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 (Seed, 1969) 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.

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 espere un comportamiento sísmico similar, con base en el cual se establecen requisitos mínimos de diseño sismoresistente en cada una de las subzonas identificadas. 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, debe especificarse el tipo 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 definición de zonas de 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 en sismos futuros esperados tanto sobre edificaciones como sobre líneas vitales y en general 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 microtremores 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 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 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 con el fin de establecer una zonificación de acuerdo con el riesgo esperado.

Finalmente, se establece una 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 destruídas 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 ML= 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 si 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.

3.1 DETERMINACIÓN DE ZONAS DE RESPUESTA DINÁMICA SIMILAR

Para la determinación de zonas de 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

FIGURA 3.1

FIGURA 3.2

recurre a la utilización de registros de ruido sísmico ambiental, llamados comúnmente 'microtrepidaciones' o 'microtremores'.

Los estudios de microtrepidaciones o microsismos fue iniciado por Omori (Omori, F., 1908) y luego continuado por Kanai et al (Kanai K, Tanaka T, 1961) y por Aki (Aki K., 1988). Hoy en día las aplicaciones 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 seg) consisten principalmente de ondas Rayleigh excitadas localmente a partir de ruidos artificiales como son el tráfico, plantas industriales, maquinaria, etc. Nakamura ha demostrado (Nakamura, Y, 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 principalmente 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. Las investigaciones adelantadas (Lermo, J. y Chavez-Garcia, F., 1994) 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 J. y Chavez-Garcia J., 1994, Singh S et al, 1988), Japón (Jeon G., Minami T., 1992), Estados Unidos y en el Perú (Meneses, J., 1991, Nishimura T 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 (Ms 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 geométricamente obedece a diferentes comportamientos dinámicos de las diferentes 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 diferentes 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 Y., 1989; Lachet C, Bard P, 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 que suponen 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 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 (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.

Considerando la información geológica y geotécnica disponible dentro del marco del presente proyecto se ha elaborado un mapa donde se identifican las zonas de respuesta dinámica similar para la zona de estudio definida. Este mapa reúne informaciones geológicas, geotécnicas y mediciones directas de microtrepidaciones en diferentes puntos de la ciudad. Como se explicó anteriormente, los períodos indicados en cada una de las zonas propuestas no corresponde necesariamente al período de vibración fundamental del depósito sino que corresponde a alguno de los modos de vibración superiores del depósito. Sin embargo la forma de las diferentes zonas sí obedece a un cambio claro en el comportamiento dinámico del depósito y por lo tanto la información consignada en dicho mapa resulta vital a la hora de realizar el mapa general de zonificación sísmica de la ciudad. Naturalmente este es un mapa de base que debe trabajarse en el futuro de manera que se pueda ir complementando y mejorando con base en la información que esté disponible en cada momento (Figura 3.4)

3.1.4 Observaciones finales

Las microtrepidaciones demuestran ser una herramienta versátil para determinar principalmente el período de vibración predominante de depósitos de suelo blando no muy profundos cuyo comportamiento se asemeje al de un estrato blando uniforme sobre un semiespacio infinito de suelo competente. Para el caso de Bogotá las suposiciones básicas no se cumplen del todo por lo cual hay que recurrir a una interpretación especial de los resultados que se obtienen.

Considerando que la energía de las fuentes que producen las microtrepidaciones (como son el tráfico y demás fuentes posibles) es limitada y dada la considerable profundidad

FIGURA 3.3.

FIGURA 3.4

de los depósitos de suelo, en el caso de Bogotá, el período de vibración predominante determinado a partir de las mediciones de microtrepidaciones resulta en general menor que el período de vibración fundamental de los depósitos mismos. La eventual modelación de las microtrepidaciones se complica por los aspectos mencionados y por el origen y características de la fuente. Este problema requiere mucha más investigación en el futuro.
La información que se puede obtener a partir de la interpretación de los registros de microtrepidaciones es útil de todas maneras para establecer zonas de diferente comportamiento dinámico. De esta manera aún con las limitaciones planteadas las microtrepidaciones se convierten en una herramienta vital para desarrollar mapas de microzonificación sísmica de ciudades.

3.2 INFORMACIÓN SÍSMICA Y MODELO UNIDIMENSIONAL DE CALIBRACIÓN

Con el fin de desarrollar una metodología de análisis de la respuesta sísmica de depósitos de suelo basada en modelos teóricos del comportamiento del mismo, se hace necesario contar con una información básica confiable que permita realizar la calibración de los modelos. Lo ideal para lograr este objetivo sería un conjunto de registros de acelerogramas en diferentes sitios de la ciudad en los cuales debería conocerse en detalle las características geotécnicas básicas y las propiedades dinámicas de los suelos predominantes en el perfil. Se requerirían señales a nivel de la roca en profundidad al igual que las señales de respuesta en superficie. Estas señales en superficie deberían ser preferiblemente en campo libre para evitar la interacción con una estructura dada, la cual tiende a cambiar la forma general de la señal, tanto en amplitud como en duración y contenido frecuencial.

Una vez conformado el modelo del perfil estratigráfico en los diferentes sitios de la ciudad y habiendo asignado las propiedades estáticas y dinámicas a cada uno de los suelos característicos, puede excitarse el modelo con alguna de las señales disponibles a nivel de la roca base. La calibración consistiría básicamente en comparar las respuestas obtenidas a nivel de superficie con las señales medidas en el sitio determinado para el mismo evento que se está tratando de modelar. Se podría establecer mediante ensayo y error las recomendaciones que deben seguirse en la modelación de una estratigrafía dada para minimizar las diferencias observadas entre la respuesta real y la dada por el modelo.

Luego de calibrado, el modelo puede utilizarse para estimar la respuesta esperada ante otras excitaciones diferentes como es el caso de los sismos de diseño definidos. La metodología permitiría además establecer la respuesta en sitios diferentes a los puntos de calibración teniendo como información básica la estratigrafía y las propiedades de los suelos dominantes.

Debido a que apenas en el año 1993 entró en operación la Red Sismológica Nacional y a que apenas hasta ahora se ha dado prioridad a la instrumentación de los depósitos de suelo de la ciudad, sólo se dispone en la actualidad de un punto de calibración, en el cual se han registrado hasta el momento 4 eventos de alguna importancia. El punto en mención se trata de la estación de INGEOMINAS ubicada en la sede de esta entidad en la zona centro-oriental de la ciudad. En este punto caracterizado desde el punto de vista geotécnico por suelos blandos hasta una profundidad del orden de 180 metros existe un

acelerógrafo en superficie y se cuenta con toda la información geotécnica necesaria para adelantar el modelo a que se ha hecho referencia anteriormente. Desafortunadamente es el único punto de suelo blando que está instrumentado al momento de la realización de los trabajos aquí mencionados y no se tiene disponibilidad de un aparato en profundidad para conocer en detalle la señal de roca que excita en un momento dado el perfil estratigráfico.

Como puntos de referencia para tener una aproximación de la señal de roca se cuenta con las estaciones del Rosal y de San Rafael a las que se hace referencia más adelante.

3.2.1 Datos y características de eventos sísmicos

De los eventos ocurridos desde que inició la operación de la Red de acelerógrafos, apenas cuatro (ver Tabla 3.1) han excitado los acelerógrafos ubicados en las estaciones del Rosal (roca), San Rafael (roca) y simultáneamente la estación de INGEOMINAS (suelo blando). En la Tabla 3.1 se resumen las características principales de los cuatro eventos mencionados.

Evento No.	Nombre	Fecha	Profundidad (km)	Magnitud ML	Distancia Epicentral (km) *
1	Tauramena	1/19/95	15	6.5	141.8
2	Calima	2/8/95	100	6.6	297.3
3	Ecuador	10/21/95	33	6.1	879.0
4	Páez	6/6/94	Superficial	6.4	292.5

** Distancia epicentral aproximada a la Estación INGEOMINAS*

TABLA 3.1 Eventos Sísmicos cuyos registros se utilizan en el presente estudio

En la Figura 3.5 se presenta la ubicación de los epicentros de los sismos utilizados en este estudio y las estaciones de la Red Sismológica Nacional incluyendo las que se ubican en la zona bajo estudio.

Finalmente la Figura 3.6 presenta como ilustración los registros de la componente Este - Oeste del sismo de Tauramena con el fin de comparar la diferencia entre las dos eventuales señales en roca que estarían produciendo la respuesta registrada en la superficie del suelo blando. Además, se incluye en dicha figura la comparación de los espectros de respuesta correspondientes.

Del análisis visual de los registros disponibles pueden realizarse unas observaciones preliminares de importancia :

FIGURA 3.5

FIGURA 3.6

- Es evidente la amplificación que se presenta en los registros de suelo blando con respecto a los de roca. Se observan factores de amplificación de 3 a 10 o más en la aceleración máxima registrada en suelo blando con respecto a la de roca equivalente.

- Las señales horizontales predominan sobre las verticales en los cuatro eventos analizados tanto para la señal en roca como para la señal en suelo blando.

- La duración de las señales en suelo blando, al menos para un cierto umbral de aceleración mínima, resulta mucho mayor que aquella para suelo firme o roca.

- La señal en roca cambia significativamente, tanto en amplitud como en contenido frecuencial de una estación a otra. Esto implica que no es posible conocer en forma confiable la señal que estaría entrando en la roca base del depósito de suelo blando, en este caso particular en la estación de INGEOMINAS. Este aspecto genera unas variaciones importantes entre las señales de respuesta dada por el modelo y la registrada, tal como se presenta más adelante.

3.2.2 Caracterización geotécnica y propiedades dinámicas

Para efectos del análisis de respuesta dinámica mediante un modelo unidimensional de la estratigrafía y para poder calibrar los modelos analíticos se realizó una caracterización geotécnica detallada del perfil de suelos en el sitio de INGEOMINAS.

El depósito de suelo está dominado por arcillas blandas típicas de la sabana con depósitos localizados de turbas, intercalados por un depósito de arena que se presenta entre los 30 y 37 m de profundidad. A mayores profundidades las arcillas van ganando consistencia y rigidez y además se hace más frecuente la aparición de limos y arenas finas en combinación con las arcillas. Hacia los 70 m de profundidad el depósito pierde plasticidad y la rigidez aumenta a medida que aumentan las presiones de confinamiento. A 180 m de profundidad aparece una arcillolita que pertenece a la Formación Bogotá y que se toma como estrato rocoso para efectos de la entrada sísmica. En el capítulo anterior se presentaron las características principales del depósito mencionado tales como la estratigrafia según la clasificación unificada de suelos, la variación de la plasticidad con la profundidad, la variación de propiedades básicas con la profundidad como son la densidad, los límites líquido y plásticos, el índice de plasticidad, el índice de liquidez, los resultados de medición de resistencia con el método de la veleta y los puntos donde se realizaron ensayos especiales como son triaxiales cíclicos y medición de velocidades de onda en Laboratorio.

Además en la Figura 3.7 se presentan las curvas resultantes de degradación de la rigidez y de amortiguamiento con respecto al crítico en función de la deformación a cortante.

FIGURA 3.7

3.2.3 Respuesta frecuencial en la estación INGEOMINAS

Los datos disponibles se analizan con relación a la amplificación que ocurre en los depósitos de suelo blando de la ciudad y a los cambios de contenido frecuencial que sufre la señal.

La caracterización estratigráfica en el sitio de INGEOMINAS se utiliza para determinar la respuesta teórica del modelo ante la señal de entrada en roca. Para el efecto se utiliza el programa de computador SHAKE91 (Idriss et al, 1991) el cual se basa en la propagación vertical de ondas de cortante en un medio semi-infinito y utiliza un procedimiento iterativo lineal equivalente para las propiedades dinámicas del suelo de tal forma que sean compatibles con el nivel de deformación por cortante impuesto por el sismo.

Existe una concordancia aceptable entre los períodos predominantes que representarían los períodos de vibración de los modos fundamentales obtenidos mediante el análisis del factor dinámico de amplificación del modelo unidimensional desarrollado y las funciones de transferencia empíricas basadas en los espectros de Fourier suavizados y filtrados para cada uno de los sismos anteriormente presentados.

Para el análisis de la respuesta del modelo se utilizan las señales disponibles en la estación del Rosal y cuando existen en la estación de San Rafael. La Figura 3.8 compara las respuestas teóricas obtenidas mediante el modelo unidimensional con los espectros de los registros disponibles en la estación de INGEOMINAS para cada uno de los cuatro sismos analizados. Como puede verse no se logran resultados comparables en todos los análisis realizados pero puede afirmarse que el modelo refleja las tendencias generales en cuanto al comportamiento previsto del depósito. Una de las incógnitas importantes en los análisis es la señal de entrada que debe utilizarse para comparar con la señal en superficie. A esta incertidumbre definitiva se atribuyen buena parte de las diferencias observadas.

La amplificación de la aceleración, que es una de las inquietudes principales por resolver, se observa principalmente en los estratos superiores más blandos del depósito. La Figura 3.9 presenta la variación de la aceleración máxima de respuesta con la profundidad del depósito para los cuatro sismos de calibración. Como se indica en la gráfica, para profundidades mayores de 40 m a 60 m, el valor de la aceleración máxima permanece esencialmente constante y la amplificación ocurre principalmente en los estratos más superficiales.

Utilizando el modelo desarrollado, se realizaron análisis de respuesta utilizando los sismos de calibración a diferentes aceleraciones máximas del terreno. El análisis de las curvas de aceleración máxima en superficie contra la aceleración máxima de la señal de roca para las corridas realizadas, muestran claramente que hasta un nivel dado de aceleración se produce amplificación relativa pero de ahí en adelante el suelo trata de amortiguar la señal produciendo una deamplificación de la aceleración máxima. Para la señal del sismo de Tauramena la aceleración límite resulta del orden de 0.22 g, para la señal del sismo de Calima es del orden de 0.21 g, para la señal del sismo de Ecuador y del sismo de Páez es del orden de 0.30 g. En términos generales puede afirmarse que

FIGURA 3.8

FIGURA 3.9

señales con aceleraciones máximas por encima de 0.20g sufrirán una deamplificación en la aceleración máxima cuando pasen a través del depósito de suelo blando, caracterizado por la estratigrafía de la estación de INGEOMINAS.

3.3 RESPUESTA MEDIANTE MODELOS UNIDIMENSIONALES

3.3.1 Perfiles de análisis

La microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá se estudió principalmente desde el punto de vista de la respuesta unidimensional del depósito. La forma de la cuenca o sea el perfil del basamento rocoso en la zona bajo estudio está caracteriza por ser relativamente uniforme y con profundidades inferiores a los 300 m. Considerando las dimensiones aproximadas de la cuenca tanto en dirección este-oeste como norte-sur (por lo menos unos 30 km en cada dirección) o si se toma la zona más angosta que sería la correspondiente a un corte entre los cerros orientales y los cerros de suba hacia la Calle 170, el ancho total para el análisis sería de unos 6 km. Al comparar esta dimensión longitudinal con la profundidad máxima (300 m) resulta prácticamente en un perfil en el cual es válida la suposición básica para utilizar un modelo unidimensional.

Con base en la información geotécnica disponible y en casos de análisis similares (véase por ejemplo el caso de México, Seed H. B., Romo M., Sun J., Jaime A. & Lysmer J. 1988) se puede esperar que la respuesta del subsuelo de Bogotá puede estudiarse esencialmente mediante los modelos unidimensionales descritos.

De acuerdo con ésto el análisis se plantea mediante la respuesta dinámica unidimensional de los puntos donde se realizaron sondeos y donde se conoce la estratigrafía existente.

Como se mencionó anteriormente se realizaron 38 perforaciones estratégicamente escogidas en distintas zonas de la ciudad y a profundidades que van desde 20 m hasta 250 m. Dentro de éstas 3 llegaron a roca (Calle 170 con Autopista, Calle 127 con Autopista, INGEOMINAS) y al suroccidente (Timiza) se llegó a un estrato de arena muy compacta, de baja plasticidad.

A partir de cada perfil estratigráfico disponible se construyó un modelo unidimensional compuesto por varias capas de suelo y un semiespacio infinito en la parte inferior representando la roca base. Cuando los sondeos no llegaron hasta la profundidad de la roca se construyó una estratigrafía estimada con base en la información estratigráfica de sondeos cercanos y según la forma estimada de la cuenca.

3.3.2 Caracterización geotécnica y propiedades dinámicas

En cada una de las perforaciones se tomaron muestras inalteradas de suelo y se caracterizaron mediante ensayos de laboratorio, tales como triaxiales estáticos y dinámicos, consolidaciones, compresiones inconfinadas y mediciones de velocidad de onda cortante en laboratorio, entre otros. Todos estos ensayos permitieron establecer un modelo de comportamiento para los suelos arcillosos de la ciudad.

3.3.3 Sismos de diseño

Tal como se mencionó en el Capítulo 1, para efectos del diseño, en el estudio de la respuesta sísmica de los depósitos de suelos de la parte plana de la ciudad se establecieron tres señales que representan sismos hipotéticos (cercano, regional o frontal y lejano). Los sismos de diseño conforman la base para analizar todos los modelos unidimensionales de los perfiles de suelo realizados en el Proyecto.

3.3.4 Análisis de respuesta dinámica

Con el procedimiento descrito anteriormente se procedió a realizar el análisis de respuesta dinámica de cada uno de los sondeos realizados utilizando los sismos de diseño.

Por otro lado se ha graficado en la Figura 3.10 un mapa de isoperíodos fundamentales del depósito. Debe tenerse en cuenta que éste corresponde al período fundamental calculado con base en la hipótesis de comportamiento elástico y unidimensional mencionado. Este período sufrirá una degradación a medida que la señal de entrada produce deformaciones y degradación de la rigidez del depósito. A partir de estos períodos fundamentales pueden estimarse los armónicos de cada sitio dividiendo por números impares (3, 5, 7, etc.). Esta es una manera de identificar los períodos de máxima posibilidad de respuesta de acuerdo con las características del depósito. Debe tenerse en cuenta también, que para que se produzca el fenómeno de resonancia la señal de entrada debe traer también energía suficiente en alguno de los períodos del depósito. La resonancia será crítica para el período fundamental, pero puede producir respuestas de consideración para los períodos cercanos al fundamental (segundo o tercer períodos).

Cada una de las señales de los sismos de diseño excitará períodos de vibración predominantes del depósito en proporciones diferentes de manera que la respuesta para cada una de las señales será diferente. Se obtendrá predominio de la respuesta para los períodos (o frecuencias) en las cuales la señal de entrada traiga más energía. Para esta interpretación se recurre a los espectros de respuesta en cada sitio, los cuales indican claramente los períodos de vibración de máxima respuesta en cada caso.

3.3.5 Tipificación de la respuesta dinámica por zonas

Con el fin de tratar de tipificar la respuesta para cada una de las zonas que presentan un comportamiento dinámico diferente se han seleccionado los sondeos más representativos de cada zona y aquellos que llegan hasta mayores profundidades.

Los sondeos seleccionados como típicos de las diferentes zonas de la ciudad son los siguientes (Tabla 3.2) :

FIGURA 3.10

Código del sondeo	Localización	Profundidad (m)
N9A	Cll. 126 - Cra. 29	190
N14	Av. Cundinamarca - Cll. 139	246
N48	Universidad Agraria	130
N49	Cra 30 - INGEOMINAS	180
N33	Monumento los Héroes	100
N43	Av. 1 de Mayo - Cra. 30	100
N27	Parque Timiza	130
N51	Aeropuerto El Dorado	250

Tabla 3.2. Sondeos seleccionados como típicos

Para cada uno de estos sondeos se realizó un análisis de sensibilidad con la profundidad de la roca base.

La Figura 3.11 presenta a manera de ilustración los resultados obtenidos en términos de espectros de respuesta para los tres sismos de diseño establecidos y para las diferentes profundidades identificadas como representativas para la zona asociada al sondeo de INGEOMINAS. Como puede apreciarse en términos muy generales la respuesta de los depósitos profundos no es muy sensible a la profundidad de la roca base siempre y cuando se mantengan dentro de ciertos límites. Esto trae como consecuencia directa que la respuesta de toda una zona estará controlada más por el tipo de suelo de los estratos superficiales (tal vez los primeros 30 a 50 m) que por la profundidad de la roca base, siempre y cuando esta esté por encima de un valor dado.

Finalmente y para estudiar lo que pasa a medida que la profundidad del depósito disminuye, es decir en cercanías a los cerros y bajo la suposición que el tipo de suelo se mantiene similar a los que se encuentran en las zonas de mayor profundidad (lo cual se ha encontrado que no es del todo cierto), se ha seleccionado el sondeo de INGEOMINAS para adelantar corridas suponiendo que el basamento rocoso se encuentra a muy poca profundidad (20 m, 40 m, 60 m y 80 m). La Figura 3.12 presenta los resultados correspondientes.

Estas figuras dan una idea de los efectos que pueden presentarse a medida que un depósito de suelo se va encontrando con la formación rocosa inferior y el depósito va disminuyendo en espesor. Estos resultados se utilizan más adelante al momento de elaborar un mapa de microzonificación de la ciudad.

3.4 RESPUESTA SÍSMICA MEDIANTE MODELOS BIDIMENSIONALES

La respuesta dinámica de los depósitos en la zona plana de la ciudad debería estudiarse en realidad mediante modelos tridimensionales dada la forma de la cuenca y la posible interacción de formaciones como la de los cerros de Suba. Las metodologías actualmente disponibles, sin considerar por supuesto las técnicas de modelación física que implican de por sí complicaciones considerables, están basadas principalmente en

FIGURA 3.11

FIGURA 3.12

el método de los elementos finitos. Una modelación tridimensional de la cuenca de Bogotá mediante elementos finitos implicaría un número bastante grande de elementos, considerando por un lado la necesidad de modelar al menos los cambios importantes en la estratigrafía de las diferentes zonas y por otro la limitación de no definir elementos muy deformados geométricamente. Estas dos limitaciones implican de por sí, o bien una pérdida casi total de la precisión en la modelación de la estratigrafía o una red de muchos cientos de miles de elementos, lo cual está por fuera del alcance del presente proyecto.

Ante esta situación se recurre de manera simplificada a los modelos unidimensionales, que como se demostró en el numeral anterior arrojan resultados bastante aceptables que pueden utilizarse en la generación de recomendaciones prácticas muy concretas.

Como etapa intermedia entre los modelos unidimensionales y tridimensionales están los modelos bidimensionales. Estos son aplicables cuando la hipótesis de deformaciones en un plano resulta válida. Para el caso de la geometría de la cuenca de Bogotá, podría pensarse en la posibilidad de estudiar modelos bidimensionales tomando secciones en la dirección oriente-occidente. Hacia la zona central de la ciudad (Calle 26), la hipótesis deja de ser válida, no por la forma de la cuenca, sino por el cambio drástico que se presenta en el tipo de suelo, lo que implica de entrada un problema tridimensional. Por lo anterior, la única zona donde estrictamente podría pensarse en la realización de modelos bidimensionales es en la zona norte de la ciudad, entre calles 127 y 270 aproximadamente.

3.4.1 Forma de la cuenca y secciones para el análisis

Usando el corte realizado de oriente a occidente por la calle 170 entre los cerros orientales de la ciudad y los cerros de Suba, se procedió a elaborar un modelo de "Elementos Finitos" del depósito de suelo utilizando el generador de mallas del programa ANSYS (1995). El análisis se llevó a cabo mediante el programa de computador QUAD4M (Idriss et al, 1992). El programa QUAD4M utiliza un esquema de solución de las ecuaciones de movimiento paso a paso en el tiempo y mediante un proceso iterativo en las propiedades del suelo, teniendo en cuenta las no-linealidades en el proceso de propagación ondulatoria. El programa incorpora amortiguamiento independiente en cada uno de los elementos del continuo, fronteras absorbentes de manera que el semiespacio infinito por debajo de la malla no necesita suponerse como rígida sino que efectivamente se incluyen sus propiedades en el modelo y puede incluso especificarse las velocidades de onda de compresión y de corte y la densidad de este material. El programa involucra además un nuevo método para la formulación de las matrices de amortiguamiento lo que resulta en una reducción significativa en el amortiguamiento para las altas frecuencias lo que se asociaba comúnmente a la formulación de amortiguamiento tipo Rayleigh.

3.4.2 Análisis de respuesta dinámica y resultados

El análisis de la respuesta se llevó a cabo para los sismos de diseño establecidos (Sismo Frontal con aceleración máxima de 0.2 g y el Sismo Cercano con aceleración máxima de 0.25 g).

La Figura 3.13 presenta la forma de la cuenca utilizada en el análisis y las aceleraciones máximas de respuesta en superficie para cada uno de los sismos. En esta figura pueden

evidenciarse las amplificaciones locales que ocurrirían en la aceleración máxima en superficie por aspectos bidimensionales.

Por otro lado en la Figura 3.14 se presentan los mapas de isoaceleraciones horizontales máximas en la sección de análisis para cada uno de los sismos. De nuevo se mantiene la escala en la figura para efectos comparativos.

3.4.3 Efectos bidimensionales en la respuesta

Para poder establecer las diferencias entre los modelos unidimensionales y los bidimensionales, se escogió el sitio de UNIAGRARIA (sondeo N48) y se elaboró un modelo unidimensional simplificado (utilizando las mismas capas de suelo del modelo bidimensional para este sitio). Con base en esta corrida con estratigrafía simplificada y la corrida original con la estratigrafía detallada se elaboró la Figura 3.15 en la cual se comparan las tres respuestas, es decir la dada por el modelo bidimensional en dicho punto, con los resultados de las corridas unidimensionales con estratigrafía simplificada y detallada para el sismo cercano.

3.4.4 Amplificaciones locales en zonas de los cerros

Con el fin de conocer las amplificaciones locales, los efectos topográficos y en general los llamados efectos de sitio en las zona de los cerros se seleccionaron tres secciones típicas denominadas Corte 1 - Vereda Torca, al norte de la ciudad, Corte 2 - Parque Nacional y Corte 3 - Quebrada Bolonia en la zona sur de la ciudad.

Cada una de estas secciones se modeló mediante elementos finitos suponiendo un empotramiento en la base y estimando la pendiente del talud posterior (flanco oriental) de acuerdo con consideraciones geológicas, tomando la pendiente promedio de las formaciones correspondientes. El material se consideró, suponiendo un comportamiento elástico para lo cual se estimaron unos valores típicos de los módulo de corte Go con base en valores reportados en la literatura (véase por ejemplo, Jumikis, 1983) . La densidad del material se estimó en 2400 kg/m^3. A partir de estos valores se estimaron las velocidades de onda de cortante, Vs. Se conformaron así tres modelos diferentes con aproximadamente 300 elementos cada uno. El análisis se realizó utilizando el programa de computador QUAD4M (Idriss et al, 1994) para los tres sismos de diseño establecidos. En las Figuras 3.16 a 3.18 se presentan los resultados para el Corte 3 (Quebrada Bolonia), estas incluyen una gráfica con la aceleración máxima de superficie para todos los puntos superficiales de la red, una gráfica de isoaceleraciones en el cuerpo del cerro y una figura donde se presenta la variación de la forma de los espectros de respuesta en diferentes puntos superficiales del modelo.

Con base en los resultados presentados pueden establecerse las siguientes conclusiones con respecto a los efectos topográficos en los cerros de la ciudad:

FIGURA 3.13

FIGURA 3.14

FIGURA 3.15

FIGURA 3.16

FIGURA 3.17

FIGURA 3.18

- La aceleración máxima es muy sensible a pequeños cambios en la topografía local. Normalmente cualquier protuberancia o saliente topográfica tiende a producir una amplificación considerable mientras que cualquier valle o depresión tiende a deamplificar la aceleración máxima.

- Los sismos Cercano y Frontal dominan la respuesta sísmica de los cerros. Es claro que el sismo Lejano no tendría efectos de consideración en las construcciones de los cerros y el diseño de las construcciones en esta zona queda controlado por sismos cercanos o regionales intensos.

- Las formas de los espectros de respuesta van cambiando a medida que se desplaza de un sitio a otro del cerro bajo estudio. Aunque la forma general del espectro tiende a mantenerse, se producen en algunos casos amplificaciones de importancia.

- Para efecto del diseño de los taludes mismos, las aceleraciones de entrada en la roca pueden llegar a amplificarse considerablemente. Por ejemplo una aceleración máxima en la señal de roca del 20 % g, puede llegar a producir una aceleración máxima en la superficie del orden de 30 % g. Una aceleración del orden del 25 % g puede llegar a producir por su parte una aceleración máxima en sitios específicos del talud del orden de 30 % o 35 % g.

- La cuchilla del cerro y en general los picos presentan las zonas críticas de máxima amplificación. Esto está de acuerdo con la información histórica que establece entre otras que la iglesia de Monserrate ha sufrido daños intensos en varios sismos en el pasado, por estar ubicada esta construcción en el sitio crítico del perfil.

3.5 MAPA DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA Y RECOMENDACIONES

Con base en la información disponible en el estudio y en especial en la presentada en los numerales anteriores se procedió a elaborar el Mapa de Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá (Figura 3.19 - Plano No. 2 a escala 1:50.000).

La ciudad se dividió en cinco zonas principales a saber :

3.5.1 Zona 1 - Cerros

La zona de los cerros se caracteriza por la presencia de formaciones rocosas de suelos con capacidad portante relativamente mayor. Puede presentar amplificaciones locales de aceleración por efectos topográficos lo cual deberá evaluarse en cada caso específico. Existen zonas de inestabilidad por efectos de las pendientes, afectadas por lluvias, fuentes de aguas locales y sismos. Debe utilizarse el mapa de susceptibilidad al deslizamiento anexo al informe (Plano No. 3). Requiere estudios especiales de amplificación y estabilidad para la construcción de obras.

FIGURA 3.19

3.5.2 Zona 2 - Piedemonte

Está conformada por la zona de transición entre los cerros y la zona plana y consta principalmente de depósitos coluviales y conos de deyección de materiales con una gran capacidad portante en general, pero con estratigrafías heterogéneas con predominio de gravas, arenas y limos y depósitos ocasionales de arcillas de poco espesor.

3.5.3 Zona 3 - Lacustre A

Está conformada principalmente por depósitos de arcillas blandas con profundidades mayores que 50 m. Pueden presentarse depósitos ocasionales de turbas y o arenas de espesor intermedio a bajo. Presentan una capa superficial preconsolidada de espesor variable y no mayor a 10 m.

3.5.4 Zona 4 - Lacustre B

Tiene las mismas características de la Zona 3 - Lacustre A pero los depósitos superficiales (los primeros 30 a 50 m) son consistentemente más blandos que los anteriores. Además corresponde a la zona en que la profundidad hasta la roca base es mucho mayor (del orden de 200 m hasta 400 m o más)

3.5.5 Zona 5 - Terrazas y Conos

Se presenta predominantemente en la zona sur de la ciudad y está conformada por suelos arcillosos secos y preconsolidados de gran espesor, arenas o limos o combinaciones de ellos, pero con capacidades portantes mayores que los depósitos de las zonas Lacustres A y B. El límite entre las zonas 4 y 5 no está muy bien definido por lo cual se requiere la definición de zonas de transición.

Se ha denominado la **Zona 5A - Terrazas y Conos potencialmente licuables** a una subdivisión de esta zona, con los mismos espectros de diseño que la Zona 5, pero en la cual las características predominantes de las arenas limpias, finas y superficiales, combinadas con la posibilidad de niveles freáticos altos redundan en la posibilidad que presenten licuefacción ante la ocurrencia de un sismo intenso. Debe evaluarse específicamente el potencial de licuefacción cuando se deseen adelantar construcciones en esta zona.

La caracterización presentada de cada una de las zonas está relacionada directamente con las características de los depósitos de los primeros 30 a 50 m de profundidad que son los que en últimas controlan la respuesta sísmica de cada sitio en particular. Se encontró que el parámetro que define claramente cuando un depósito pertenece a una zona u otra es el módulo de corte inicial Go.

Cada zona se caracteriza por una respuesta sísmica diferente al considerar el espectro de diseño que se recomienda en cada una de ellas. En las Figuras 3.20 a 3.24 se han agrupado los espectros de respuesta de los sondeos que quedan ubicados en cada una

FIGURAS 3.20 Y 3.21

FIGURAS 3.22 Y 3.23

FIGURA 3.24 Y 3.25

de las zonas 1 a 5 mencionadas. En las mismas figuras se han graficado los espectros recomendados para diseño en cada zona. Como puede verse se han despreciado algunos picos puntuales y se ha establecido un comportamiento muy normalizado tal como debe ser una recomendación de diseño.

En la Figura 3.25 se presenta la recomendación final de diseño conformada por los espectros de las diferentes zonas 1 a 5 mencionadas. En la Figura se incluye como referencia el espectro de diseño dado por el Código Colombiano de Construcciones Sismoresistentes (Decreto 1400, 1984) considerando un suelo S4, o sea un coeficiente de suelo igual a 2.0.

La zona correspondiente a períodos superiores a 2.5 seg que corresponde en general a estructuras muy especiales, de alto períodod de vibración fundamental, se presenta achurada de manera que se indica que en esta zona deben hacerse estudios de respuesta especiales. El tipo de estructura que tenga estas características amerita la realización de un estudio específico. La información dada por el espectro para estructuras en este rango debe utilizarse apenas como un indicativo de la fuerza que podría esperarse.

Por otro lado los espectros propuestos para cada una de las 5 zonas pueden plantearse en términos de ecuaciones. Para el efecto se utilizan las recomendaciones generales dadas por Dobry (Dobry, 1987) y que probablemente harán parte de muchos códigos de construcción de otros países en el futuro, incluido probablemente los Estados Unidos.

La propuesta adaptada a los resultados del presente estudio está conformada por las ecuaciones y parámetros que se indican en la Figura 3.26.

Finalmente deben hacerse unas aclaraciones respecto a la aplicabilidad de las anteriores recomendaciones de diseño:

- En la Zona 1 - Cerros, debe consultarse en forma complementaria el Mapa de Susceptibilidad al Deslizamiento. Además deben realizarse estudios particulares de amplificación local y estabilidad para la construcción de obras.

- En la Zona 5A debe evaluarse el potencial de licuefacción para la construcción de obras.

- Para la zona de períodos mayores que 2.5 seg y que corresponde a estructuras especiales deben realizarse estudios locales de respuesta para determinar la forma del espectro de diseño en ese rango de períodos.

- En todos los límites de la Zonas debe establecerse una franja de transición de unos 500 m a cada lado. En estas zonas de transición se debe tomar la aceleración de diseño más exigente que resulte de los espectros de diseño de las zonas adyacentes.

FIGURA 3.26

- Podrán utilizarse fuerzas de diseño menores a las que resultan de la utilización de los espectros de diseño recomendados siempre y cuando se demuestre mediante análisis de respuesta de perfiles debidamente estudiados.

- Para efectos de la aplicación de los requisitos complementarios del Código Colombiano, la ciudad sigue perteneciendo a una zona de Amenaza Sísmica Intermedia.

- Los valores de Aa y Av dados por el Código no deben emplearse si se va a utilizar el Mapa de Microzonificación propuesto para determinar los espectros de diseño. En ese caso deben utilizarse los coeficientes Am y An equivalentes.

- Deberá tenerse especial cuidado para el diseño de estructuras de corto período en la selección del valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía para el sistema estructural, R. En algunos casos, este valor ha sido incrementado artificialmente en el Código para balancear la forma supuesta del espectro por el Código en este rango de períodos. Se recomienda utilizar un valor de R compatible con el sistema estructural y los materiales que se utilicen.

- Cada una de las Zonas Sísmicas en que se ha dividido la ciudad involucra un valor diferente de Am, que corresponde a la aceleración máxima del terreno para dicha zona. Estos valores de aceleración pueden utilizarse en el diseño de estructuras muy rígidas (de bajo período) o en el diseño de obras geotécnicas como excavaciones, muros de contención, terraplenes y otros.

3.6 REFERENCIAS

Aki, K., 1988. *"Local Site Effects on Ground Motions, Earthquake Engineering And Soil Dynamics II- Recent Advances in Ground motion Evaluation"* . J.L. Von Thun (Editor). Geotechnical Special Publication No.20, Am. Soc. Civil Eng, New York.

Dobry, R., & Vucetic M., 1987. *"Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits"*. In proceedings of the International Symposium on Geotechnical Engineering of soft soils, Vol. 2, Manual J. Mendoza y Luis Montañez (eds), Mexico.

Idriss I. and Joseph I. Sun, 1992. *"SHAKE91"* . Berkeley, California.

INGEOMINAS - Universidad de los Andes, 1996. *"Microzonificación sísmica"*. Proyecto Microzonificación sísmica de Santafé de Bogotá, Subproyecto No. 11. Santafé de Bogotá.

Jeon, G., Minami, T., 1992. *"Estimation of Response Spectrum by Strong Ground Motion and Microtremors at Ashigara Valley"* . International Symposium, The Effect of Surface Geology on Seismic Motion. ESG. Odawara, Japan .

Jumikis, A.R., 1983. *"Rock Mechanics"*. 2nd. Edition, Tinas Tech Publications.

Kanai, K., Tanaka, T., 1961. *"On Microtremors"*. VIII, Bull. Earthquake research Institute. Tokyo University, Japan.

Lachet, C., Bard, P., Y., 1995. *"Theoretical Investigations on the Nakamura´s Technique"* . Proceedings : Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Volume II. St.Louis, Missouri.

Lermo, J., Chávez-García, J., 1994. *"Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation?"*. Bulletin of Seismological Society of America, Vol.84, No.5.

Lermo, J., Chavez-Garcia, F., 1994. *"Site Effect Evaluation at Mexico City : Dominant Period and Relative Amplification from Strong motion and Microtremor Record"*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

Meneses, J., 1991.*"Microtrepidaciones : fundamentos y análisis"*. Seminario Internacional sobre Microzonificación. CISMID. Lima, Perú.

Nakamura, Y., 1989. *"A Method for Dynamic Characteristic Estimation of Subsurface Using Microtremors on Ground Surface".* QR of RTRI 30, No.1.

Nishimura, T., Meneses, J., 1991. *"Aplicaciones de las Microtrepidaciones"*. Seminario Internacional sobre Microzonificación. CISMID. Lima, Perú.

Omori, F., 1908. *"On Microtremors".* Res. Imp. Earthquake Inv. Comm.

Presidencia de la Republica, 1984 *"Código Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes"*. Decreto 1400 de 1984.

Seed, H., B., M., Romo, M.,P., Sun, J., I., Jaime, A., Lysmer, J., 1988. *"The Mexico Earthquake of September 19, 1985 - Relationships between Soil Conditions and Earthquake Ground Motions".* Earthquake Spectra, Vol.4.

Seed H. B. & Idriss Y., 1969. *"Influence of Soil Conditions on Ground Motions during Earthquakes"*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Div. SM(1)

Singh, S., K., Lermo, J., Dominguez, T., Ordaz, M., Espinosa, J., M., Mena, E., Quaas, R., 1988. *"The Mexico Earthquake of September 19,1985 - A Study of Amplification of Seismic Waves in the Valley of Mexico with Respect to a Hill Zone".* Earthquake Spectra, Vol.4.

Tamura et al., 1990 .*"Characteristics of Wave Group of Microtremors obtaines by array measurements"*. Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ, 449: 83-91 (in Japanese).

Yamin L., Ojeda. A., 1995. "*Evaluación de Efectos de Sitio en Bogotá : Períodos Dominantes y Amplificaciones Relativas a Partir de Registros Sísmicos y Microtrepidaciones".* Seminario sobre Microzonificación Sismogeotecnica y Vulnerabilidad de Ciudades , Universidad de los Andes. Jornadas Geotécnicas, Sociedad Colombiana de Ingenieros.