

## MODELACIÓN 1D y 2D DE EFECTOS LOCALES EN ARCILLOLITAS DE LA FORMACIÓN BOGOTÁ

A. Alfaro, M. Ramos y D. García-Borrero

### RESUMEN

Para evaluar los efectos sísmicos locales se emplearon el método uni - dimensional lineal equivalente, con el cual se modelaron 76 columnas estratigráficas, y el método bi- dimensional con el que se analizaron perfiles de sitios que presentan diferencias de espesores y posición de los materiales, determinando las funciones de transferencia del suelo.

Para realizar una modelación numérica realista de efectos locales se hace necesario conocer las características geológicas, geotécnicas y geofísicas del subsuelo. En este proyecto se realizó un levantamiento detallado de la Geología Regional y Local, se realizaron 17 perforaciones que ingresaron 5 metros en el basamento rocoso (Formación Bogotá), de estas se extrajeron muestras inalteradas para la caracterización estática y dinámica de los suelos, incluyendo 9 ensayos triaxiales cíclicos. Aprovechando estas perforaciones se realizaron 17 ensayos geofísicos de tipo *Down Hole* y 14 perfiles sísmicos que permitieron la determinación de la velocidad de ondas sísmicas  $V_s$  y  $V_p$ .

Los resultados de los estudios indican la conveniencia de la adecuada caracterización de los materiales mediante campañas geológicas, geotécnicas y geofísicas y la importancia de una modelación 2D para una aproximación más realista al fenómeno.

**Palabras Clave:** Formación Bogotá, Arcillolita, Efectos Sísmicos Locales, Modelación Numérica, Funciones de Transferencia.

### ABSTRACT

In order to evaluate the local site effects 76 soil columns were modeled using the equivalent linear uni-dimensional method. Additionally, a bi-dimensional method were used for some soil profiles that present differences of thicknesses and position of the materials, evaluating the system functions of the soils.

In order to make a realistic numerical modeling of local effects it is necessary to know geologic, geotechnical and geophysical characteristics of subsoil materials. In this project a detailed study of regional and local geology was made. Seventeen boreholes were made that entered 5 meters in the basement (Bogotá Formation). Samples of soil for static and dynamic characterization were extracted. Taking advantage of these boreholes, 17 geophysical Down Hole tests and 14 seismic profiles were made which allow the determination of seismic wave's velocities  $V_s$  and  $V_p$ .

Results of the studies show the convenience of the suitable characterization of materials by means of geologic, geotechnical and geophysical survey and the importance of a 2D modeling for a more realistic approach to the problem.

**Key words:** Bogotá formation, Clay Stone, local effects, numerical modeling, system function.

### INTRODUCCIÓN

Para la modelación numérica se han utilizado métodos unidimensionales (1D) cuya finalidad es determinar la respuesta del terreno ante un evento sísmico y métodos bidimensionales (2D) que involucran los efectos geométricos del sitio. Se evaluaron mediante modelación 1D, setenta y seis columnas estratigráficas y mediante modelación 2D, tres perfiles característicos de zonas con diferencias topográficas. Los resultados que se presentan son las funciones de transferencia, que indican los períodos predominantes de los suelos y las amplificaciones asociadas (Alfaro *et al.*, 2004).

### COLUMNAS ESTRATIGRÁFICAS ANALIZADAS

En el año 2001 empezó el proyecto para la Microzonificación sísmica del Campus de la Javeriana a partir del análisis de información secundaria (García y Alfaro, 2001), consistente en datos de 59 perforaciones, con las que se hizo una sectorización geotécnica, de acuerdo con el tipo de suelo y la profundidad del basamento rocoso, en este caso la arcillolita de la Formación Bogotá (Teb) (Lobo-Guerrero, 2002), y una evaluación de la posible respuesta sísmica local, estimando los períodos dominantes y amplificaciones asociadas para cada una de las columnas estratigráficas, empleando sismos cuyas características fueran acordes con el nivel de amenaza para Bogotá (Arévalo *et al.*, 2003).

En el 2002 se realizaron 17 perforaciones adicionales que alcanzaron profundidades entre 8.0 m y 24.0 m, las cuales penetraron 5.0 m en el basamento rocoso (Geotecnia y Cimentaciones, 2002); de estas perforaciones se extrajeron muestras para la caracterización estática y dinámica de los materiales. Adicionalmente se realizaron 17 ensayos geofísicos tipo *Down Hole* y 15 líneas sísmicas para determinar la velocidad de las ondas  $p$  y  $s$  en el

subsuelo y obtener un modelo más realista del subsuelo en cuanto a variaciones del espesor de los materiales (Ulloa, 2002).

### **ENSAYOS REALIZADOS**

Se realizaron ensayos de clasificación y resistencia–deformación: humedad natural, límites de Atterberg, peso unitario, gravedad específica, granulometría, hidrometría, compresión inconfiada, corte directo y nueve ensayos de triaxial cíclico, basados en la norma ASTM D 3999-91 (ASTM, 1991) con el fin de establecer la variación del módulo de corte y el amortiguamiento con la deformación angular. Dichos ensayos se realizaron para deformaciones angulares entre 0.04% y 6.5%, con características de deformación controlada, los datos fueron analizados siguiendo los criterios de Hardin y Drnevich (1972a, 1972b).

### **PROSPECCIÓN GEOFÍSICA**

Se realizaron 15 líneas de refracción sísmica con longitudes entre 44 m y 100 m (Figura 1), complementados con 17 ensayos *Down Hole*, en cada una de las perforaciones. La adquisición de los datos para las líneas de refracción sísmica se realizó por medio de un sismógrafo *Geometrics* de 12 canales computarizado. Para los ensayos de *Down Hole* se empleó una sonda triaxial *Geometrics* compuesta por dos geófonos horizontales y uno vertical. La interpretación de datos se realizó mediante el empleo del programa SIP (*Seismic Interpretation Program*). El método interpretativo empleado fue Tiempos de Retraso o *Delay Times*, se encontraron velocidades de onda  $V_s$  entre 110 m/s y 1200 m/s (Ulloa, 2002).

### **EFECTOS LOCALES**

Los efectos locales pueden dividirse en general en dos grandes grupos, efectos de amplificación y efectos geométricos. Los primeros corresponden a las modificaciones que sufre el movimiento sísmico (básicamente la aceleración máxima y el contenido frecuencial), en especial por la propagación ascendente de las ondas de corte a través del suelo, según las propiedades dinámicas y geométricas del suelo. En el segundo lugar, los efectos geométricos se refieren a como las características topográficas pueden generar amplificación (superficies convexas) o deamplificación (superficies cóncavas).

### **MÉTODOS DE EVALUACIÓN**

Para el estudio se empleó el método unidimensional lineal equivalente Shake91 (Schnable *et al.*, 1972; Idriss y Sun, 1992) y el modelo bi-dimensional Quad4M (Hudson *et al.*, 1994), el cual se usó en zonas que por su topografía es posible que se presenten efectos de amplificación topográfica de la señal sísmica.

### **SISMOS UTILIZADOS**

Se utilizaron 36 registros horizontales y 14 verticales correspondientes a nueve sismos (NOAA, 1996), de los cuales uno es colombiano, registrados en 18 estaciones diferentes. Dichos registros cumplen con las siguientes características: contenidos frecuenciales coherentes con las fuentes sismogénicas colombianas, principalmente del sistema de Guaicáramo (Arévalo *et al.*, 2003); distancias epicentrales de acuerdo con el Estudio Geológico Regional y Local (Lobo-Guerrero, 2002); las magnitudes y las aceleraciones de acuerdo con el estudio realizado por Caneva (2002) y Caneva *et al.* (2003) donde la aceleración esperada para un tiempo de retorno de 475 años es de 180 gales, con una confiabilidad del 90%. Según Beresnev *et al.* (1995) los movimientos sísmicos fuertes son aquellos que superan 100 gales (10.19%g), de tal forma que los datos registrados instrumentalmente en Bogotá son de movimientos sísmicos débiles.

### **RESULTADOS**

Las figuras 2 a 5 presentan ejemplos de los resultados obtenidos para modelación numérica 1D y 2D, las columnas estratigráficas PC-10, el ensayo de *Down-Hole* DH-10, la línea sísmica LSJAV9 de 55m de longitud (figura 1), el PC-12 y el ensayo de *Down-Hole* DH-12 (Ulloa, 2002) representan el subsuelo de la zona ejemplificada. Las funciones de transferencia muestran para la columna PC-12, que el período predominante varía entre 0.06 s y 0.08 segundos para amplificaciones asociadas entre 3.3 y 4.0 veces (figura 2); para la PC-10, el período predominante

varía entre 0.15 s y 0.25 s y la amplificación asociada entre 2.8 y 3.4 veces el movimiento sísmico en roca (Figura 4).

La malla para la modelación 2D se diseñó con las propiedades de los materiales encontrados en las campañas geotécnica y geofísica. Los períodos varían entre 0.4 y 0.5 segundos con amplificaciones entre 2.5 y 3.5 veces. En cuanto a las amplificaciones los resultados son similares a los de la modelación 1D, sin embargo los períodos dominantes aumentaron de 0.15 – 0.25 seg. a 0.4 y de 0.06-0.08 a 0.5 segundos (Figuras 3 y 5).

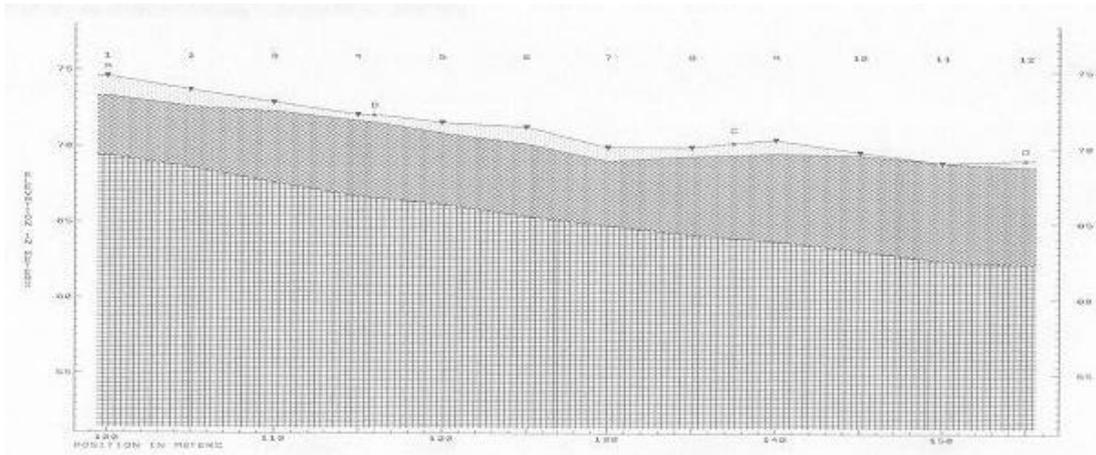


Figura 1. Perfil estratigráfico del Terreno, a partir de ensayos *down hole* en los extremos y un perfil de reflexión sísmica (Ulloa, 2002)

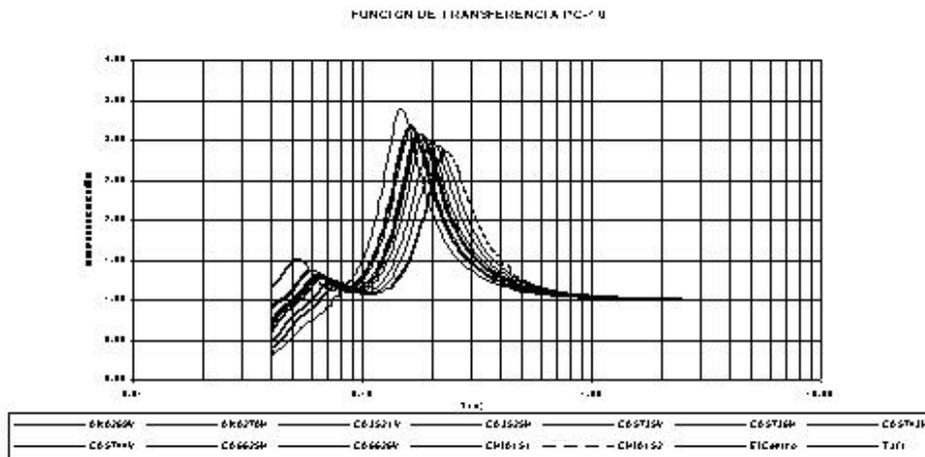


Figura 2. Funciones de transferencia perforación PC-10 – Modelación 1D.

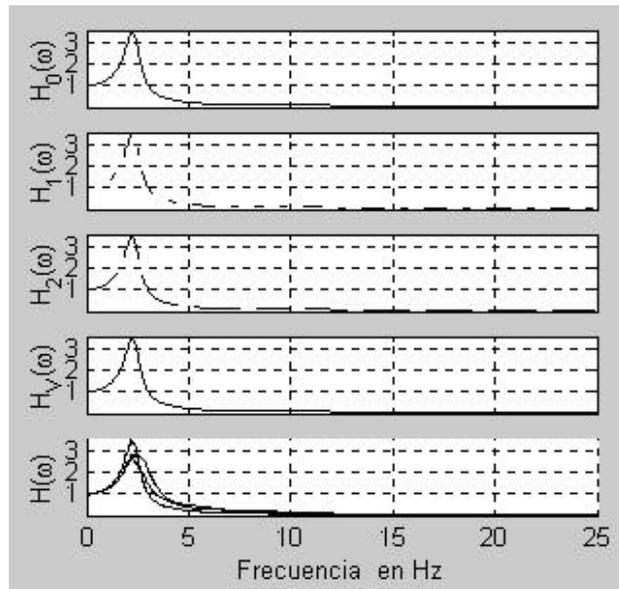


Figura 3. Funciones de Transferencia del Modelo 2D, en PC-10 (Alfaro *et al.*, 2004)

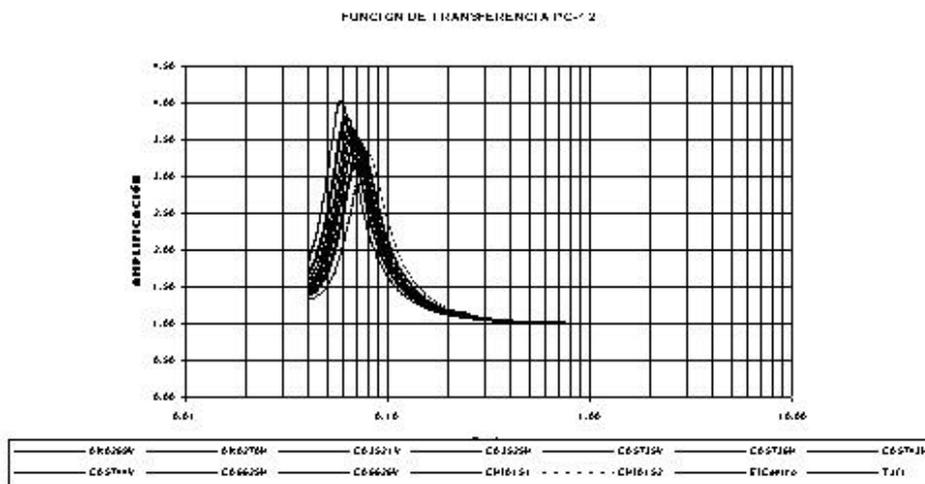


Figura 4. Funciones de transferencia perforación PC-12 – Modelo 1D

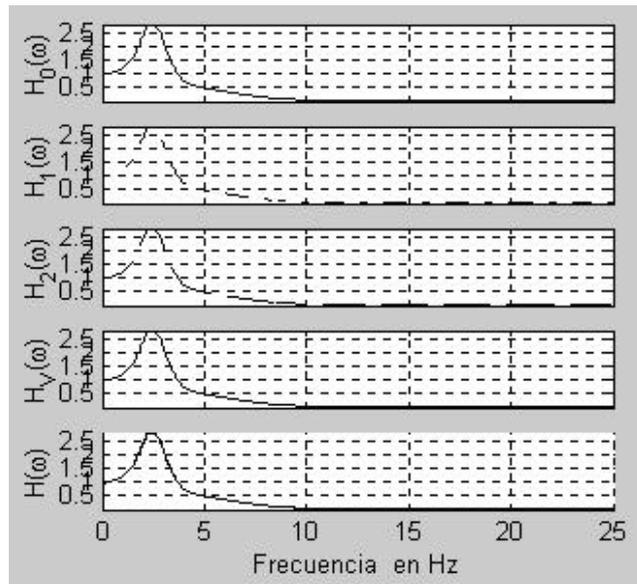


Figura 5. Funciones de Transferencia del Modelo 2D, en PC-12 (Alfaro *et al.*, 2004)

**DISCUSIÓN**

La evaluación de los efectos locales se realiza, en la mayoría de los casos, mediante una modelación numérica, ya que la cuantificación mediante instrumentos sismológicos permanentes requiere de una instalación costosa y del registro de varios eventos débiles y fuertes. En el caso de la ciudad de Bogotá no se han registrado instrumentalmente eventos sísmicos fuertes (aquellos que superan 100 gales). Por lo tanto ha sido necesaria la modelación numérica para la microzonificación sísmica de la ciudad y para proyectos específicos. Otra incertidumbre es la que corresponde a los sismos a utilizar para dicha modelación, en el caso del artículo se utilizaron registros en roca que cumplieran con las distancias a las fuentes sismogénicas, con magnitudes acordes a los estudios de amenaza sísmica regional y cuyos contenidos frecuenciales estuvieran en el rango de los sismos proveniente principalmente del sistema de fallas de Guaicáramo (Alfaro *et al.*, 2004).

Las evaluaciones con datos dinámicos del suelo estimados permitieron observar que edificaciones en el piedemonte pueden presentar problemas de resonancia, ya que los períodos estimados eran del orden de 0.20 segundos. Las evaluaciones que contaban con datos de campo, correspondientes a curvas de degradación del modulo de corte, velocidad de ondas de corte  $V_s$ , velocidad de ondas de compresión  $V_p$  y espesores del suelo, permitió estimar en forma más realista los períodos dominantes del suelo y sus amplificaciones asociadas. La modelación bidimensional mostró una reducción de las amplificaciones, positivo para las construcciones, pero un ligero aumento de los períodos lo que se traduce en ordenadas mayores de aceleración en el espectro sísmico de diseño estructural.

Para proyectos de cierta envergadura se recomienda la realización de estudios completos de amenaza sísmica local que redundaran en diseños más acordes con la amenaza sísmica que corresponde al contexto bogotano, principalmente a las construcciones ubicadas en el piedemonte cuyos periodos dominantes son muy similares a los de los suelos subyacentes.

## REFERENCIAS

- Alfaro A., A. Ramos y D. García-Borrero (2004) Modelación 1D y 2D de Efectos Locales en Arcillolitas de la Formación Bogotá. *Submitted to Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*. Bogotá.
- Arévalo, N. T. Caicedo, R. Van Hissenhoven y A. Alfaro (2003) Contenidos Frecuenciales de sismos colombianos registrados en BOCO (Bogotá) y SDV (Santo Domingo, Venezuela) (1994-1996) *Ingeniería y Universidad* 7, 1, 19-31.
- ASTM (1991) "ASTM D 3999 Standard Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils using the Cyclic Triaxial Apparatus" Annual Book of ASTM Standards.
- Beresnev, I.A., K.L. Wen y Y.T. Yeh (1995) Nonlinear soil amplification: Its corroboration in Taiwan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 85:496-515.
- Caneva A. (2002) Estudio de Amenaza Sísmica Campus Universitario Universidad Javeriana. Sede Bogotá
- Caneva A., E. Salcedo, R. Van Hissenhoven y A. Alfaro (2003) Análisis de la Amenaza Sísmica y de la Magnitud Representativa para Bogotá. *Ingeniería y Universidad*. Vol 7, No 2, pp 133-150.
- García, D. y A. Alfaro (2001) "Estimación de Efectos Locales en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana mediante Modelación Numérica". *Memorias Segundo Congreso Iberoamericano de Ing. Sísmica*. Madrid. España.
- Geotecnia y Cimentaciones (2002) Registros de Perforaciones. Microzonificación Sísmica del Campus de la Universidad Javeriana Sede Bogotá. Bogotá.
- Hardin B. O. y V.P. Drnevich (1972a) Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects. *Journal Soil Mech. Found. ASCE*. SM6. pp 8977-8998.
- Hardin B. O. y V.P. Drnevich (1972b) Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *Journal Soil Mech. Found. ASCE*. SM7. pp 9006-9029.
- Hudson M., I.M. Idriss y M. Beikae (1994) Quad4M. A computer Program to evaluate the Seismic Response of soil Structures using Infinite Element Procedures and Incorporating a Compliant Base. University of California, Berkeley.
- Idriss, I.M. y J.I. Sun (1992) Shake91: A Computer program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil deposits. User's Guide. University of California.
- Lobo-Guerrero, A. (2002) Informe de Geología para la Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana – Sede Bogotá. Bogotá.
- NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration (1996). Earthquake Strong Motion. National Geophysical Data Center. Boulder, Colorado, CD-ROM. Vol. 1, 2 and 3.
- Schnabel, B.; J. Lysmer y H.B. Seed (1972). Shake. A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. College of Engineering. University of California, Berkeley.
- Ulloa, A. (2002) Estudio Geosísmico para la Microzonificación Sísmica del Campus de la Universidad Javeriana – Sede Bogotá. Bogotá.