

CAPITULO 3

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTAFÉ DE BOGOTÁ

La microzonificación sísmica de una ciudad consiste en establecer zonas de comportamiento geomecánico esperado similar; de manera que puedan establecerse allí recomendaciones específicas para el diseño y construcción de edificaciones. En varios terremotos recientes se ha demostrado que los efectos de un evento dado sobre las construcciones existentes en la zona dependen fundamentalmente de la respuesta de sitio que se obtenga, la cual a su vez depende de las características topográficas y geotécnicas existentes (Seed et al, 1969).

De esta manera en las zonas montañosas es de esperarse amplificaciones de los movimientos sísmicos dependiendo de las características topográficas locales del sitio bajo estudio. Las consecuencias más importantes en este tipo de configuración son las fallas de taludes, avalanchas o similares, además de la natural amplificación de aceleraciones máximas por efectos topográficos. Por otro lado, en los sitios donde la topografía es plana y donde se presentan depósitos de suelo relativamente blandos, predomina la posibilidad de resonancia entre el depósito y la señal de entrada, obteniéndose como resultado grandes amplificaciones del movimiento; esta señal se registra en especial en rangos específicos de contenidos frecuenciales que dependen de las características mismas del depósito y del movimiento de entrada. Cuando el depósito está formado principalmente por materiales arenosos, en especial cuando se trata de arenas limpias ubicadas cerca a la superficie (menos de 15 m) con niveles freáticos cercanos a la superficie, existen posibilidades que se presente el fenómeno llamado licuación, en el cual el suelo pierde toda capacidad de soporte por un aumento considerable en la presión de poros. De esta manera la zona que se vea afectada por este fenómeno presentará altas deformaciones superficiales con fallas generalizadas del terreno, edificaciones hundidas o con grandes asentamientos diferenciales y grandes asentamientos en el terreno con posible presencia de volcanes de arena.

Cualquier ciudad o zona de interés puede subdividirse en subzonas donde se espera un comportamiento sísmico similar, con base en el cual se establecen requisitos mínimos de diseño sismoresistente. Para cada una de ellas, además de especificarse el nivel de fuerza

sísmica que puede esperarse para efectos de adelantar el diseño de las estructuras que se construyan, deben identificarse los tipos de fenómenos asociados que pueden esperarse como son una eventual falla de un talud, la amplificación desmesurada en las aceleraciones de respuesta, la posibilidad de resonancia en un rango específico de períodos o la posibilidad de licuación de un depósito dado de suelo.

En la delimitación de zonas con comportamiento sísmico similar deben quedar definidas claramente las zonas que conforman las rondas de los ríos, las zonas inundables, la ubicación de zonas especiales de reserva como son humedales, pantanos y lagos, las zonas de rellenos, y en términos generales cualquier zona que implique una restricción especial en cuanto a su uso futuro.

Con base en un mapa de microzonificación sísmica, una ciudad puede adelantar la planificación de su desarrollo hacia el futuro teniendo en cuenta las restricciones a los tipos de construcción y los parámetros de diseño definidos para las diferentes zonas de la ciudad.

Adicionalmente a lo anterior, la microzonificación sísmica puede utilizarse para estudiar posibles escenarios de daños durante sismos futuros esperados tanto sobre edificaciones como sobre líneas vitales y en general para evaluar los efectos sobre la infraestructura existente en la ciudad.

El presente capítulo representa el corazón del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad, ya que se sintetiza la información geológica, sismológica, neotectónica, geofísica, geotécnica y de amenaza sísmica regional y local.

Utilizando como base los anteriores estudios y considerando la información de sismos recientes de magnitud intermedia se plantea un mapa de microzonificación sísmica de la ciudad. En primer lugar se establece un mapa con curvas de igual período predominante de vibración determinado con base en un buen número de mediciones de microtemores estratégicamente distribuidos en la ciudad y que sirve de base para realizar una primera aproximación a un mapa de zonas de respuesta sísmica esperada similar.



En seguida se utiliza la información sísmica existente y registrada en los acelerógrafos de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia para comprender algunos aspectos básicos de la sismicidad regional de la zona bajo estudio y para realizar una calibración general de los modelos de respuesta unidimensional que se utilizarán en la respuesta dinámica de los diferentes depósitos.

Posteriormente se estudia la respuesta dinámica de las diferentes estratigrafías típicas según la información geotécnica existente utilizando los modelos unidimensionales de propagación de onda. Con base en esto se determinan las zonas de respuesta sísmica similar en la parte plana de la ciudad.

En el siguiente numeral se estudia la respuesta dinámica considerando efectos bidimensionales de elementos finitos para una sección típica del depósito de oriente a occidente en la zona norte de la ciudad, entre los cerros orientales y los cerros de Suba.

En forma complementaria se estudia la estabilidad de los taludes en los cerros orientales de la ciudad, ante el efecto sísmico, principalmente para establecer una zonificación de acuerdo con el riesgo esperado.

Finalmente, se establece la microzonificación sísmica de la zona bajo estudio incluyendo tanto la parte plana como la parte correspondiente a la zona montañosa, así como, las recomendaciones para estudios futuros que se realicen con objetivos de complementar y mejorar la información presentada.

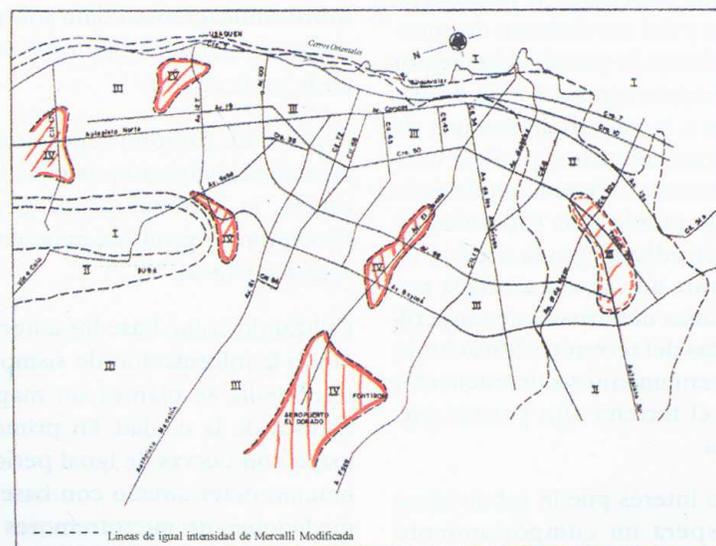
Por otra parte, según la información histórica existente son absolutamente claros los efectos de sitio por cuanto se asegura que los movimientos de 1917 y de 1928 se sintieron más fuertemente en barrios como Chapinero

y Liévano que en zonas centrales. Por otro lado son evidentes los daños recurrentes en las catedrales de Monserrate y Guadalupe que han sido destruidas en cada uno de los sismos históricos con intensidades reportadas de VIII (1785, 1827, 1917) y en uno de los sismos con intensidad reportada de VII (1743).

En años recientes han ocurrido sismos en diferentes zonas del país que han tenido implicaciones de consideración en Santafé de Bogotá. Tal es el caso de los sismos de Murindó, ocurridos el 17 y el 18 de Octubre de 1992, el primero con magnitud 6.6 y el segundo con 7.2, profundidad media del foco de 20 km y con epicentro en el Urabá Antioqueño y el sismo de Tauramena del 19 de enero de 1995 con $M_L = 6.5$ y profundidad de foco estimada en 50 km.

A pesar de las distancias significativas desde Bogotá hasta los focos de estos sismos, se alcanzaron a detectar intensidades de hasta IV o V en la escala de Mercalli Modificada. Esto de por sí es una demostración de los efectos de sitio que pueden llegar a producirse en la ciudad por su ubicación y por las características de los depósitos donde se asienta. En las Figuras 3.1 y 3.2 se presentan los mapas de isosistas levantados con motivo de los sismos mencionados.

Como puede observarse a partir de los mapas mencionados, se hace evidente la ocurrencia de efectos de sitio de consideración ya que mientras en las zonas de suelos firmes y montañosas las intensidades alcanzan apenas los grados I ó II, en determinadas zonas de depósitos más blandos estas intensidades pueden alcanzar valores de hasta IV y V. Estos mapas se utilizan más adelante como sustentación a los mapas de microzonificación que se proponen en el presente estudio.



Tomado del informe de INGEOMINAS del Sismo del 18 de Octubre de 1992 (INGEOMINAS, 1993)

FIGURA 3.1 MAPA DE ISOSISTAS DE BOGOTÁ PARA EL SISMO DE MURINDÓ

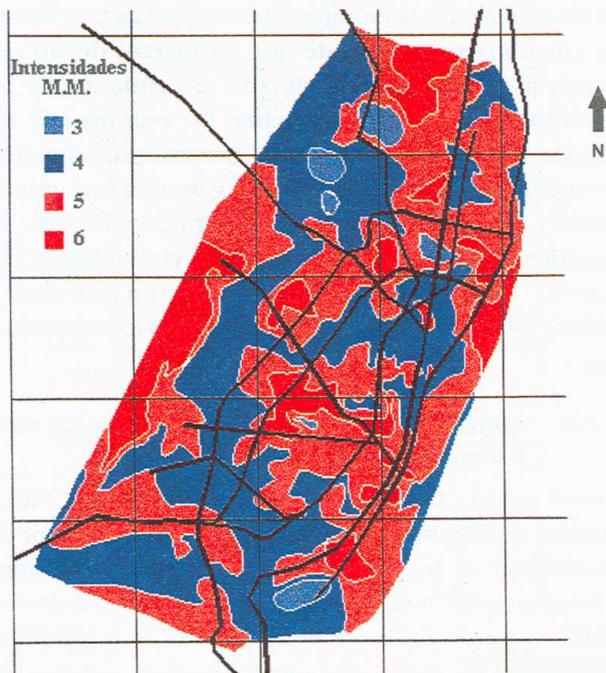


FIGURA 3.2 MAPA DE ISOSISTAS DE BOGOTÁ PARA EL SISMO DE TAURAMENA

3.1 DETERMINACIÓN DE ZONAS CON RESPUESTA DINÁMICA

Para la determinación de zonas con respuesta dinámica similar se pueden utilizar los métodos empíricos basados en la medición de señales provenientes de sismos pequeños y que sean registrados tanto en roca como en los suelos relativamente más blandos dentro de la zona de estudio. Con esta información se puede conocer confiablemente, aunque sea a pequeñas amplitudes y por lo tanto probablemente en el rango elástico y de bajo amortiguamiento del suelo, las características dinámicas de la respuesta de sitio. Esta información sirve de base entonces para predecir de manera confiable la respuesta sísmica del subsuelo ante sismos de mayor intensidad.

En el presente caso no se dispone de información suficiente de sismos pequeños dado que no existe una instrumentación sísmica suficiente y adecuada. Por esta razón se recurre a la utilización de registros de ruido sísmico ambiental, llamados comúnmente 'microtrepidaciones' o 'microtremores'.

Los estudios de microtrepidaciones o microsismos fueron iniciados por Omori (1908) y luego continuados por Kanai et al (1961) y por Aki (1988). Hoy en día las apli-

caciones prácticas de las microtrepidaciones en el campo de la ingeniería han avanzado en forma importante, especialmente hacia aplicaciones en microzonificación sísmica.

Utilizando conjuntos de estaciones algunos investigadores han demostrado que las microtrepidaciones de período corto (en general menores de 1 segundo) consisten principalmente de ondas Rayleigh excitadas localmente a partir de ruidos artificiales como son el tráfico, plantas industriales, maquinaria, etc. Nakamura ha demostrado (Nakamura, 1989) que este tipo de microtrepidaciones tiene un parecido importante a las características de las ondas S. Por otro lado Tamura (Tamura et al, 1989) ha demostrado que el período dominante del terreno está influenciado primordialmente por las ondas Love. La dificultad en la utilización de las microtrepidaciones de período corto en la estimación de períodos predominantes de sitios con suelos blandos radica principalmente en la dificultad de separar los efectos de la fuente de los efectos de sitio. De hecho, mientras más corto sea el período de la microtrepidación, más fuerte será la dependencia de las fuentes locales que las excitan haciendo muy difícil interpretar las variaciones de sitio a sitio.

Por otro lado, las microtrepidaciones de largo período o microsismos que se propagan principalmente como ondas Rayleigh y Love, son debidas a excitaciones naturales como son las ondas de mar, las variaciones en las presiones del aire y en el viento y en casos particulares a excitaciones artificiales tales como maquinarias especiales, voladuras, etc. Investigaciones recientes (Lermo et al, 1994-a) han demostrado que las microtrepidaciones de largo período permiten obtener un estimativo de los efectos de sitio y de la magnitud de las amplitudes de las relaciones espectrales entre suelo blando y duro, las cuales correlacionan bien con el espesor de los sedimentos. Sin embargo, estiman que este procedimiento no puede dar un buen estimativo del factor de amplificación debido a que no se conocen los efectos de la fuente. Considerando todo lo anterior se sigue sin comprender bien la verdadera naturaleza y forma de generación de las microtrepidaciones.

A pesar de los problemas existentes relacionados con su interpretación, las microtrepidaciones se convierten en una interesante herramienta para evaluar efectos de sitio en virtud a su bajo costo y a la rapidez en las operaciones de campo. Tal es el caso de los trabajos de microzonificación que se han llevado a cabo en México (Lermo et al, 1994-b; Singh et al, 1988), Japón (Jeon et al, 1992), Estados Unidos y en el Perú (Meneses, 1991;

Nishimura et al, 1991) por mencionar algunas De especial interés son los resultados obtenidos por Lermo y Chávez-García en cuanto a períodos dominantes en diferentes puntos de Ciudad de México obtenidos mediante interpretación de microtrepidaciones y su excelente correlación con períodos determinados en algunos puntos coincidentes a partir de las funciones de transferencia empíricas de eventos sísmicos de magnitud intermedia a alta (M_s de 4.8 a 8.1)

En el presente contexto se desea establecer una diferenciación clara entre los depósitos de suelos blandos y los depósitos de material más competente. De esta manera mediante la interpretación de los registros de microtrepidaciones puede caracterizarse cada sitio mediante el período predominante de vibración Este período predominante de vibración no necesariamente coincide con el período de vibración fundamental del depósito, debido principalmente a que la fuente de excitación de las microtrepidaciones al igual que su energía y contenido frecuencial difiere totalmente de la fuente proveniente de un sismo en la cual es más probable que se logre una vibración más uniforme del depósito

Finalmente y como objetivo principal se plantea una microzonificación de la zona plana de la ciudad con base en isoperíodos predominantes de vibración determinados a partir de registros de microtrepidaciones. Debe resaltarse que aún si los períodos predominantes mantienen diferencias con los correspondientes determinados a partir de sismos de magnitudes intermedias, la zonificación propuesta al menos geoméricamente obedece a diferentes comportamientos dinámicos de las zonas y por lo tanto se convierte en un resultado de importancia a la hora de proponer un mapa de zonificación sísmica de un área determinada.

3.1.1 Técnicas utilizadas en el análisis de señales sísmicas

Se han propuesto en la bibliografía, varias maneras o tratamientos numéricos para analizar e interpretar señales aleatorias como son las que corresponden a eventos sísmicos y a mediciones de microtrepidaciones

Las más utilizadas son la interpretación directa del espectro de Fourier o de la densidad espectral de potencia, el cálculo de relaciones espectrales con respecto a una estación de referencia en suelo firme y finalmente el cálculo de las relaciones espectrales entre las componentes horizontales del movimiento relativo a la componente vertical en el mismo sitio (Nakamura, 1989; Lachet et al, 1995)

Cada una de estas técnicas implica una interpretación de la naturaleza de las microtrepidaciones y su validez ha sido demostrada en diferentes casos Las tres tienen en común la suposición de que los efectos de sitio se deben a un solo estrato de suelo blando sobre un semiespacio infinito competente. De esta manera los efectos de sitio pueden caracterizarse simplemente a través de un período dominante y un nivel de amplificación que queda definido por la relación de impedancias entre el estrato blando y el semiespacio rígido Todos los efectos bidimensionales y tridimensionales se desprecian en dichas interpretaciones.

3.1.2 Mediciones realizadas y zonas de respuesta dinámica similar

Para el registro de las microtrepidaciones en los suelos blandos de la Sabana de Bogotá se utilizó un sensor de aceleración de tres componentes de alta sensibilidad y de respuesta lineal entre 0.15 y 200 Hz. Este sensor tridimensional se conectó a un sistema de adquisición automática de datos con una frecuencia máxima de barrido de 100 kHz. En cada sitio se realizaron varios registros a diferentes horas para poder estudiar la estabilidad de los resultados. Se registraron y grabaron ventanas de aproximadamente 25 seg tratando de seleccionar zonas de baja amplitud en las aceleraciones verticales. A cada uno de estos registros se le realizó el proceso de corrección por línea base y se calculó el espectro de Fourier de aceleraciones aplicando previamente un proceso de filtrado y suavizado. Finalmente se graficaron y se seleccionaron aquellos que indican consistencia para la interpretación final de relaciones espectrales o del método de Nakamura (1989).

3.1.3 Mediciones e interpretación de microtrepidaciones en Bogotá

Siguiendo la metodología explicada anteriormente se procedió a tomar registros de microtrepidaciones en varios puntos de la ciudad. Se realizaron un total de 72 mediciones. A cada uno de los registros obtenidos se le calculó el espectro de Fourier y se realizó complementariamente la interpretación de los espectros siguiendo la técnica de Nakamura Se incluyen interpretaciones a diferentes horas del día para verificar la estabilidad de los registros.

En la Figura 3.3 se presenta un plano básico de la ciudad donde se indican los puntos seleccionados para el registro de microtrepidaciones La información disponible fue completada por 45 puntos adicionales que fueron tomados directamente por INGEOMINAS.