

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 sísmoresistente. 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 periodos 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.

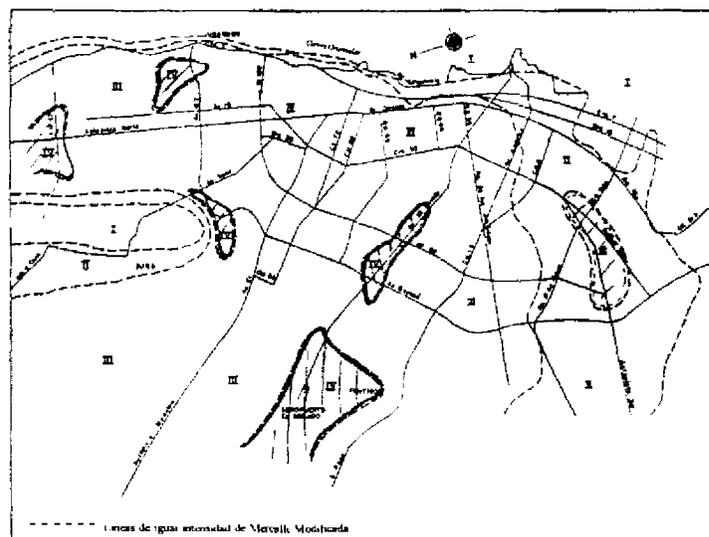


FIGURA 3.1 MAPA DE ISOSISTAS DE BOGOTÁ PARA EL SISMO DE MURINDÓ

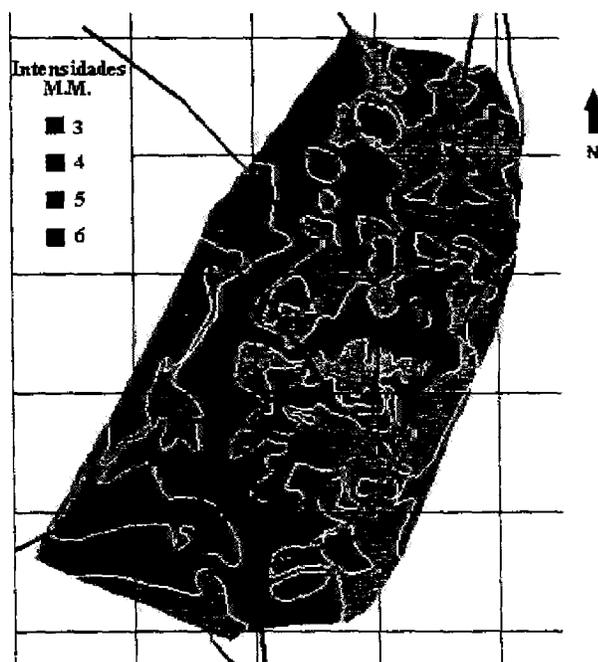


FIGURA 3.2 MAPA DE ISOSISTAS DE BOGOTÁ PARA EL SISMO DE TAURAMENA

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.

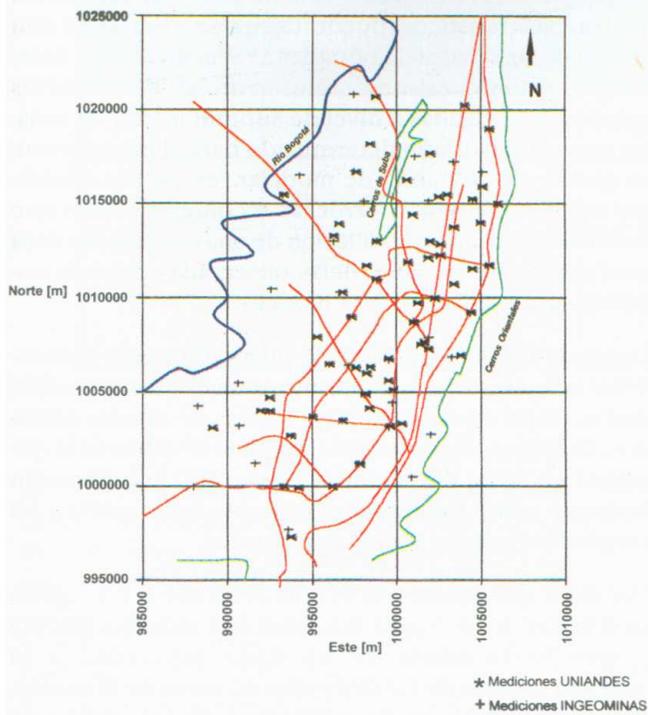


FIGURA 3.3 PLANO BÁSICO DE LA CIUDAD DONDE SE INDICAN LOS PUNTOS SELECCIONADOS PARA EL REGISTRO DE MICROTREPIDACIONES

Considerando la información geológica y geotécnica disponible dentro del marco del presente proyecto se elaboró 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 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)

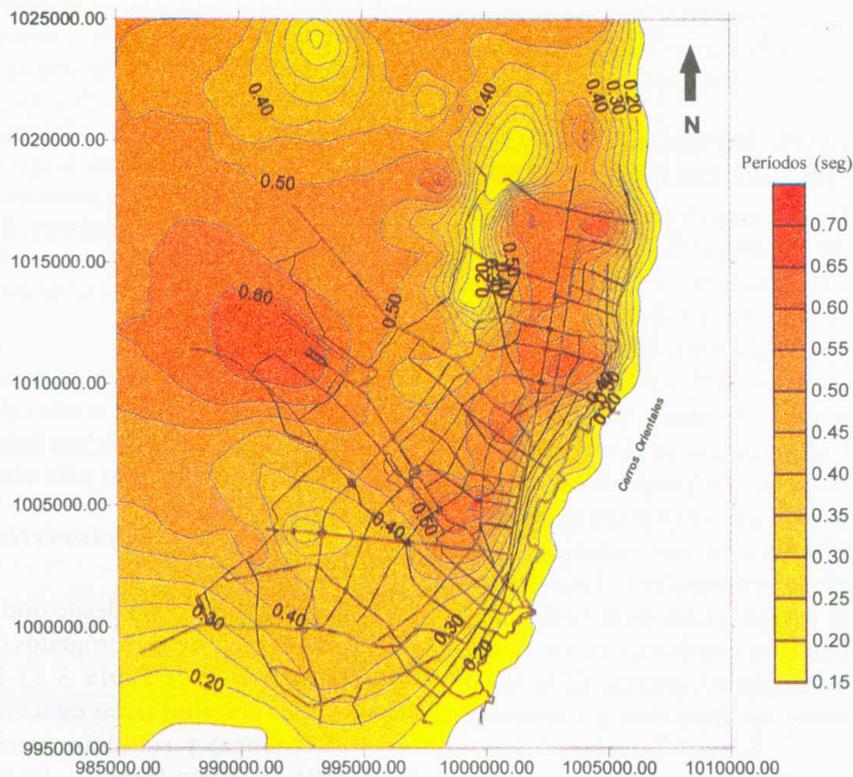


FIGURA 3.4 PERÍODOS DE VIBRACIÓN DOMINANTES A PARTIR DE MICROTREPIDACIONES

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 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 con diferente respuesta dinámica. 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, es 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 de Colombia (RSNC) y que 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 180m, existe un acelerógrafo en superficie y se cuenta con toda la información geotécnica necesaria para adelantar el modelo antes mencionado. Desafortunadamente era el único punto de suelo blando que estaba instrumentado en la ciudad en el momento de la realización del proyecto y no se disponía 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 contó con las estaciones del Rosal cerca a Facatativá y de San Rafael cerca a la Calera, 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 Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNA), 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	MAGNITUD	DISTANCIA EPICENTRAL (KM)*
1	Páez	6/6/94	Superficial	6.4	292.5
2	Tauramena	1/19/95	15	6.5	141.8
3	Calima	2/8/95	100	6.6	297.3
4	Ecuador	10/21/95	33	6.1	879.0

*Distancia epicentral aproximada a la Estación INGEOMINAS

TABLA 3.1 EVENTOS SÍSMICOS UTILIZADOS EN EL 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 se obtienen algunas observaciones preliminares de importancia:

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

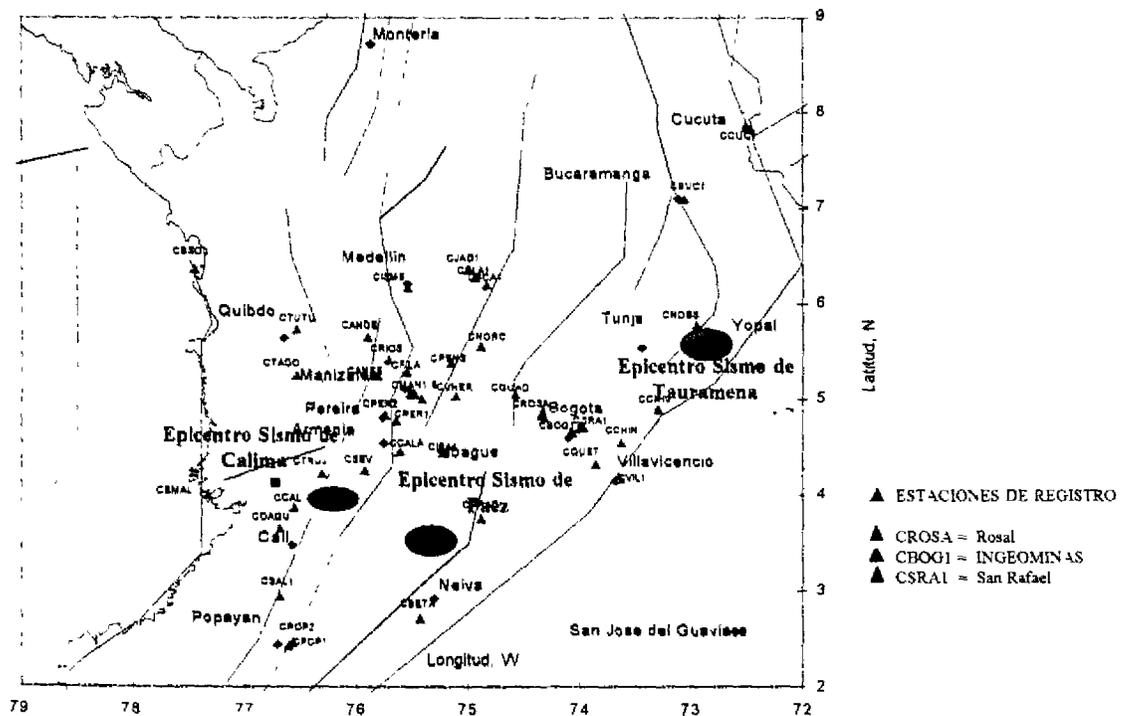
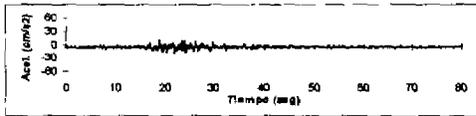
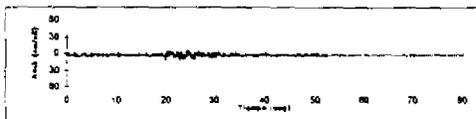


FIGURA 3.5 UBICACIÓN DE LOS EPICENTROS DE LOS SISMOS UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO Y LAS ESTACIONES DE LA RED SISMOLÓGICA NACIONAL

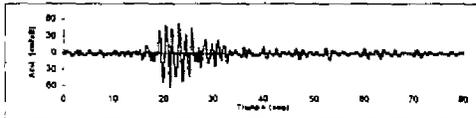
ESTACION SAN RAFAEL



ESTACION EL ROSAL



ESTACION INGEOMINAS



ESPECTROS DE RESPUESTA

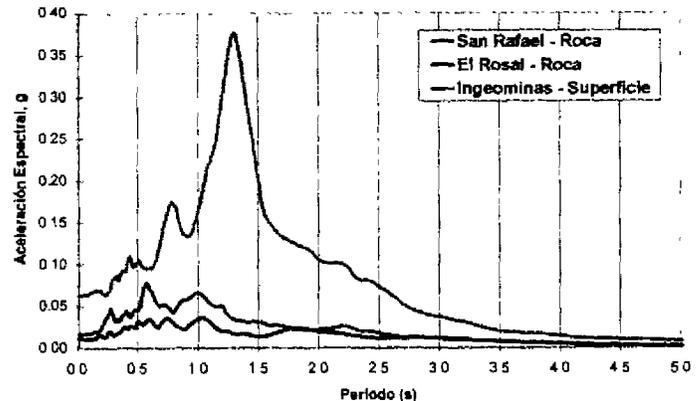


FIGURA 3.6 COMPARACIÓN DE LAS COMPONENTES EW REGISTRADAS EN EL SISMO DE TAURAMENA Y SUS RESPECTIVOS ESPECTROS DE RESPUESTA

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 ca-

racterización geotécnica detallada del perfil estratigráfico en el sitio de INGEOMINAS.

El depósito de suelo está dominado por arcillas blandas típicas de la sabana con capas localizadas de turbas, intercalados por una capa 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 70m 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 señal sísmica de entrada. En el capítulo anterior se presentaron las características principales del depósito mencionado tales como la estratigrafía 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 al corte 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.

3.2.3 Respuesta frecuencial en la estación INGEOMINAS

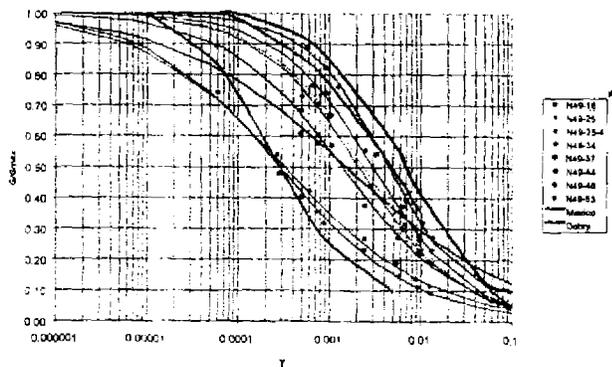
Los datos disponibles se analizan en relación con la amplificación que ocurre en los depósitos de suelo blando de la ciudad y con los cambios de contenido frecuencial que sufre la señal.

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 empleó el programa de computador SHAKE91 (Idriss et al, 1992) 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 estas sean compatibles con el nivel de deformación por cortante impuesto por el sismo.

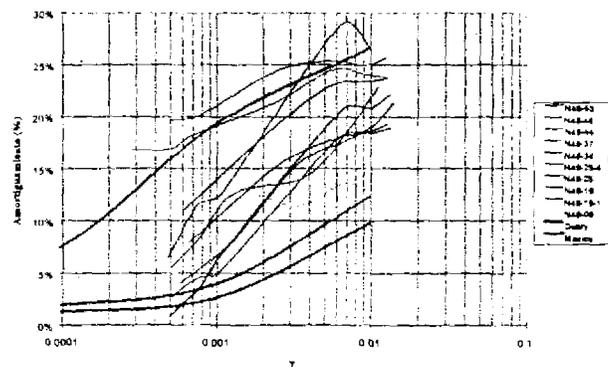
Existe una concordancia aceptable entre los períodos predominantes que representarían los períodos de vibración de los modos fundamentales obtenidos mediante el análisis del factor dinámico de amplificación del modelo unidimensional desarrollado y las funciones de transferencia empíricas basadas en los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

Para el análisis de la respuesta del modelo se utilizaron las señales disponibles en la estación del Rosal y las existentes 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.

CURVAS DE G/G_{max} CONTRA DEFORMACIÓN POR CORTANTE OBTENIDAS A PARTIR DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO



CURVAS DE AMORTIGUAMIENTO CONTRA DEFORMACIÓN POR CORTANTE OBTENIDAS A PARTIR DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO



* Muestras del sondeo de Ingeominas (N49). El siguiente número indica el número de la muestra.

FIGURA 3.7 GRÁFICAS DE DEGRADACIÓN DE LA RIGIDEZ Y DE AMORTIGUAMIENTO EN FUNCIÓN DE LA DEFORMACIÓN POR CORTANTE

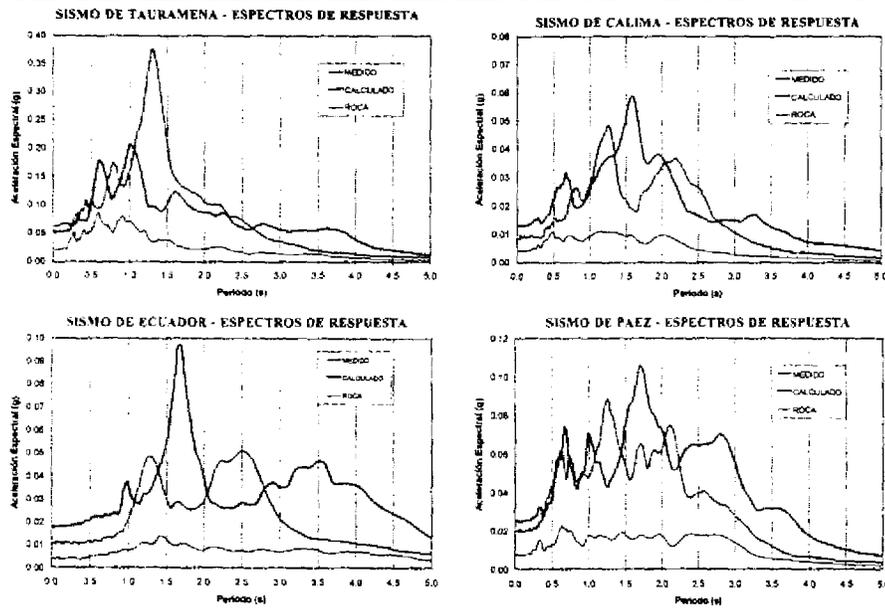


FIGURA 3.8 COMPARACIÓN DE LAS RESPUESTAS TEÓRICAS OBTENIDAS MEDIANTE EL MODELO UNIDIMENSIONAL

La amplificación de la aceleración, que era 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 con 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

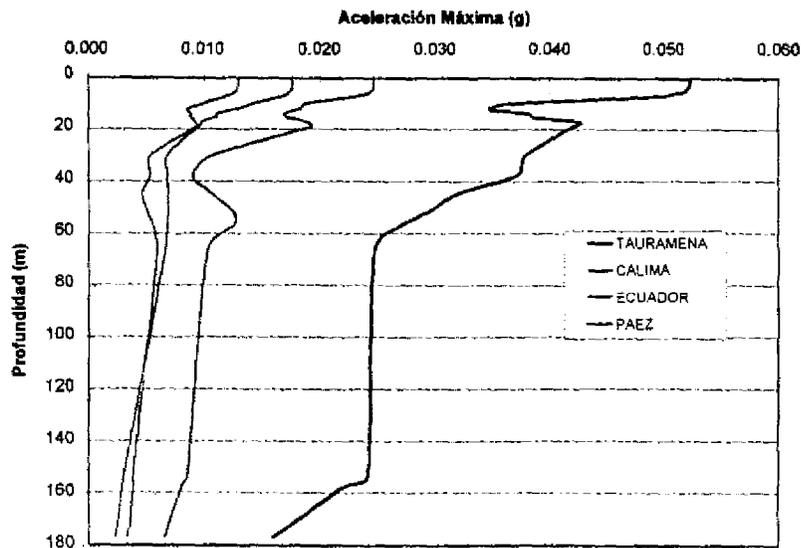


FIGURA 3.9 VARIACIÓN DE LA ACCELERACIÓN MÁXIMA DE RESPUESTA CON LA PROFUNDIDAD PARA LOS CUATRO SISMOS DE CALIBRACIÓN

la aceleración límite resulta del orden de 0.22g, para la señal del sismo de Calima es del orden de 0.21g, para la señal del sismo de Ecuador y del sismo de Páez es del orden de 0.30g. En términos generales puede afirmarse que 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 caracterizada 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 al menos 6 km. Al comparar esta dimensión longitudinal con la profundidad máxima (300 m) resulta prácticamente 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 et al, 1988) se considera que la respuesta del subsuelo de Bogotá puede estudiarse esencialmente mediante los modelos unidimensionales descritos.

De acuerdo con esto el análisis se planteó mediante la respuesta dinámica unidimensional de los sitios donde se realizaron los sondeos y en otros donde se conocía la estratigrafía.

Como se mencionó anteriormente se realizaron 38 perforaciones estratégicamente escogidas en distintas zonas de la ciudad y a profundidades que variaron entre 20 m y 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 grava arenosa 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 elástico 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 unidimensionales, compresiones confinadas, mediciones de velocidad de onda cortante (Bender Element) y de propiedades índice. 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 sirvieron de base para analizar todos los modelos unidimensionales de los perfiles de suelo utilizados en el proyecto.

3.3.4 Análisis de respuesta dinámica

Con el procedimiento descrito anteriormente se realizó el análisis de respuesta dinámica en todos los sitios disponibles, utilizando los sismos de diseño.

En la Figura 3.10 se presenta 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 reducción 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. Además, 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 tendrá pre-