias $\kappa(t)$.
5. Generación de un ruido blanco G_W con una duración igual a la del evento y aplicación de la función de modulación de Amin y Ang (ecuación 7.9).
6. Simulación del acelerograma por medio de la dinámica del filtro variable de Clough-Penzien (ver Anexo A.3), esto es:

$$M^{CP} = \frac{2\nu_f\omega_f}{\dot{\kappa}}\dot{U}_f + \omega_f^2 U_f + \frac{2\nu_g\omega_g}{\dot{\kappa}}\dot{U}_g + \omega_g^2 U_g \quad (7.12)$$

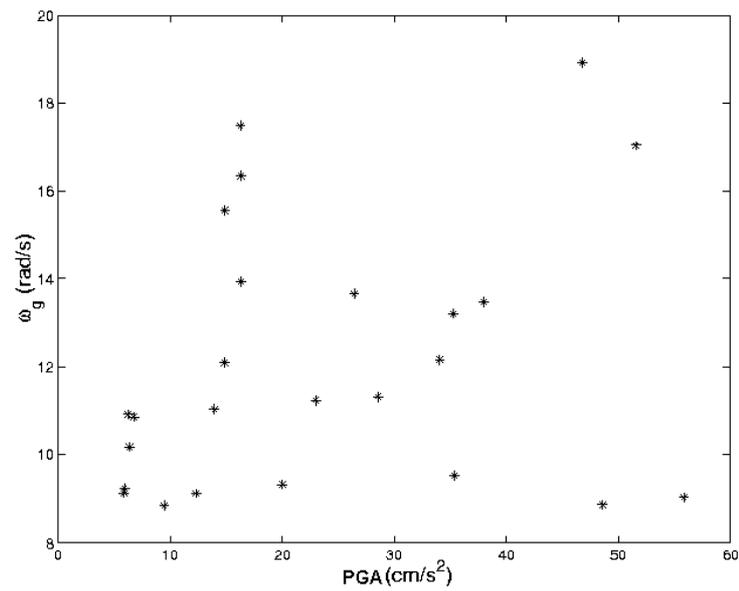


Figura 7.17. Relación entre la aceleración máxima PGA y la frecuencias ω_g del estrato de suelo predominante (Hurtado, 1999).

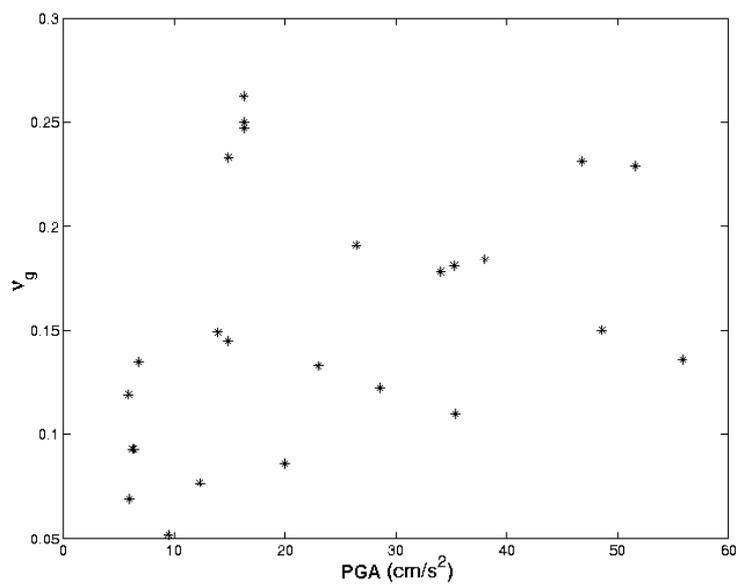


Figura 7.18. Relación entre la aceleración máxima PGA y el amortiguamiento del suelo ν_g (Hurtado, 1999).

donde U_f y U_g son las soluciones de los filtros de Kanai-Tajimi y de Clough-Penzien respectivamente, las cuales incluyen el carácter evolutivo del modelo, tal y como puede verse en el apéndice C.

La Figura 7.19 muestra un acelerograma sintético generado a partir de éste procedimiento para una aceleración máxima del terreno igual a 0.25 g.

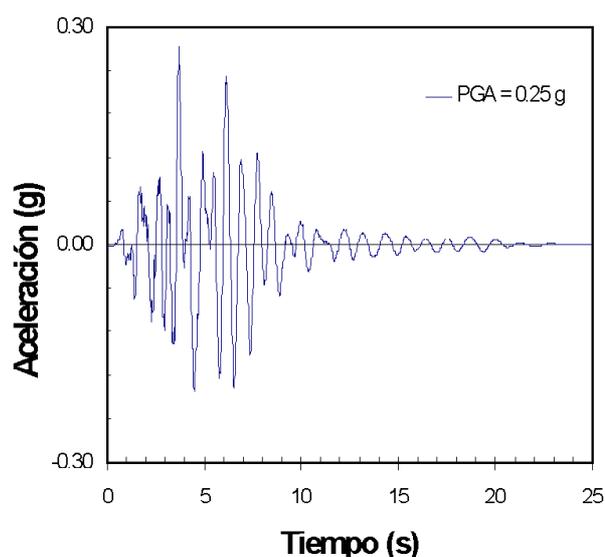


Figura 7.19. Acelerograma sintético generado a partir del modelo estocástico desarrollado para la ciudad de Manizales - PGA = 0.25 g.

Para la implementación de este proceso de generación de acelerogramas sintéticos, se ha desarrollado un programa de ordenador (YEHWEN) en FORTRAN 90. La Figura 7.20 muestra su diagrama del flujo.

Validación de los acelerogramas

Una inquietud importante cuando se utilizan acelerogramas sintéticos para evaluar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras de una zona, concierne a la validez de estos registros, medida con referencia a los datos instrumentales en sismos reales. Para el caso de la ciudad de Manizales, el informe final de la modelación probabilista en la zonificación sísmica (IDEA, 2002), incluye un procedimiento para validar los acelerogramas sintéticos utilizados. El procedimiento puede ser resumido de la siguiente manera:

- Simulación de un grupo de acelerogramas en roca en perfiles cercanos a los lugares donde están ubicados los acelerómetros.

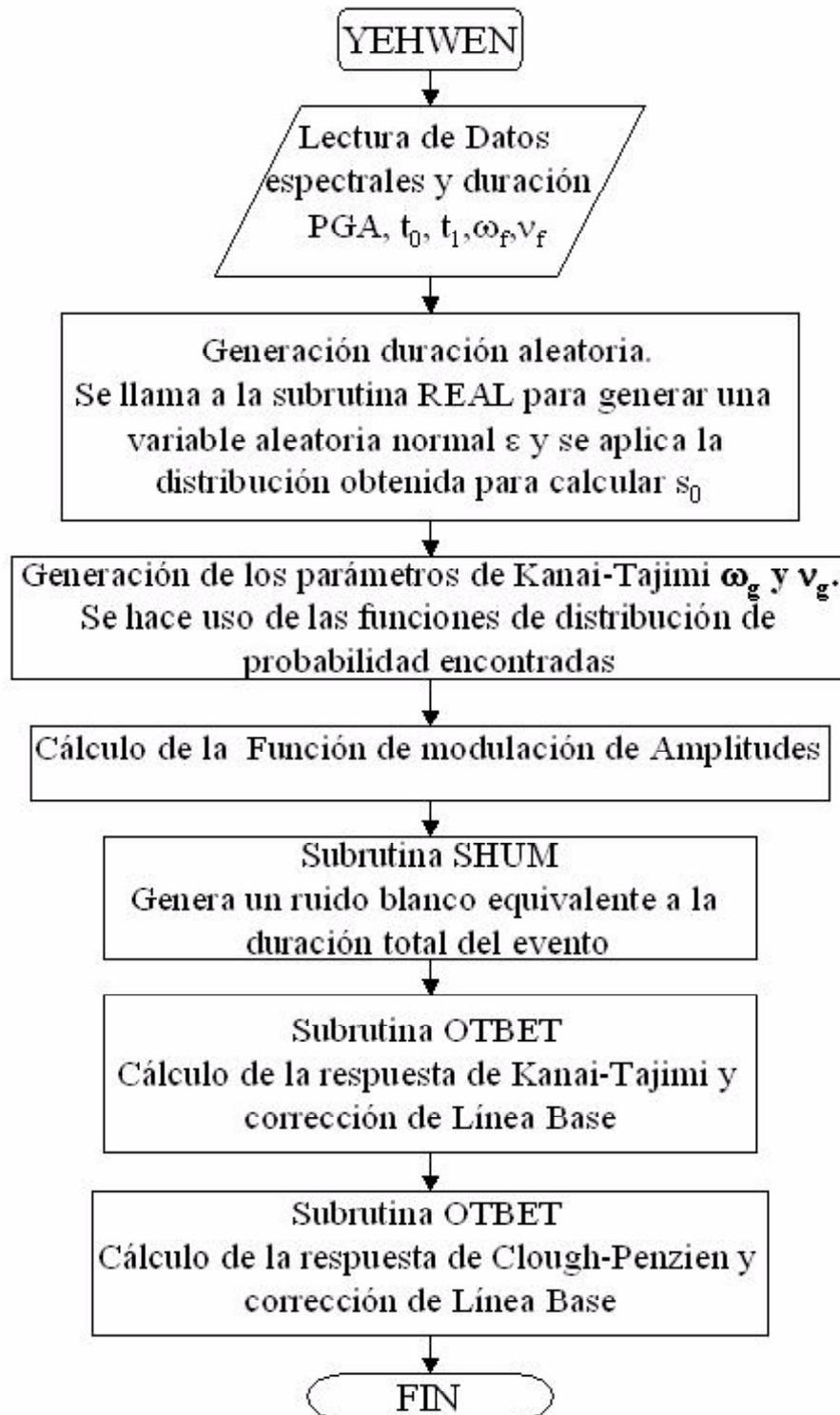


Figura 7.20. Diagrama de flujo del programa YEHWEN utilizado para la generación de acelerogramas sintéticos.

- Obtención de características de los acelerogramas en superficie que presenten cierta independencia con respecto a la aceleración máxima (como por ejemplo los parámetros ω_g y ν_g), lo que hace posible comparar registros con aceleraciones bajas y altas.
- Comparación estadística por medio de técnicas de análisis multivariante, tal como la distancia de Mahalanobis y sus correspondientes pruebas (Rencher, 1995).

Este procedimiento se aplicó a la ciudad de Manizales de la siguiente forma: se generó una población de 20 acelerogramas en roca, correspondientes a las fuentes de Romeral y Benioff, que son dos de las fuentes de mayor frecuencia de afectación sísmica de la ciudad. Se sometieron a estos acelerogramas los perfiles más próximos a dos acelerómetros en los cuales se han registrado múltiples eventos en la ciudad y se extrajeron los parámetros ω_g y ν_g mediante las técnicas espectrales descritas en la sección anterior. Se compararon los valores de estos parámetros para los acelerogramas registrados y los generados y, se llegó a la conclusión que pertenecen a la misma distribución bimodal que aparece en la Figura 7.21, lo cual se refleja en que la distancia de Mahalanobis entre las dos nubes no representa diferencias significativas entre ambos conjuntos. Por tanto pueden darse por válidos los acelerogramas generados a partir del modelo estocástico desarrollado para Manizales.

7.5 Demanda sísmica

Así pues, para representar la demanda sísmica en la ciudad de Manizales, se utilizan: 1) los espectros de diseño propuestos en las dos normativas colombianas (CCCSR-84 y NSR-98) y 2) los espectros de respuesta de los acelerogramas sintéticos generados a partir del modelo estocástico desarrollado por Hurtado (1999). Este segundo modelo, constituye una forma mucho más realista de representar la demanda sísmica, debido a que, como se describirá más adelante, la forma suavizada de los espectros de diseño, es poco realista.

7.5.1 Espectros elásticos de diseño de las normativas Colombianas

a) Espectro CCCSR-84

La forma del espectro elástico de aceleraciones para un coeficiente de amortiguamiento crítico del cinco por ciento (5 %) utilizada para el diseño de estructuras de acuerdo al primer Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes CCCSR-84, se define por medio de la siguiente expresión:

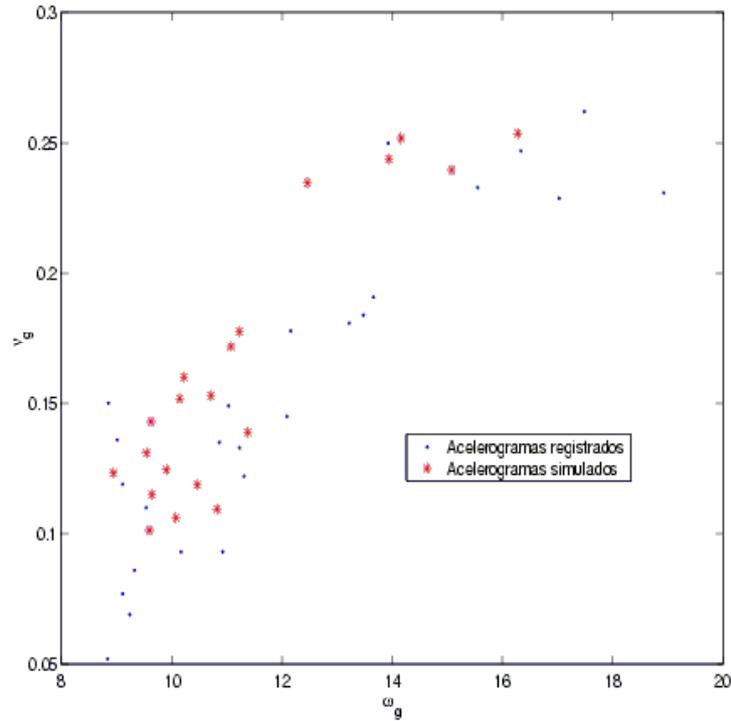


Figura 7.21. Validación de los acelerogramas sintéticos generados para la ciudad de Manizales (IDEA, 2002).

$$S_a = \left\{ \begin{array}{ll} 2.5 A_a I & T \leq T_C \\ \frac{1.2 A_v S I}{T^d} & T_C < T \leq T_L \\ \frac{A_a I}{2} & T \geq T_L \end{array} \right\} \quad (7.13)$$

A_a y A_v son la aceleración y velocidad pico efectiva respectivamente, I es el coeficiente de importancia que modifica el espectro de acuerdo al grupo de uso de la edificación (ver Tabla 7.5), S es el coeficiente de sitio que tiene en cuenta los efectos locales (ver Tabla 7.6), d es el coeficiente que controla la caída en la zona de velocidad constante, que en este caso se toma igual a $2/3$, T_C es el período de transición entre la zona de aceleración constante y la de velocidad constante (ecuación 7.14) y T_L es el período correspondiente a la zona de aceleración constante para períodos largos (ecuación 7.15).

$$T_C = 0.4 S \quad (7.14)$$

$$T_L = 2.4 S \quad (7.15)$$

Coefficiente de Importancia El coeficiente de importancia I se define para los tres grupos (I, II y III) propuestos por el CCCSR-84 de acuerdo al uso de la estructura (ver Tabla 7.5). A continuación se presenta una descripción de estos grupos.

- *Grupo III*: este grupo incluye todas las construcciones que son esenciales para atender emergencias y preservar la salud y la seguridad de las personas después de un sismo. Este grupo incluye hospitales, centros de salud, estaciones de bomberos, estaciones de policía, centrales telefónicas, construcciones de acueductos, etc.
- *Grupo II*: cualquier construcción donde puedan vivir más de 200 personas, estadios donde puedan estar al mismo tiempo más de 2000 personas, escuelas, universidades y tiendas con más de 500 metros cuadrados en planta y todas aquellas estructuras donde los ocupantes estén restringidos de moverse o donde pueda producirse pánico en general.
- *Grupo I*: todas las construcciones contempladas en el CCCSR-84 que no estén incluidas en los grupos II y III.

Grupo de uso	Coefficiente de Importancia, I
III	1.2
II	1.1
I	1.0

Tabla 7.5. Valores del coeficiente de importancia, I (CCCSR-84).

Coefficientes de sitio Los efectos locales de la respuesta sísmica de las construcciones se evalúan por medio del coeficiente de sitio S , el cual depende del tipo de perfil del suelo (ver Tabla 7.6). La norma establece tres tipos, los cuales se describen a continuación.

- *Perfil S1*: rocas de cualquier característica que tienen una velocidad de ondas de corte mayor o igual que 750 m/s o perfiles compuestos de suelos duros con profundidades menores de 60 metros, los cuales están constituidos por depósitos estables de arena, gravas o arcillas duras.
- *Perfil S2*: suelos donde hay mas de 60 metros de depósitos estables de arcillas duras y suelos no cohesivos entre la superficie y el nivel de roca.
- *Perfil S3*: suelos donde hay más de 10 metros de depósitos de arcillas cuya dureza varía entre media y blanda, con o sin arenas u otro estrato de suelo no cohesivo.

Tipo de perfil de suelo	Coefficiente de sitio, S
S1	1.0
S2	1.2
S3	1.5

Tabla 7.6. Valores del coeficiente de suelo, S (CCCSR-84).

b) Espectro NSR-98

Con la aparición de la actual normativa sismorresistente NSR-98 se incluyen los siguientes cambios en la definición del espectro elástico de respuesta:

- Definición de un nuevo suelo S_4 , el cual corresponde a un suelo donde los depósitos existentes entre la roca y la superficie tienen más de 12 m de arcillas blandas, caracterizadas por una velocidad de la onda cortante menor de 150 m/s .
- Incorporación de un nuevo grupo de uso de las estructuras (IV) al cual se le ha asignado un factor de importancia I igual a 1.3.
- Cambio en la expresión que controla la forma del espectro elástico para la zona con velocidad espectral constante, esto es:

$$S_a = \frac{1.2 A_a S I}{T^d} \quad T_C < T \leq T_L \quad (7.16)$$

- Cambio de la expresión que definen el período T_C que controlan la transición de la zona de aceleración constante a velocidad constante:

$$T_C = 0.48 S \quad (7.17)$$

Para definir el espectro elástico de la ciudad de Manizales de acuerdo a las dos normativas mencionadas, se han tomado los siguientes valores:

- $A_a = 0.25g$ de acuerdo al mapa de amenaza sísmica (ver Figura 7.10)
- $I = 1.0$ por tratarse de estructuras de ocupación normal (Grupo I).
- $S = 1.5$ que corresponde a un perfil S_3 .
- $T_L = 3.6 s$ de acuerdo a la ecuación 7.15.
- $T_C = \left\{ \begin{array}{ll} 0.6 s & \text{CCCSR-84} \\ 0.72 s & \text{NSR-98} \end{array} \right\}$

$$\bullet d = \left\{ \begin{array}{ll} 2/3 & \text{CCCSR-84} \\ 1.0 & \text{NSR-98} \end{array} \right\}$$

La Figura 7.22 muestra la forma del espectro elástico de diseño de las dos normativas (CCCSR-84 y NSR-98).

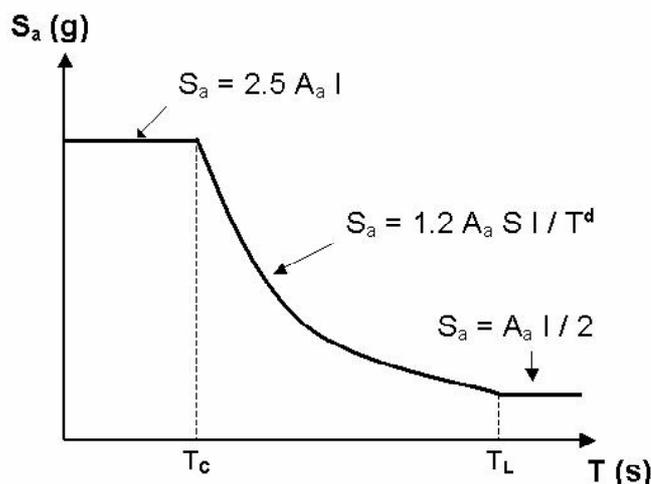


Figura 7.22. Forma de los espectros elásticos de diseño propuestos por las normativas Colombianas (CCCSR-84 y NSR-98).

La nueva versión del método N2, utiliza la representación gráfica del nivel de desempeño sísmico de una estructura, para lo cual, se requiere que el espectro elástico de respuesta esté en formato AD (Aceleración vs Desplazamiento espectral). Aplicando las expresiones desarrolladas en la sección 3.7, se obtienen los espectros de demanda en este formato para las dos normativas (ver Figura 7.23).

7.5.2 Modelo estocástico

La demanda sísmica para la ciudad de Manizales, puede definirse a partir del modelo estocástico presentado en la sección 6.4.3. Tomando el valor esperado de la aceleración máxima del terreno, esto es, $PGA = 0.25 g$, se calculan los espectros de respuesta elásticos (amortiguamiento del 5 %) de los 100 acelerogramas sintéticos, los cuales representan la demanda sísmica y consideran el carácter evolutivo, las incertidumbres en los principales parámetros y la aleatoriedad propia de la acción sísmica. La Figura 7.24 muestra los espectros de respuesta de estos acelerogramas y los espectros propuestos por el CCCSR-84, la NSR-98. Adicionalmente, se superpone en esta figura, el espectro de respuesta propuesto en el estudio de zonificación sísmica de la ciudad de Manizales (CIMOC y CEDERI, 2002), para la zona más representativa de los suelos de la ciudad, denominada "zona A".

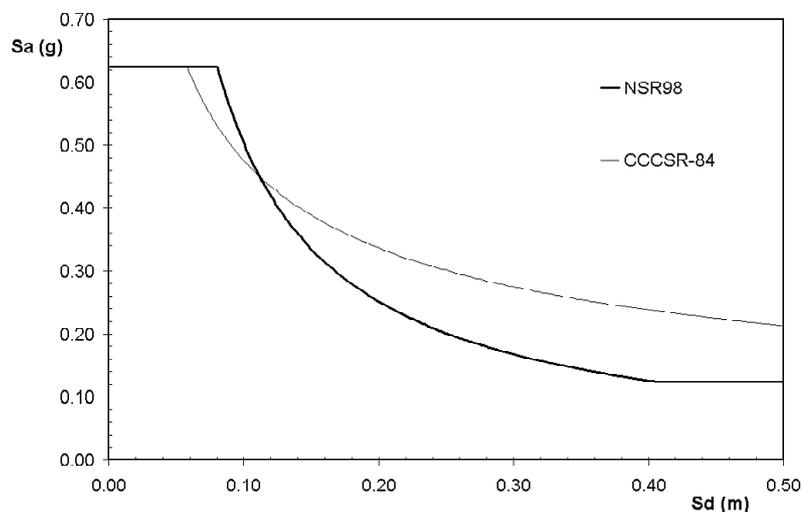


Figura 7.23. Espectros de las normativas Colombianas de diseño en formato AD, calculados para un suelo tipo S_3 y edificios del grupo I.

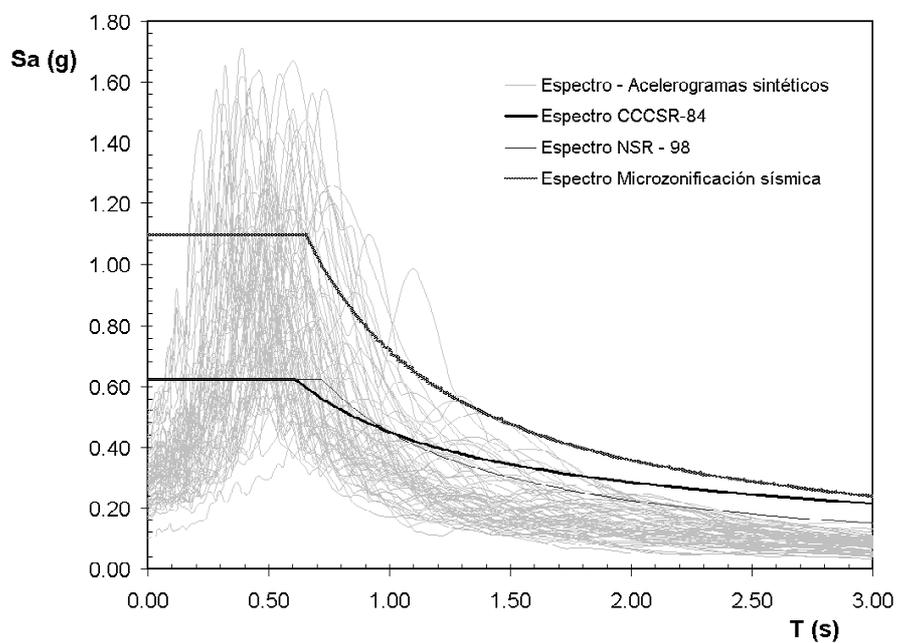


Figura 7.24. Espectros elásticos de respuesta de los acelerogramas sintéticos y espectros de diseño de las normativas Colombianas.

Puede verse cómo las señales generadas a partir del modelo estocástico difieren considerablemente de los espectros propuestos por las normativas, sin embargo, son bastante consistentes con el espectro propuesto en el estudio de microzonificación sísmica.

7.6 Resumen y discusión

La ciudad de Manizales se encuentra localizada en una zona de alta sismicidad. Su densidad de población y su cercanía a un número considerable de fallas tectónicas, hacen que esta zona tenga un interés especial en evaluar el riesgo sísmico existente. Manizales hace parte de la zona denominada "Eje Cafetero", la cual, se ha visto seriamente afectada por numerosos fenómenos naturales, entre los que se destacan: la erupción del volcán nevado del Ruíz, el 13 de Noviembre de 1985, la cual provocó la desaparición de una población entera (Armero) y dejó un saldo estimado de 23.000 víctimas mortales y 200.000 afectadas y, el sismo de Quindío, el 25 de enero de 1999, que causó la destrucción de varios barrios de la ciudad de Armenia y dejó como resultado un total de 1230 víctimas mortales.

En general, el territorio Colombiano se encuentra localizado en un ambiente tectónico bastante complejo, debido a que en su territorio convergen tres placas tectónicas: la placa de Nazca, la placa Suramericana y la placa del Caribe. El eje cafetero se encuentra precisamente dentro de la zona sísmicamente más activa. Las fuentes de actividad sísmica en este caso, se deben en primer lugar, a una zona de subducción en el océano pacífico, causada por el doblamiento de la placa de Nazca cuando subduce bajo la placa Suramericana y, en segundo lugar, a un gran número de fallas geológicas sísmicamente activas, donde algunas de ellas pasan muy cerca de las principales ciudades de la zona, como es el caso de la falla de Romeral, cuya traza pasa a pocos kilómetros de la ciudad de Manizales. Los sismos provenientes de estos dos tipos de fuentes sísmicas, han ocasionado daños cuantiosos y un número considerable de víctimas mortales en toda la región.

A pesar de estar situada en una zona de sismicidad alta, Manizales no dispone ni de un número suficiente de registros, ni de los niveles máximos de aceleración requeridos para el análisis de la respuesta de edificios ante este tipo de acciones. Por lo tanto, Hurtado (1999) propone un modelo estocástico de la acción sísmica, desarrollado a partir de 25 historias temporales de aceleración registradas en la zona. Este modelo considera la naturaleza evolutiva de los sismos tanto en amplitud como en contenido frecuencial, por medio de funciones de modulación de amplitudes y de frecuencias, respectivamente. El modelo estocástico permite generar acelerogramas sintéticos que incorporan las características de los sismos anteriores registrados en la zona y adicionalmente, cubren diferentes rangos de niveles de aceleración máxima y contenido frecuencial, que son necesarios para analizar la respuesta no lineal de edificios. La validez de estos registros, se verifica a partir de los resultados obtenidos

mediante el estudio de zonificación sísmica de la ciudad de Manizales (IDEA, 2002).

Así pues, para representar la demanda sísmica en Manizales, se utilizan: 1) los espectros elásticos de diseño propuestos en las normativas Colombianas de diseño sismorresistente (CCCSR-84 y NSR-98) para una $PGA = 0.25 g$ y, 2) los espectros de respuesta de los acelerogramas sintéticos generados a partir del modelo estocástico.

Comparando los espectros de respuesta de diseño (suavizados) de las dos normativas Colombianas (CCCSR-84 y NSR-98) y, los espectros de respuesta de los acelerogramas sintéticos generados a partir del modelo estocástico, se puede concluir que existen diferencias considerables en los valores máximos de aceleración espectral. Sin embargo, si se comparan con el espectro de respuesta propuesto en el estudio de microzonificación sísmica, estas diferencias son mucho menores, lo cual pone en evidencia, la calidad de la información utilizada para definir los espectros suavizados de las normativas de diseño. Adicionalmente, para efectos de análisis no lineal de edificios, como se verá en el capítulo 9, la forma del espectro influye drásticamente en la determinación de la respuesta de las estructuras y en especial, en la cuantificación del daño. Por lo tanto, para estudios de vulnerabilidad y riesgo sísmico, es preferible contar con un grupo de acelerogramas que cubran un amplio rango de aceleraciones y contenido frecuencial, pero que conserven la forma "realista", no suavizada, de los espectros de respuesta de sismos reales, para no subestimar o sobreestimar la respuesta de la estructura.

