

## **Aportes de los estudios de respuesta sísmica local a la actualización de la microzonificación sísmica de Bogotá\***

### **Contribution to the seismic response studies to update Bogotá's local seismic microzonification**

Edgar Eduardo Rodríguez Granados\*\*

#### **RESUMEN**

Al hacer las comparaciones entre los resultados obtenidos a partir de estudios de respuesta sísmica local para sectores del norte de Bogotá y los resultados obtenidos mediante la microzonificación sísmica de la ciudad, del año de 1997, se han encontrado variaciones en cuanto a los valores de aceleración espectral. Además se ha encontrado que la forma y el tamaño de los espectros recomendados por la Microzonificación Sísmica de Bogotá (MZSB) han generado sobredimensionamientos significativos en cuanto a la construcción de estructuras y su refuerzo, lo cual resulta importante en los costos de construcción.

El objetivo de los estudios realizados es modificar los espectros de diseño dados por la MZSB para los sectores 2 (Piedemonte), zona 3 (Lacustre A) y zona 4 (Lacustre B), mediante nuevos estudios de análisis dinámico, teniendo en cuenta los nuevos estudios geotécnicos de estos sectores, el material encontrado, sus cambios morfológicos y ambientales y su variación o cambio de un lugar a otro, lo cual hace que la respuesta dinámica del suelo tenga variaciones.

**Palabras clave:** Microzonificación, Bogotá, Sísmica.

#### **ABSTRACT**

There have been variations in the values of spectral acceleration when comparing the results obtained from studies of local seismic answer in the Bogotá northern sectors, with those obtained by means of the Seismic Micro-Zonification of Bogotá (MZSB) in the year 1997. Besides, there has been found that the form and the size of the spectra recommended by the MZSB, have generated significant over dimensions as for the structures construction and reinforcement, which becomes important in the costs construction.

The studies objective is to modify the design spectra given by the MZSB on the sectors 2 (Foothill), area 3 (Lacustrine TO) and the area 4 (Lacustrine B), by the dynamic analysis new studies, bearing in mind the new sectors geotechnic studies, the material found, their morphological and environmental changes and their modifications from a place to another, which derives in a variation in the soil dynamic answer.

**Key words:** Microzonification, Bogotá, Seismic.

\* Ponencia presentada en el Primer Seminario de Ingeniería sísmica - UPTC, 2005.

\*\* Ingeniero Civil, M.Sc. en Geotecnia, Especialista en Ingeniería Sísmica, Profesor Asistente Universidad Nacional de Colombia. Gerente de Ingeniería y Georriesgos IGR LTDA, Bogotá, correo. e.: eerg@etb.net.co

## INTRODUCCIÓN

Finalizado el *Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá* (MZSB) [1], se logró su reglamentación mediante el Decreto 074 de la Alcaldía de Bogotá, que fijó el uso obligatorio de los espectros de respuesta de la MZSB. La aplicación de dicho decreto ha permitido la reducción de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico de los diferentes tipos de estructuras que se están construyendo y reforzando en la ciudad, pero también se ha observado que la forma y el tamaño de algunos de los espectros de respuesta recomendados, principalmente para las zonas planas de origen lacustre de la ciudad, generaron incrementos importantes en los costos de construcción.

Teniendo en cuenta que el Decreto 074 también permite como alternativa la realización de «estudios de respuesta sísmica local - RSL», con el fin de evaluar en una forma más detallada los espectros de respuesta de diseño, durante los últimos 5 años se ha realizado una gran cantidad de estos estudios de respuesta local, aplicados a la revisión de la vulnerabilidad sísmica y reforzamiento de estructuras ya existentes (edificios de diferente tipo, puentes, plantas eléctricas y de acueducto, redes matrices de acueducto, etc.) y para diseño de estructuras nuevas (principalmente edificios y puentes).

Enmarcados en esta alternativa, varias entidades, públicas y privadas, han desarrollado este tipo de estudios; dentro de ellas se puede mencionar el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), CODENSA ESP, varias de las Secretarías de la Alcaldía Mayor, diferentes entidades privadas y otras más.

Los resultados obtenidos muestran que en muchos casos los espectros de respuesta de estos estudios RSL presentan formas con valores inferiores, tanto en la aceleración espectral ( $S_a$ ) como en la amplitud de periodos

de la meseta del valor máximo de  $S_a$ . Debido a esto, en la actualidad diferentes agremiaciones, entidades públicas, universidades, consultores y constructores han planteado la necesidad de revisar y actualizar la MZSB, para que se establezcan espectros de respuesta y delimitaciones de zonas sísmicas más acordes con el nuevo conocimiento que se tiene del comportamiento dinámico del subsuelo de la ciudad y con las modernas metodologías de análisis dinámico.

## 1. ESPECTROS DE RESPUESTA PARA DISEÑO

Con base en los resultados obtenidos en estudios de respuesta dinámica del subsuelo para varios puentes y algunas edificaciones de la ciudad, se evaluaron las propiedades dinámicas de los suelos finos de la ciudad y las formas típicas de los espectros de respuesta para los depósitos de suelo, y se encontraron diferencias notables con los datos por la MZSB.

Para discutir sobre la respuesta dinámica de los suelos blandos de la ciudad hay que recurrir a los estudios desarrollados desde mediados de la década de los noventa. El primero y más conocido, «Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá - MZSB» [1], consideró que la ciudad se divide en cinco zonas, con diferente respuesta sísmica del subsuelo (figura 1).

En la mayoría de los casos, los espectros de respuesta obtenidos resultaron más grandes (tanto en aceleración espectral como en ancho de periodos dominantes) que los empleados antes, a partir de la Norma NSR-98.

La normatividad vigente a partir de los resultados de ese estudio se oficializó con el Decreto 074 del 30 de enero de 2001 de la Alcaldía Mayor de Bogotá, que complementa y modifica el Código de Construcción de Bogotá D.C., identifica los límites de la Microzonificación Sísmica y adopta los espectros de diseño de las cinco zonas.

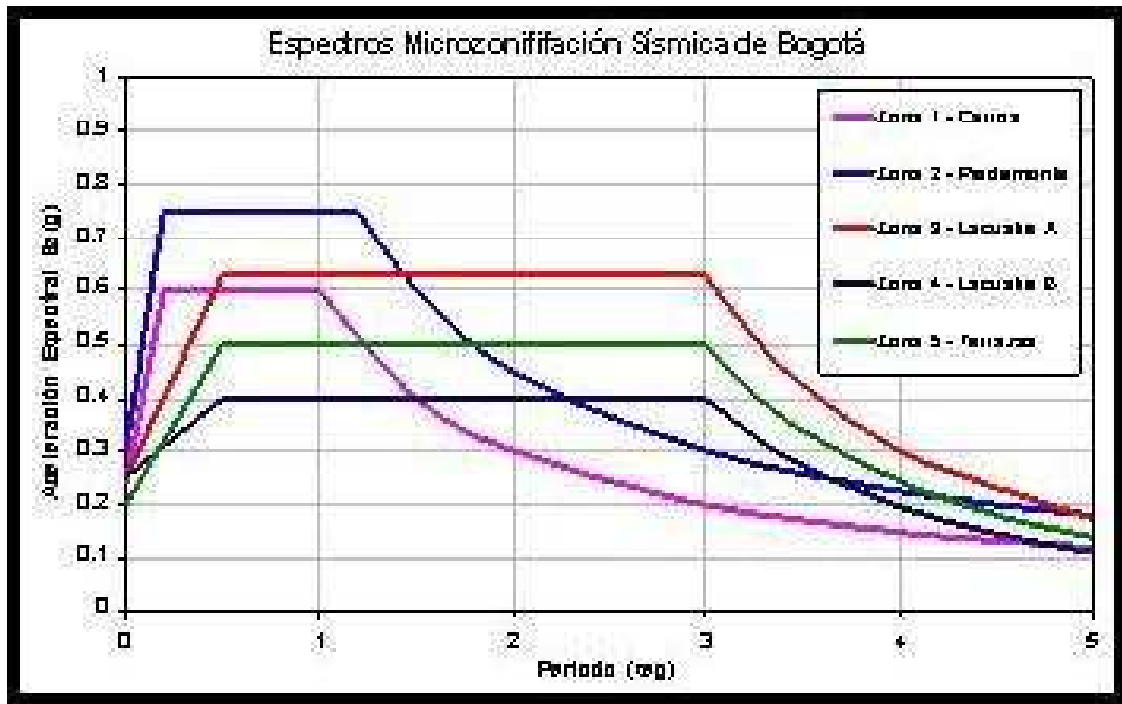


Fig 1. Espectros de diseño obtenidos del Estudio de Microzonificación Sísmica de Bogotá y recomendados por el Decreto 074.

En resumen, el Decreto 074 presenta para cada zona dos tipos de espectros que pueden emplearse:

· Cuando solo se hace el estudio convencional de suelos para las estructuras, se debe emplear el «artículo cuarto» para definir los coeficientes espectrales necesarios en el diseño estructural. Es decir, se recurre a la sectorización y formas espectrales dadas por la Microzonificación Sísmica de Bogotá.

· Como alternativa, cuando se hacen estudios de respuesta dinámica local, que deben cumplir ciertas condiciones mínimas, se emplea el «artículo quinto», donde se dan los coeficientes espectrales mínimos para el diseño estructural, «...si se demuestra que fueron obtenidos utilizando mejor información proveniente de estudios detallados de propagación de onda sísmica a través del subsuelo existente bajo el sitio o de incidencia de la topografía del lugar...».

En definitiva, «el espectro de diseño suavizado superficial, adoptado dependiendo de la zona en que se encuentre, no puede en ningún caso ser menor que el espectro mínimo de diseño y sus coeficientes espectrales relacionados en...». En la Figura 2 se muestra la forma de los espectros de diseño recomendados para las zonas 2 (Piedemonte), 3 (Lacustre A) y 4 (Lacustre B), los cuales serán tema de discusión en este trabajo.

Teniendo en cuenta que el artículo décimo del Decreto 074 establece que «los artículos del presente Decreto deben ser revisados durante los tres meses siguientes a cada año de su vigencia, por la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de la Secretaría de Gobierno, a través del Fondo de Prevención y Atención de Emergencias, FOPAE, según la información obtenida de la Red de Acelerógrafos de la ciudad», desde el año 2002 la Sociedad Colombiana de Geotecnia (SCG), la Asociación

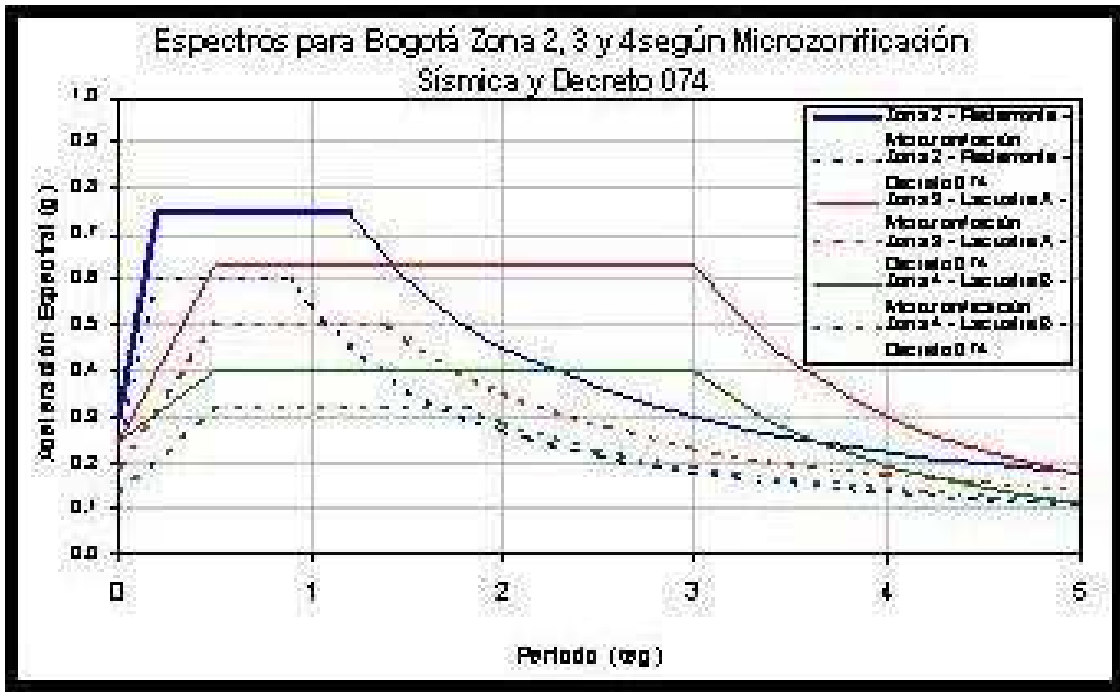


Fig 2. Espectros de diseño recomendados para las zonas 2, 3 y 4 de la Microzonificación, y mínimos recomendados por el Decreto 074.

Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) y varios consultores en el tema han presentado sugerencias de modificaciones al DPAE, con base en los resultados arrojados por varios estudios de respuesta sísmica local realizados en diferentes sitios de la ciudad. Sin embargo, hasta el momento no se ha oficializado ninguna modificación sobre las formas espectrales del mencionado decreto, aunque ya existe un borrador de documento para la modificación.

De este tema surge un primer punto de discusión, relacionado con los aspectos sismo-geotécnicos de los suelos arcillosos blandos y las estructuras apoyadas en ellos, en especial sobre los parámetros sísmicos para diseño (espectros de respuesta). En el gremio de la ingeniería se mencionan posibles sobrecostos de construcción debido al sobredimensionamiento de los espectros de respuesta de la norma, especialmente para las zonas 2, 3 y 4, que corresponden a las de mayor actividad de

construcción en la ciudad. Por lo tanto, a partir de varios resultados de estudios de respuesta local, en el capítulo 4 de este trabajo se presentan las formas típicas encontradas para las curvas dinámicas de los suelos y para los espectros de las zonas 3 y 4.

### Comportamiento dinámico de suelos finos

Los modelos de comportamiento dinámico de suelos finos y su asociación con las aplicaciones para *software* especializado de respuesta dinámica han evolucionado desde los años setenta, cuando Seed e Idriss [2] presentaron las curvas únicas que relacionaban la resistencia al corte no drenada ( $S_u$ ) y la relación de amortiguamiento ( $b$ ) en función de la deformación por corte ( $S_u - g$ , y  $b - g$ ), con lo cual se consideraba que los suelos finos eran independientes de la plasticidad u otro parámetro geotécnico. Dado que posteriormente se presentó una evolución de la

investigación en este tipo de materiales, a continuación se muestran las principales curvas dinámicas que se emplean en la actualidad, útiles en caso de Bogotá.

**Modelo de curvas de Dobry y Vucetic [3] – DV.** Los efectos dañinos del sismo de México en 1985 sobre muchas estructuras apoyadas en depósitos de arcillas blandas generaron varias investigaciones del comportamiento dinámico de estos suelos, las cuales fueron finalmente compiladas por Dobry y Vucetic [3], quienes muestran que el Índice de Plasticidad (IP) incide fuertemente en la forma de degradación del módulo de corte y de la relación de amortiguamiento. En resumen, presentan una serie de curvas en función de IP, que se muestran en las figuras 3 y 4, mediante líneas discontinuas.

Este modelo de comportamiento contribuyó a mejorar el entendimiento de la respuesta dinámica de los depósitos de suelos finos y explicaron muchos aspectos relacionados con los efectos de resonancia entre el evento sísmico y el depósito de suelo, ocurridos en algunos sectores de Ciudad de México durante el sismo de 1985.

**Modelo de curvas de la Microzonificación Sísmica de Bogotá (MZSB).** Dentro del estudio de MZSB se desarrolló por primera vez la investigación del comportamiento dinámico de los suelos de la ciudad, empleando muestras inalteradas. Se realizaron más de 100 ensayos triaxiales cíclicos (a grandes deformaciones) y bender element (a pequeñas deformaciones), que permitieron definir una serie de curvas típicas en función del IP. Dado que en ese momento no fue posible hacer ensayos de columna resonante, para cubrir todo el rango de deformaciones de las curvas, fue necesario establecer correlaciones de interpolación entre los resultados de ambos tipos de ensayos.

En las figuras 3 y 4 se muestran las curvas de variación del módulo de corte y de la relación de

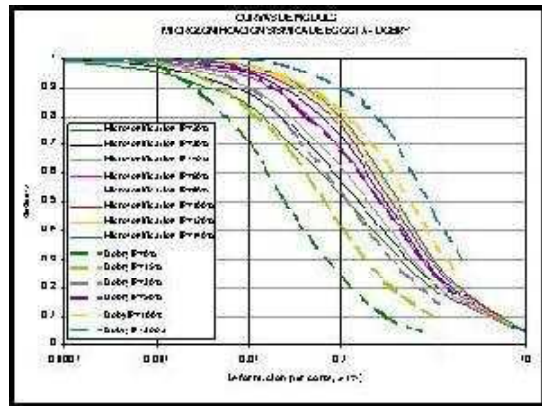


Fig 3 Variación del módulo de corte con la deformación por corte, en función del Índice de Plasticidad. Dobry-Vucetic (1991) y UniAndes-Ingeominas (1997).

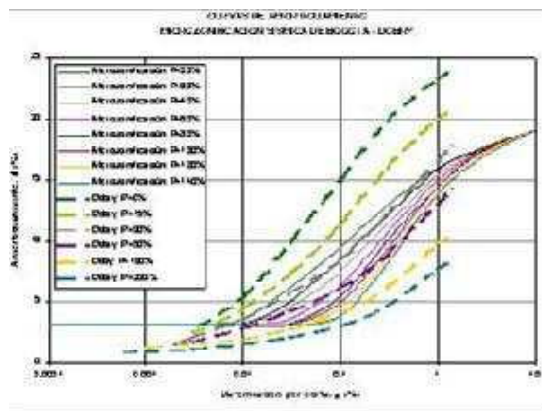


Fig 4 Variación de la relación de amortiguamiento con la deformación por corte, en función del Índice de Plasticidad. UniAndes-Ingeominas [1] y Dobry-Vucetic [3].

amortiguamiento en función de la deformación por corte, para diferentes valores de IP (líneas continuas).

Adicionalmente, puede establecerse una comparación entre las formas de las curvas de DV con las de MZSB (corresponden los colores para valores similares de IP). En general, las curvas de la MZSB presentan una franja con un ancho menor concentrado en la zona central

de las curvas de DV, pero con la particularidad de que para grandes deformaciones por corte ( $> 0,1\%$ ) tienden a unirse, mientras que las curvas de DV presentan separaciones muy amplias. Esto implica que para sismos severos, que generan grandes deformaciones al suelo, pueden presentarse resultados muy diferentes de respuesta dinámica del subsuelo, al emplear los dos tipos de modelos de suelo.

**Curvas obtenidas de estudios recientes en Bogotá.** Con el fin de revisar el comportamiento dinámico de los suelos finos del norte de la ciudad, se aprovechó parte de la información más reciente (entre los años 2001 y 2004), obtenida de los proyectos que realiza el IDU en la ciudad, enmarcados dentro del desarrollo vial, el monitoreo y la actualización de vulnerabilidad sísmica de los puentes vehiculares. En varios proyectos se han ejecutado perforaciones entre 50 m y 200 m de profundidad, con ensayos down hole hasta 100 m de profundidad, y una cantidad representativa de ensayos dinámicos de laboratorio (columna resonante, triaxial cíclico y bender element), con el objetivo de evaluar la respuesta dinámica del subsuelo y su relación con el comportamiento dinámico estructural.

La recopilación de información de las curvas de comportamiento dinámico ( $G/G_{\max}$  -g, y b - g) en función del IP para varios de los puentes vehiculares (calle 170 por Autonorte, calle 100 por Autonorte y calle 72 por Avenida NQS) se presenta en las figuras 5 y 6. Para facilitar el análisis comparativo en estas figuras se han superpuesto las curvas recomendadas por DV y MZSB, antes mencionadas.

Los principales aspectos encontrados en la degradación del módulo de corte ( $G/G_{\max}$ ) con la deformación por corte (g), figura 5, en los suelos estudiados, son los siguientes:

- No existe correlación directa y secuencial con el índice de plasticidad (IP).
- Los módulos de corte de los suelos finos de la zona más norte de la ciudad (calle 170) se

degradan con menores deformaciones que los correspondientes en sectores del norte-centro (calles 100 y 72).

- Los suelos finos de la calle 100 (principalmente arcillas-limosas) se asemejan al tramo de suelos de más alta plasticidad de los suelos de la MZSB. En cambio, los suelos del sector de la calle 170 (principalmente limos y limos arcillosos) se degradan mucho más que los dados por la MZSB, quedando todas las curvas prácticamente por debajo, lo cual implica que no se ajustan al modelo planteado por la norma, a pesar de que tanto los ensayos de la MZSB, como los de estos estudios se ejecutaron en el mismo laboratorio de suelos.
- Las curvas de DV tienen una franja muy amplia, comparada con los encontrados en los sectores estudiados, quedando espacios sin correspondencia en ambos extremos de la franja.

En cuanto a los principales aspectos encontrados en la variación de la relación de amortiguamiento (b) con la deformación por corte (g), figura 6, en los suelos estudiados se tiene lo siguiente:

- Tampoco se encontró una correlación directa y secuencial con el índice de plasticidad (IP).
- Los suelos finos de la zona más norte de la ciudad (calle 170) amortiguan menos que los correspondientes en sectores del norte-centro (calles 100 y 72), para grandes deformaciones. Para pequeñas deformaciones los amortiguamientos resultan más parecidos.
- Todos los suelos evaluados para los puentes presentan valores de amortiguamiento mucho mayores que los dados por la MZSB. Es decir, no corresponden con los modelos planteados por la norma vigente, lo que origina respuestas del subsuelo muy diferentes (aceleraciones horizontales

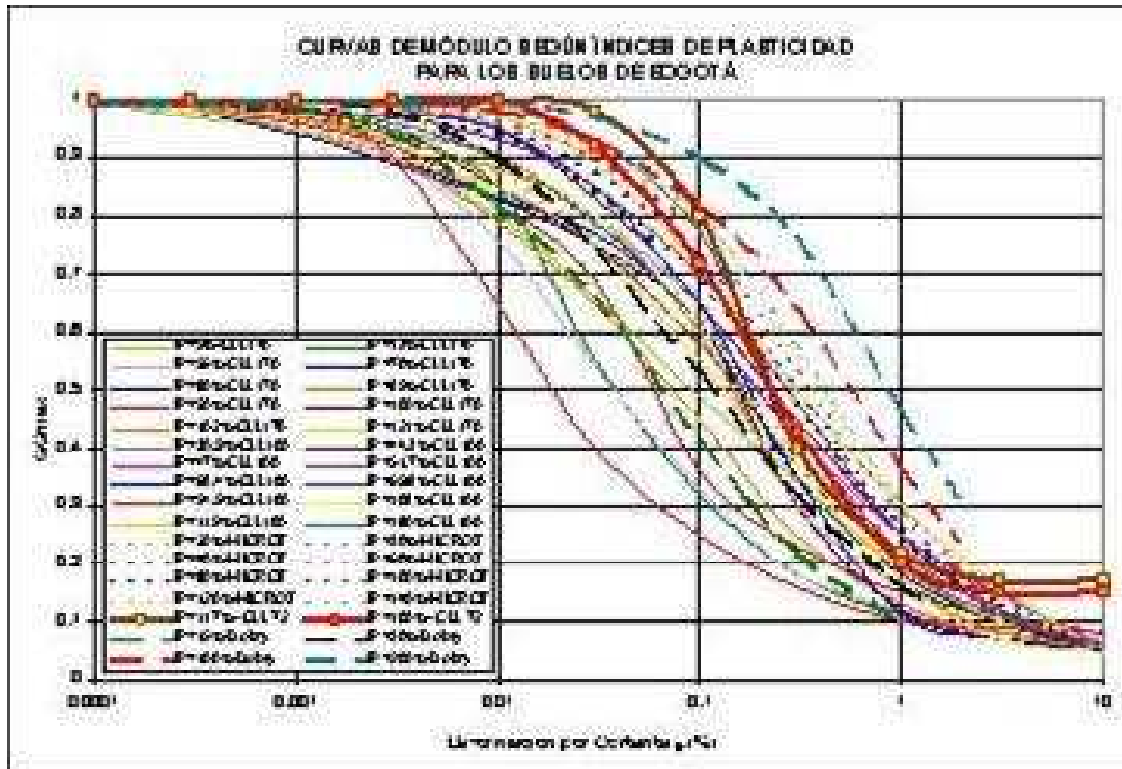


Fig 5. Variación del módulo de corte con la deformación de corte, en función del Índice de Plasticidad, a partir de ensayos realizados para puentes del IDU (2001 y 2004).

máximas y espectros de respuesta), a pesar de que los ensayos de la MZSB y de estos estudios se ejecutaron en el mismo laboratorio de suelos.

- Las curvas de DV tienen una franja muy amplia, comparada con los encontrados en los sectores estudiados, quedando espacios sin correspondencia en ambos extremos de la franja.
- La franja de las curvas del modelo de DV resulta mucho más amplia que todas las obtenidas para los suelos de Bogotá. En general, los suelos del norte de Bogotá quedan en la franja media de IP en las curvas de DV y se acercan a las curvas de IP muy altas de la MZSB.

Para analizar con mayor criterio la validez de las anteriores apreciaciones se debe tener en cuenta que los sismos fuertes o de diseño, empleados para evaluar la respuesta dinámica de los depósitos de suelo, generan deformaciones por corte máximas, que varían entre 0,05%  $\gamma$  a 0,3%, es decir, se ubican en el sector con mayores dispersiones de las curvas mostradas en las figuras.

## 2. RESPUESTA DINÁMICA DEL SUBSUELO EN ALGUNOS SECTORES DE BOGOTÁ

Los estudios de respuesta dinámica local (RSL) realizados para cumplir con el Decreto 074 deben considerar las tres fuentes tectónicas

activas que gobiernan la amenaza sísmica de la ciudad, es decir, una Fuente Local ( $A_{max} = 0,25$  g), la Fuente Regional o Falla Frontal de la Cordillera Oriental ( $A_{max} = 0,20$  g) y la Fuente Lejana o Zona de Subducción ( $A_{max} = 0,04$  g). Como acelerogramas de análisis, además de los sugeridos por la Microzonificación Sísmica de Bogotá y el Decreto 074, usualmente se emplean acelerogramas históricos (de fuentes sísmicas similares) y sintéticos.

### Características geotécnicas del subsuelo

Una recopilación de estudios geotécnicos recientes y la posterior reinterpretación del modelo geotécnico realizado para los puentes

del IDU en la Autopista Norte permitieron definir el perfil geotécnico mostrado en la figura 7.

Se observa que los depósitos cuaternarios, especialmente constituidos por suelos finos, presentan variaciones en la continuidad de los estratos, y los espesores totales pueden variar entre 150 m y 250 m, lo cual hace suponer que la respuesta dinámica del subsuelo puede cambiar de un sitio a otro.

Igualmente, resulta importante la presencia de algunas capas delgadas de turbas que muestran cambios ambientales y morfológicos pasados en este sector de la Sabana de Bogotá. Estos materiales también inciden en la respuesta dinámica del subsuelo.

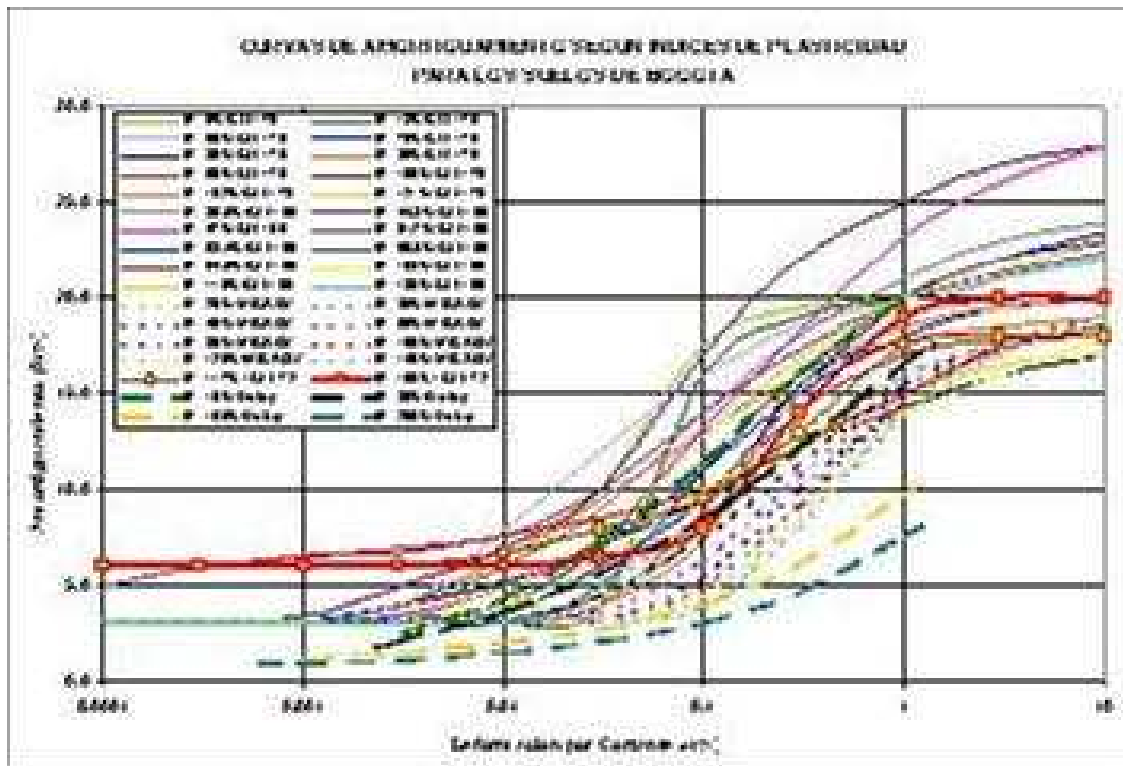


Fig 6. Variación de la relación de amortiguamiento con la deformación por corte, en función del Índice de Plasticidad, a partir de ensayos realizados para puentes del IDU (2001 y 2004).



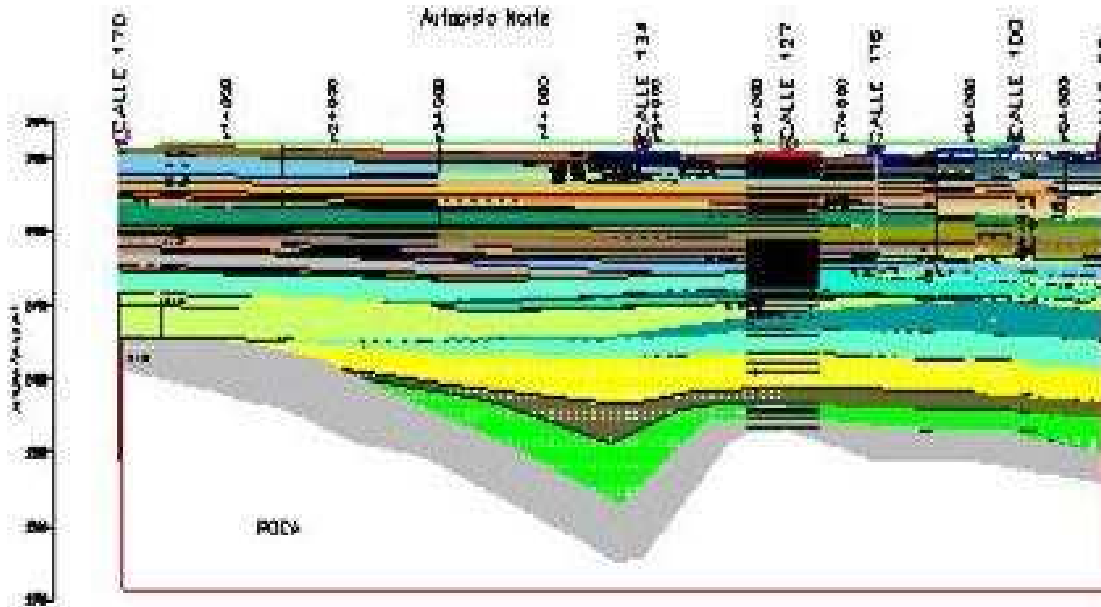


Figura 7. Perfil geotécnico por la Autopista Norte entre las calles 170 y 92 (CIF – Ingeniería y Georriesgos, 2002).

Una de las propiedades dinámicas básicas más importantes de estos materiales es la velocidad de propagación de las ondas de corte ( $V_s$ ) y ondas compresionales ( $V_p$ ). En la figura 8 se muestran los resultados de  $V_s$  y  $V_p$  obtenidos en ensayos *Down Hole* para los nuevos puentes vehiculares del IDU en la calle 170 y calle 100 con Autopista Norte, respectivamente. En general, corresponden a suelos finos de baja velocidad de onda  $V_s$  y  $V_p$ , con presencia de algunos estratos de arenas (valores picos).

**Respuesta sísmica en algunos sitios estudiados del norte de Bogotá.** Teniendo en cuenta que en este sector de la ciudad la topografía es plana, la estratigrafía es aproximadamente horizontal y para hacer comparativos los análisis con los realizados en la MZSB, se emplearon los programas 1D (EERA, SHAKE2000) y 2D (Plaxis-Dinámico). Como se mencionó, también se usaron los mismos acelerogramas de la Microzonificación Sísmica de Bogotá y otras señales de eventos

históricos y sintéticos sugeridos por varios investigadores.

El análisis obtenido de estudios de RSL en algunos perfiles de los suelos finos del norte de Bogotá, principalmente realizados para la revisión de la vulnerabilidad y la instrumentación sísmica de varios puentes vehiculares del IDU [4], permitió definir una serie de espectros de respuesta en campo libre cerca de la superficie (en algunos casos incluyendo la interacción con la estructura) y espectros suavizados para diseño estructural (con amortiguamiento del 5%). La superposición de todos estos resultados se presentan en la figura 9. Adicionalmente, se incluyen los espectros de diseño dados por el Decreto 074 para las zonas 3 y 4, y los espectros de diseño sugeridos para los diferentes sitios analizados.

En todos los casos se encontró que la zona plana del espectro (meseta) presenta una ordenada más baja y un ancho de periodo

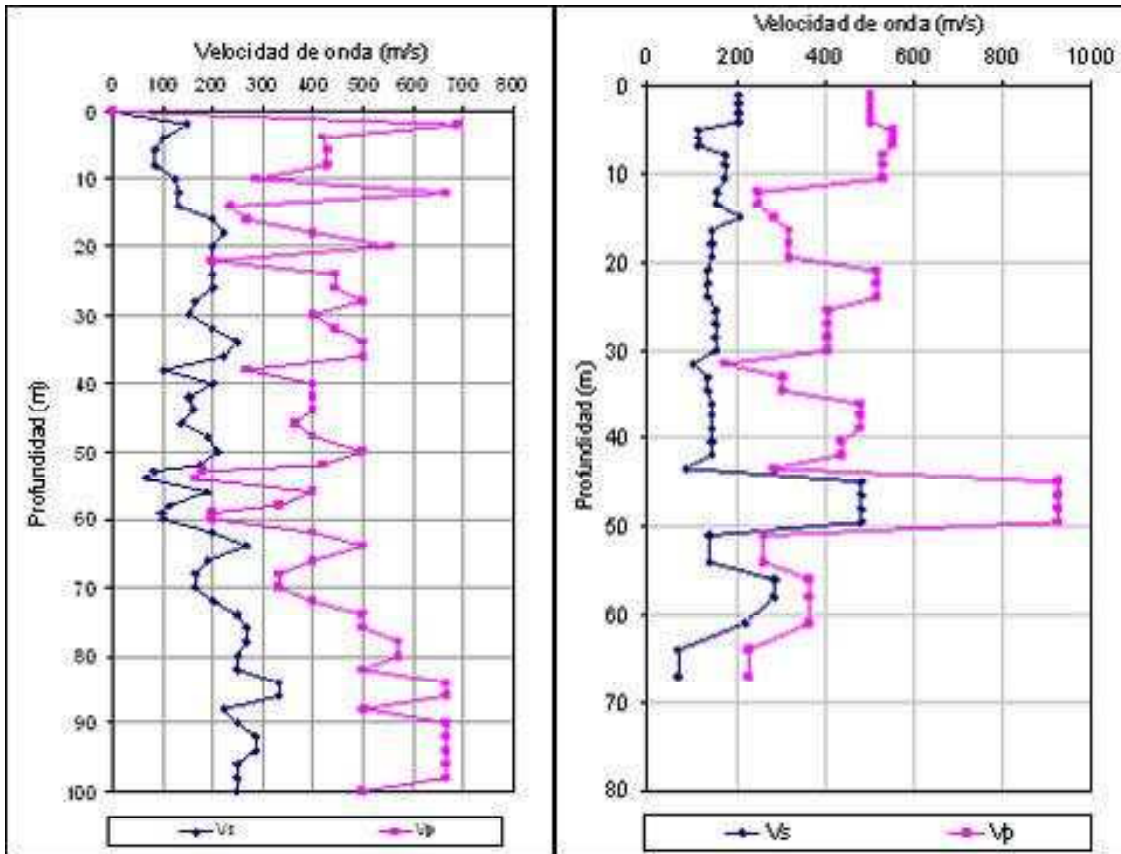


Figura 8. Perfiles de velocidades de onda  $V_s$  y  $V_p$  del ensayo Down Hole en el subsuelo de los puentes vehiculares de la Autopista Norte con calle 170 y calle 100 (IDU, 2001 y 2002).

estructural (abscisa) menor que el dado por la norma, produciendo una importante reducción de aceleraciones para periodos grandes, que puede incidir en la reducción de costos de reforzamiento y construcción de estructuras.

Estas variaciones sustanciales en las formas espectrales con respecto a las dadas por las normas se deben a la combinación de, principalmente, dos factores:

El empleo del acelerograma de Tauramena – Estación El Rosal– modificado, que presentaba problemas por efectos de sitio (dados a conocer con posterioridad a la aprobación del estudio de Microzonificación).

Las formas de las curvas dinámicas empleadas, antes mencionadas; ya que las sugeridas por la MZSB, por tener bajos amortiguamientos a grandes deformaciones, generan elevados valores de aceleración.

**Respuesta sísmica a partir de técnicas basadas en deformaciones pequeñas.** Recientemente se están empleando análisis de respuesta y zonificación sísmica local a partir de técnicas basadas en analizar señales sísmicas o ambientales registradas con acelerómetros fijos (Red de Acelerógrafos de Bogotá) o temporales.

En estos casos, los análisis de las señales (aceleraciones, velocidades o desplazamientos)

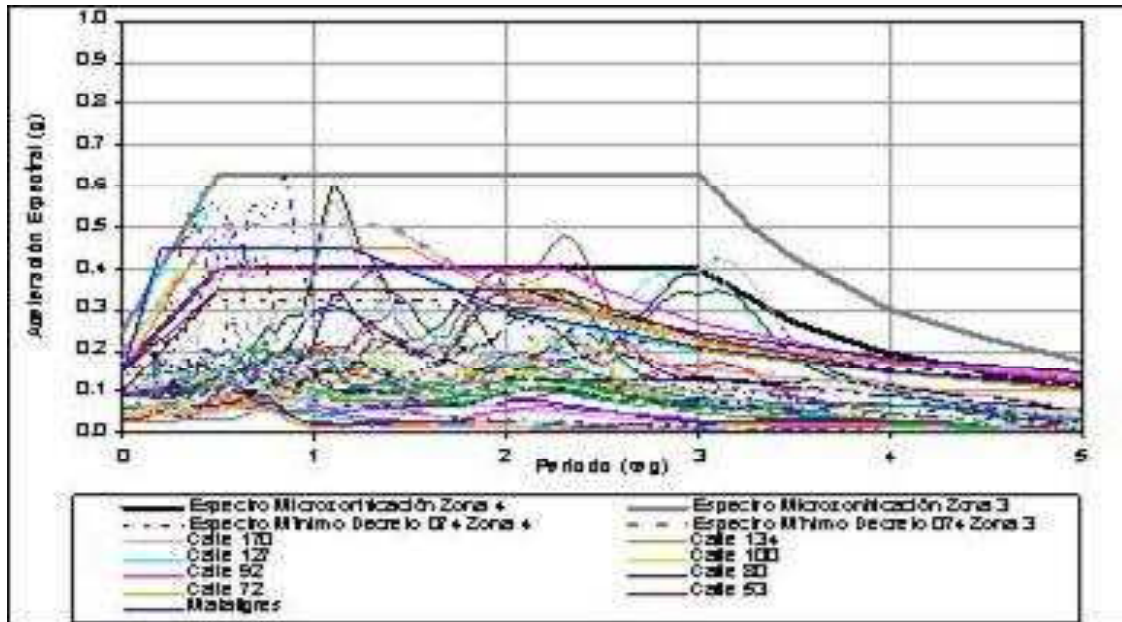


Fig 9. Espectros de respuesta obtenidos de análisis 1D y 2D para varios sitios de la zona plana de Bogotá.

se realizan en el dominio de las frecuencias, en lugar del dominio del tiempo.

Para esto se emplea la Transformada Directa Fourier (TDF), que pasa una señal del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias (espectros de Fourier –EF), y la Transformada Inversa de Fourier (TIF), que regresa la señal del dominio de las frecuencias al dominio del tiempo.

Adicionalmente, se usa el concepto de la Función de Transferencia (FT), que corresponde al comportamiento típico de un medio continuo (en este caso el depósito de suelo), al ser sometido al paso de una señal sísmica. La Función de Transferencia se calcula como  $FT = EF_{sup} / EF_{roca}$ , es decir, dividiendo las ordenadas correspondientes de los espectros de Fourier en superficie y en roca, respectivamente. Se considera que la FT es un

parámetro propio de cada depósito, lo que es cierto para el nivel de deformaciones al cual se someta dicho medio.

Sin embargo, debido a que los registros existentes en la ciudad solo han generado deformaciones muy pequeñas ( $g < 10\text{-}3\%$ ), que corresponden a valores entre 70 y 300 veces más pequeños que los producidos por un sismo severo, se tienen FT para el rango lineal de los suelos. En la figura 10 se comparan las formas de las FT para un evento registrado en los acelerómetros de la estación Uniagraria (empírica) con otras tres TF (hipotéticas) obtenidas de análisis de respuesta sísmica 1D con eventos sísmicos severos (a partir de curvas de laboratorio in-situ, MZSB y DV). Se observa con claridad la diferencia sustancial de todas las curvas de FT, especialmente la obtenida con los eventos pequeños.

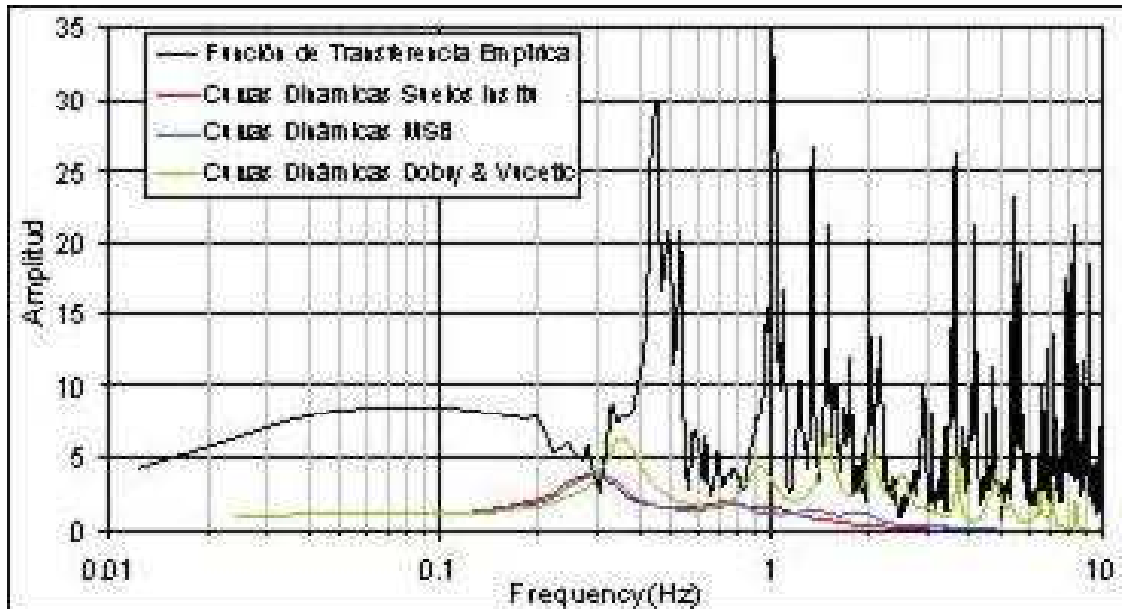


Fig 10. Funciones de Transferencia obtenidas para el perfil de la Universidad Agraria – Calle 170.

### 3. CONCLUSIONES

Con base en los resultados anteriores y de otros estudios similares, se puede concluir lo siguiente:

- El comportamiento dinámico de los suelos finos obtenidos de estudios recientes ( $G/G_{max}$  y  $b$ , en función de  $g$ ) varían sustancialmente de los dados por la norma vigente (MZSB). Esto implica que los estudios de respuesta sísmica local (RSL) son necesarios para encontrar valores más acordes con la realidad.
- El empleo del Índice de Plasticidad (IP) para generalizar el comportamiento dinámico de estos suelos no garantiza resultados correctos. Deben usarse otros parámetros indicadores (índice de consistencia, relación de vacíos, etc.).
- La presencia de capas de turba discontinuas y la heterogeneidad de los depósitos
- Los ensayos dinámicos de laboratorio deben incluir simultáneamente la ejecución de ensayos a pequeñas deformaciones (bender element, columna resonante, etc.) y grandes deformaciones (triaxial cíclico, corte simple cíclico, corte torsional, etc.), para lograr construir las curvas dinámicas completas y evitar errores en los análisis de respuesta.
- Los valores de aceleración horizontal máxima y de los espectros de respuesta para diseño para las zonas 3 y 4 resultan sustancialmente menores que los sugeridos por la norma vigente en la ciudad. Por lo tanto, se sugiere que se realice una pronta revisión de algunos aspectos de las zonas de la microzonificación, tales como: actualización de las curvas de comportamiento dinámico,

delimitaciones de áreas y formas espectrales. Con esto se evitará que se sigan generando sobrediseños en el reforzamiento estructural.

- El empleo de técnicas de zonificación a partir de datos con deformaciones pequeñas (ejemplo: funciones de transferencia, microtemblores, etc.) presenta serias limitaciones, debido a que solo cubren el rango de comportamiento lineal del suelo. Cuando se correlacionan con modelos no lineales sufren las mismas o mayores limitaciones que los otros modelos empleados para análisis de respuesta.

#### 4. AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, IDU, por la disponibilidad de la información presentada en este trabajo y por el importante aporte que actualmente le está dando a la ingeniería nacional, ya que varios de sus proyectos están permitiendo conocer mucho mejor el comportamiento dinámico del subsuelo de la ciudad. También se agradece a Proyectistas Civiles Asociados PCA Ltda, Consultores Regionales Asociados CRA Ltda, y al Centro Internacional de Física, CIF, por el apoyo a estas investigaciones.

Finalmente, se agradece el apoyo del personal de Ingeniería y Georriesgos IGR Ltda. para lograr los resultados presentados.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] Ingeominas y Universidad de Los Andes: *Microzonificación Sísmica de Bogotá*, Publicación Especial de Ingeominas, Bogotá, 1997.
- [2] H. B. Seed, I. M. Idriss: «Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses», *Report No. EERC 70-10*, University of California, Berkeley, 1970.
- [3] M. Vucetic, Dobry R.: «Effect of soil plasticity on cyclic response», *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 117(1): 89-107, 1991.
- [4] Centro Internacional de Física - Ingeniería y Georriesgos: «Estudio de respuesta dinámica de subsuelo para veinte puentes vehiculares de Bogotá». *Informe realizado para el IDU*, 2002.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica AIS: *Ley 400 de 1997 y Decreto 33 de 1998*, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente – NSR98, 1998.

CRA Ltda. – Ingeniería y Georriesgos: «Informe de Interventoría – Puente Calle 26 con Avenida El Dorado», Informe realizado para el IDU, 2003.

Dobry R. y M. Vucetic: «State of the art report: Dynamic properties and response of soft clay deposits», *Proc. Int. Symp. On Geotechnical Engineering of soft soils*, Vol. 2, pp. 51-87, 1987.

Ingeniería y Georriesgos - Proyectistas Civiles Asociados PCA Ltda.: «Interventoría sísmica y geotécnica a los estudios para el puente vehicular de la calle 100 por autopista norte, calzada sur». Informe realizado para el IDU, 2002.

Praxis: *Memorias del curso 'Plaxis Experience User's Course'*, mayo 8 al 10 de 2002.

Fecha de recepción: 26 de septiembre de 2005

Fecha de aprobación: 2 de diciembre de 2005