

FIGURA 3.10 MAPA DE ISOPERIODOS FUNDAMENTALES DEL DEPÓSITO

dominio de la respuesta para los períodos (o frecuencias) en los 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 presenta un comportamiento dinámico diferente, se seleccionaron los sondeos más representativos de cada zona y aquellos que llegaron a mayores profundidades.

Los sondeos seleccionados como típicos de las diferentes zonas de la ciudad se muestran en la Tabla 3.2.

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, cuando esta esté por encima de un valor dado.

CÓDIGO DEL SONDEO	LOCALIZACIÓN	PROFUNDIDAD (M)
N9A	Cil. 126 - Cra. 29	190
N14	Av. Cundinamarca - Cil. 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 TIPICOS

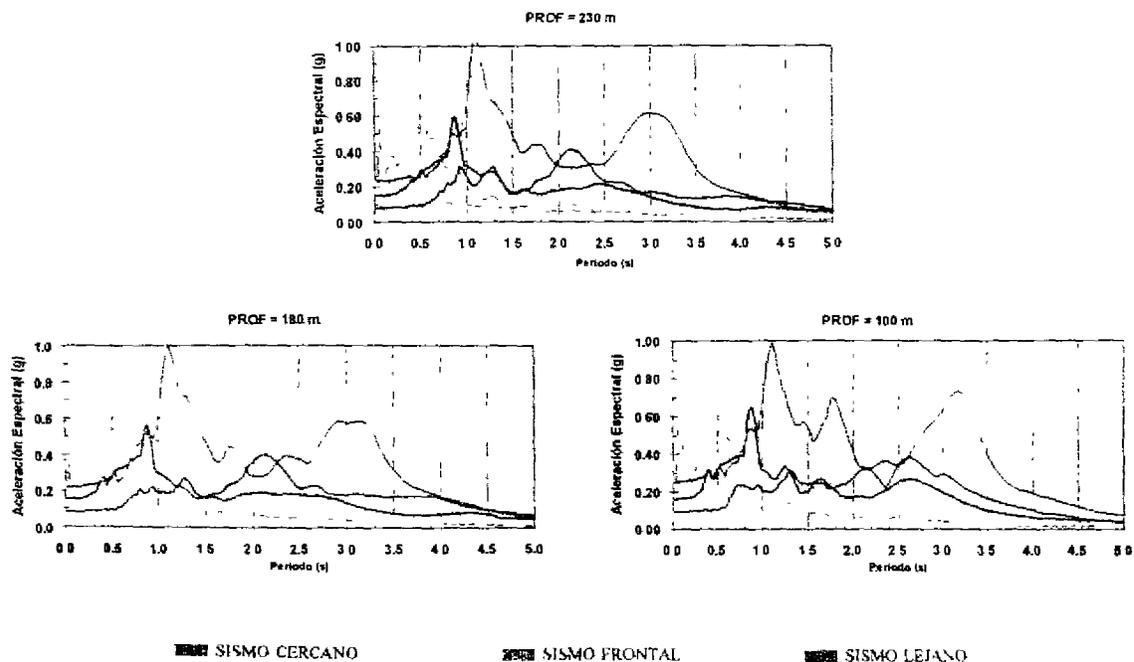


FIGURA 3.11 ESPECTROS DE RESPUESTA PARA EL SONDEO No.49 - INGEOMINAS

Finalmente y para estudiar lo que pasa a medida que la profundidad del depósito disminuye, es decir en cercanías a los cerros y suponiendo que el tipo de suelo se mantiene similar a los existentes en las zonas de mayor profundidad (lo cual se ha encontrado que no es del todo cierto), se seleccionó 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, cuando 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 particulares 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 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 geoméricamente. 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 recurrió 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 estado plano de deformaciones resulta válida. Para el caso de la geometría de la cuenca de Bogotá, podría

FIGURA 3.12
ESPECTROS DE RESPUESTA PARA EL SONDEO N49 - INGEOMINAS
SUPONIENDO BASAMENTO ROCOSO A POCA PROFUNDIDAD

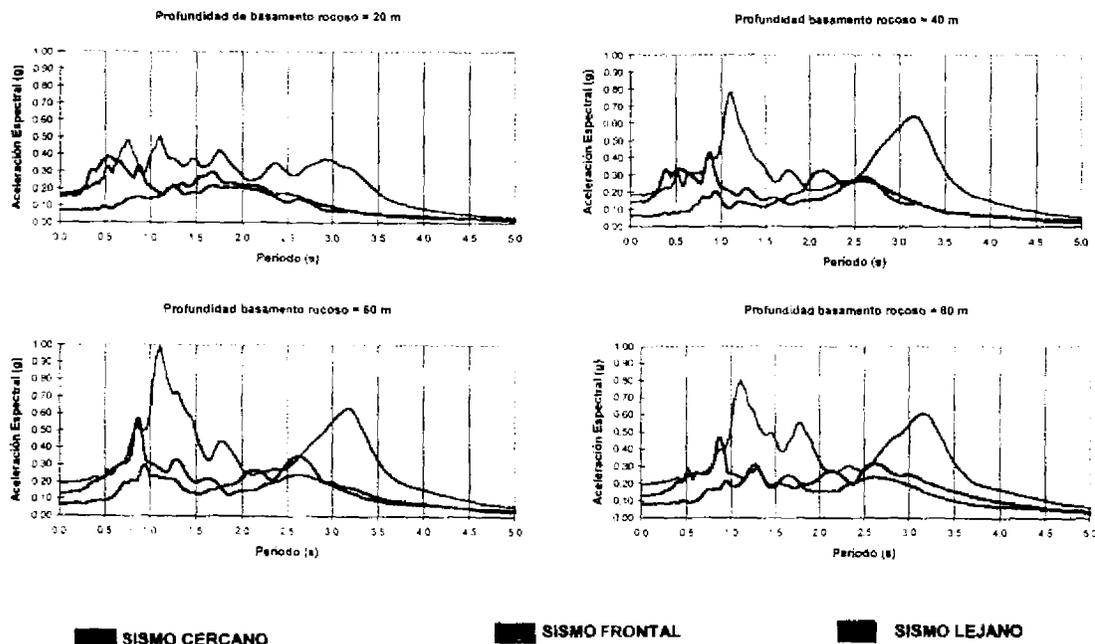


FIGURA 3.12 RESULTADOS OBTENIDOS CON ESPESORES DE PROFUNDIDAD 20,40,60, 80M.
MANTENIENDO LAS CARACTERÍSTICAS DEL SONDEO DEL INGEOMINAS

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 calle 127 y la Quebrada Torca 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. El análisis se llevó a cabo mediante el programa de computador QUAD4M. Este programa 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 0.20g y el Sismo Cercano con aceleración máxima de 0.25g).

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.

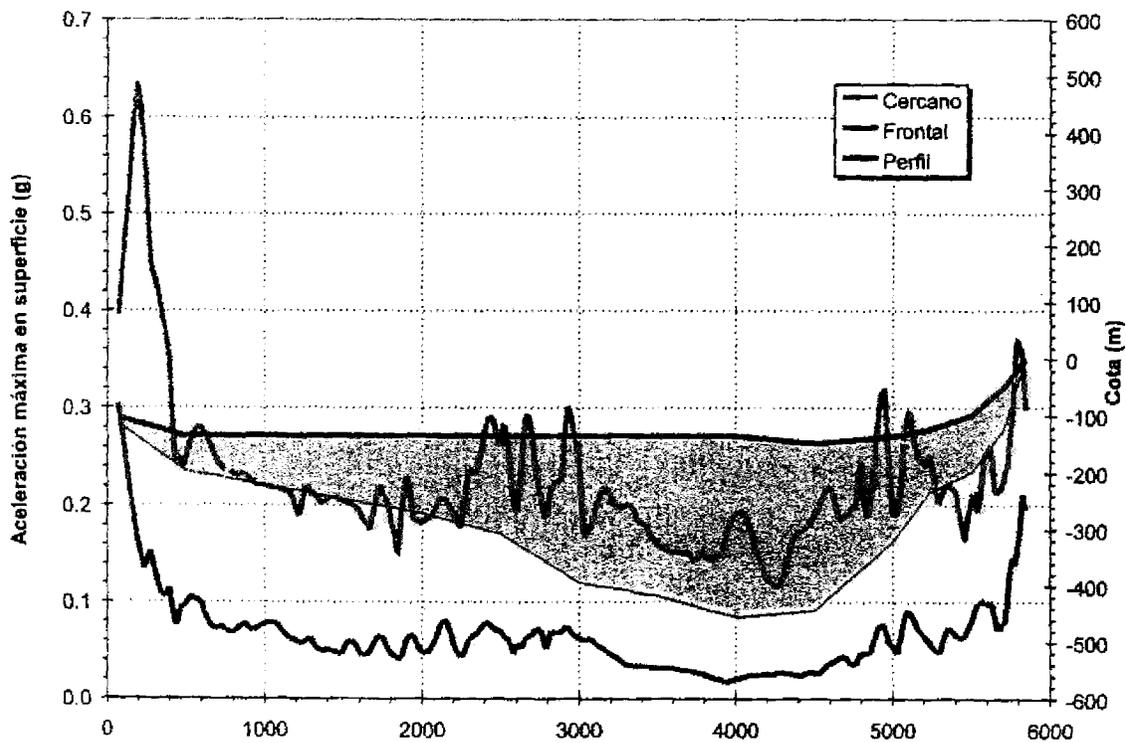


FIGURA 3.13 FORMA DE LA CUENCA UTILIZADA EN EL ANÁLISIS Y LAS ACCELERACIONES MÁXIMAS DE RESPUESTA EN SUPERFICIE PARA CADA UNO DE LOS SISMOS

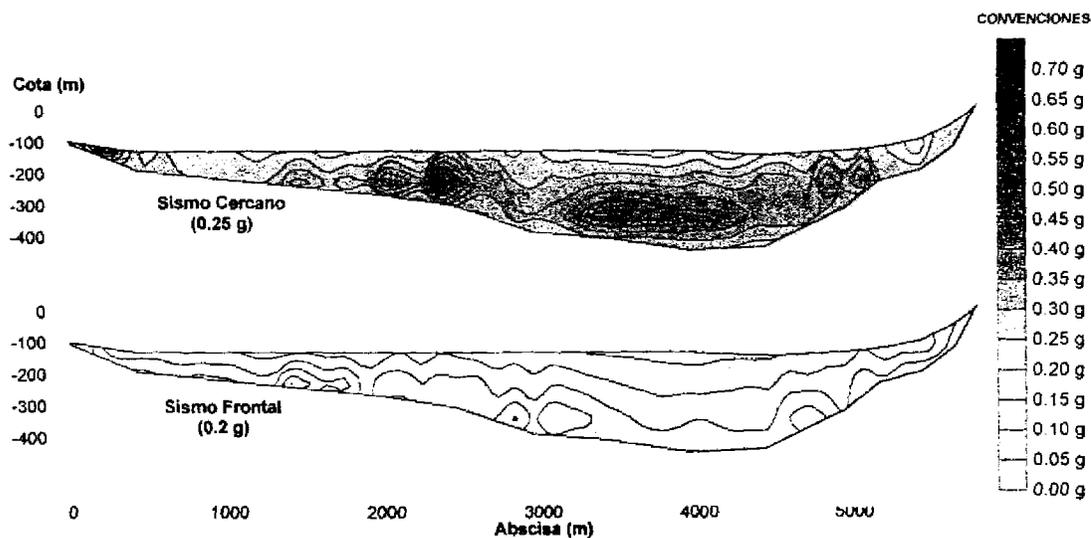


FIGURA 3.14 MAPAS DE ISOACELERACIONES HORIZONTALES MÁXIMAS EN LA SECCIÓN DE ANÁLISIS PARA CADA UNO DE LOS SISMOS

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.

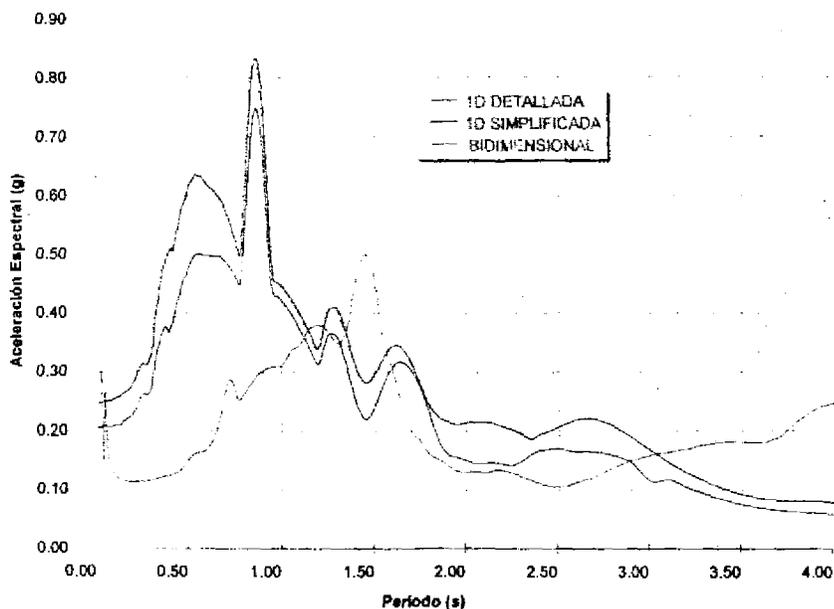


FIGURA 3.15 ESPECTROS DE RESPUESTA SONDEO N48 UNIAGRARIA SISMO CERCANO (0.25g)

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 G_0 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, V_s . Se conforma-

ron así tres modelos diferentes con aproximadamente 300 elementos cada uno. El análisis se realizó utilizando el programa de computador QUAD4M, 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), estos incluyen una gráfica con la aceleración máxima horizontal 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:

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.

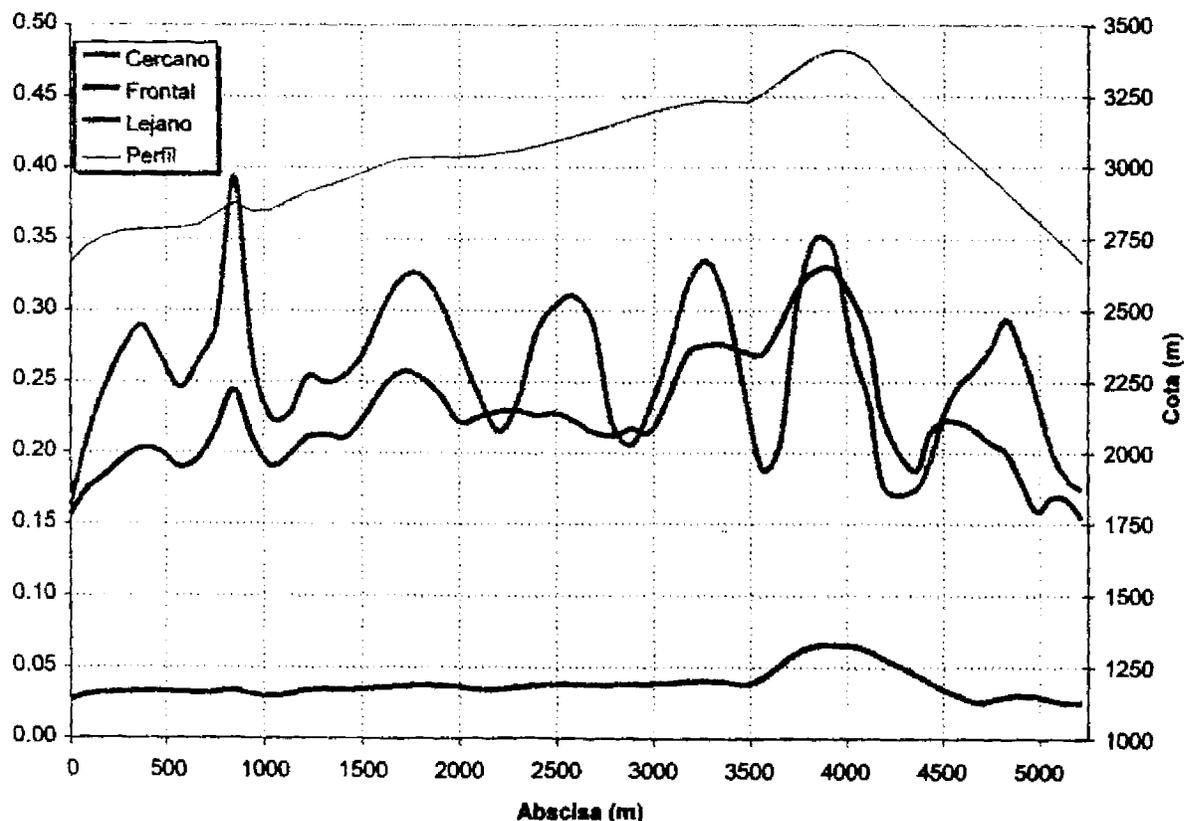


FIGURA 3.16 CORTE No. 3 QUEBRADA BOLONIA ACCELERACIONES MÁXIMAS EN SUPERFICIE PARA SISMO DE DISEÑO

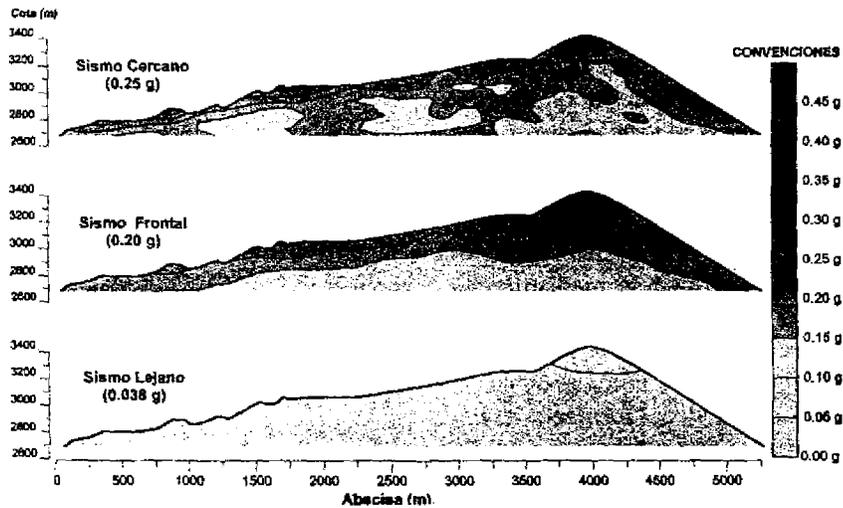


FIGURA 3.17 CORTE No. 3 QUEBRADA BOLONIA MAPAS DE ISOACELERACIONES MÁXIMAS PARA SISMOS DE DISEÑO

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 mismas 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 de 0.20g, puede llegar a producir una aceleración máxima en la superficie del orden de 0.30g. Una aceleración del orden de 0.25g puede llegar a producir por su parte una aceleración máxima en sitios específicos del talud del orden de 0.30g ó 0.35g.

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.

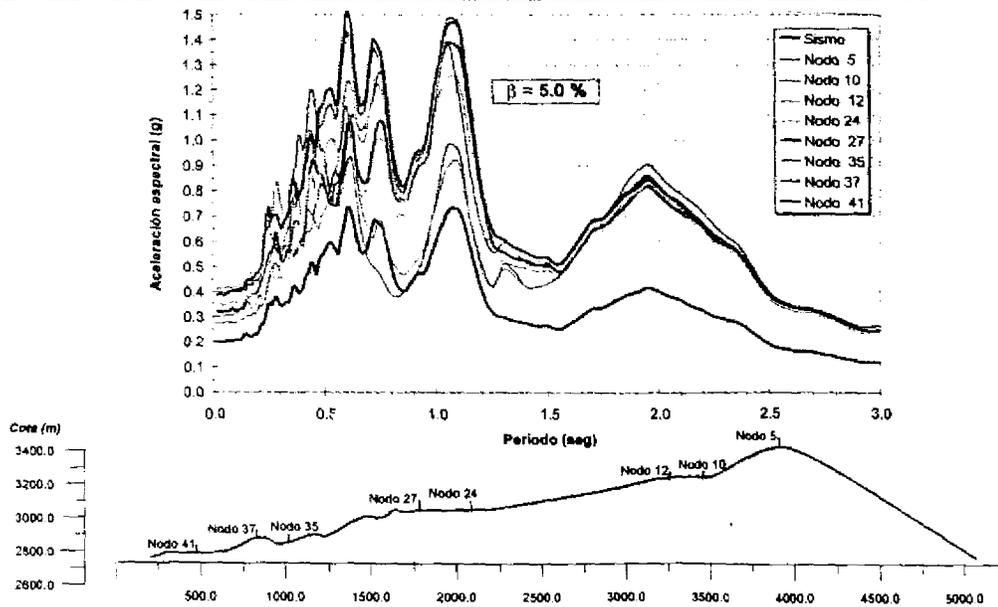


FIGURA 3.18 CORTE No. 3 QUEBRADA BOLONIA SISMO FRONTAL (0.20g) ESPECTROS DE RESPUESTA

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 - Mapa No. 3 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 que se encuentra en la Figura 3.20. Requiere estudios especiales de amplificación y estabilidad para la construcción de obras.

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 elevada 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 aparecer 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 capacidad portante ma-

yor 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 de una mejor delimitación de la zona 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 una alta susceptibilidad a la licuación ante la ocurrencia de un sismo intenso. Debe evaluarse específicamente el potencial de licuación 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 G_0 .

Cada zona se caracteriza por una respuesta sísmica diferente al considerar el espectro de diseño que se recomienda para cada una de ellas. En las Figuras 3.21 a 3.25 se han agrupado los espectros de respuesta de los sondeos que quedan ubicados en cada una 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 3.26 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 considerando un suelo S4 (AIS, 1996), o sea un coeficiente de suelo igual a 2.0.

La zona con períodos superiores a 2.5 seg que corresponde en general a estructuras muy especiales, de alto período 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 este efecto se utilizan las recomenda-

