

Evaluación de la Amenaza Sísmica Local en 18 Hectáreas del Centro-Oriente de Bogotá

Andrés José Alfaro Castillo* y Rene Van Hissenhoven, S.J.**

RESUMEN

Este artículo presenta la zonificación geotécnica y los espectros sísmicos de diseño propuestos. El estudio incluyó análisis sismológicos, estudios geológicos regionales y locales, perforaciones que penetraron 5 metros en el basamento rocoso, perfiles de refracción sísmica, ensayos *Down-Hole*, ensayos triaxiales y modelación numérica. Geotécnicamente se determinaron cuatro zonas bien diferenciadas: zona de colusiones y aluviones antiguos; zona de arcillas de baja plasticidad de bajo espesor, menor de 10 metros; zona de arcillas de baja plasticidad con espesores mayores a 10 metros y la zona de suelos sobre la Formación Cacho. Se generaron tres espectros sísmicos de diseño: uno para roca y dos para suelo.

Palabras clave: Bogotá, Colombia, microzonificación sísmica, campus, Universidad Javeriana.

SEISMIC HAZARD ASSESSMENT ON 18 Ha IN THE EASTERN DOWNTOWN OF BOGOTÁ

ABSTRACT

This paper presents the geotechnical zonation and earthquake design spectra suggested. This research included seismological analysis; regional and local geological studies; drills, which penetrate 5 meters in engineering rock basement; seismic refraction profiles; down hole tests; triaxial tests and numerical modeling. From a geotechnical point of view four zones were distinguished: Old Alluviums and Colluviums zone; zone of shallow low plasticity clays (thickness smaller than 10 meters); depth low plasticity zone (thickness greater than 10 meters) and the zone of soils over "Cacho" Formation. Three design seismic spectra were generated: one for rock and two for soils.

Key words: Bogotá, Colombia, Seismic Zonation, Campus, Javeriana University.

* Ingeniero Civil de la Pontificia Universidad Javeriana. Master en Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural de la Universidad Politécnica de Cataluña. Especialista en Sismología del *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering* en Tsukuba- Japón. Profesor de la Universidad de La Salle. Investigador del *CIEES*. Correo electrónico: alfaro@ciees.org

** Filósofo y Teólogo de la Pontificia Universidad Javeriana. Geofísico. Especialista en Sismología del *International Institute of Seismology and Earthquake Engineering* en Tsukuba- Japón. MSc Boston College. PhD. Universidad de Wisconsin. Consultor en Geofísica.

Recibido: 1 de febrero de 2007.

Aceptado: 2 de abril de 2007.

INTRODUCCIÓN

Durante dos años García (2001); García y Alfaro (2001a, 2001b, 2001c); Giraldo *et al.* (2002) y Alfaro *et al.* (2002a, 2002b, 2002c) realizaron estudios para la Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana – Sede Bogotá el cual ocupa un área de 18 hectáreas al centro-oriente de la ciudad de Bogotá.

El estudio geológico fue realizado por Lobo-Guerrero Uscátegui (2002), quien compiló información desde el Valle del Río Magdalena hasta el Piedemonte Llano. Es tal vez, uno de los estudios geológicos de fuentes sismogénicas más completo para la ciudad de Bogotá. Lobo-Guerrero identificó 38 fallas geológicas en la región de estudio y se realizaron trabajos de campo para verificar la actividad de las fallas más cercanas, con conclusiones satisfactorias, como la inactividad de la falla Bogotá en lo referente a la parte sismológica se ponderaron los aspectos históricos e instrumentales de los sismos (Caneva, 2002; Caneva *et al.*, 2003; 2004).

En la exploración del subsuelo se hicieron dos campañas: una geotécnica que implicó la realización de 17 perforaciones (Geotecnia y Cimentaciones, 2002), todas ellas penetraron cinco metros en el estrato rocoso, que en la mayor parte de la zona es la formación Bogotá, de estas perforaciones se extrajeron muestras alteradas e inalteradas (Alfaro *et al.*, 2002a).

Las perforaciones fueron revestidas, lo que permitió realizar ensayos geofísicos tipo *Down-Hole*, para determinar la velocidad de ondas de corte, el cual es uno de los parámetros más importantes para la caracterización dinámica de materiales; adicionalmente, se realizaron 15 líneas de refracción sísmica con longitudes variables entre 44 y 100 metros (Ulloa, 2002).

Con la información sismológica, geológica, geotécnica y geofísica se realizaron las simulaciones numéricas de los posibles efectos locales, la cual se realizó a 76 columnas estratigráficas, provenientes de estudios de suelos anteriores y las 17 perforaciones más recientes, utilizando métodos unidimensionales y 3 perfiles bidimensionales; simulando el comportamiento ante 33 registros sísmicos horizontales y 13 verticales (Alfaro *et al.*, 2002c; Alfaro y Monroy, 2004; Alfaro *et al.*, 2005).

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios y permiten tener una visión bastante realista de la amenaza sísmica en la zona; finalmente, se generaron tres espectros sísmicos de diseño: uno para roca, otro para un edificio en roca meteorizada y un tercero para la edificación histórica “Casa Navarro” sobre el aluvión de gran espesor. Este artículo se centra en la zonificación geotécnica y en los espectros de diseño propuestos.

ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA

De acuerdo con Giraldo *et al.* (2002) y Alfaro *et al.* (2002a; 2002b) los suelos analizados se dividen principalmente en tres zonas.

Zona I. Zona de Coluviones y Aluviones Antiguos: es un depósito no consolidado de cantos rodados, bloques y trozos angulares, grava, arena, limo y arcilla. El espesor de dicho depósito alcanza valores máximos de 18 m, a esta profundidad se presenta el contacto con la Formación Bogotá (*Teb*).

Zona II: Zona de arcillas de baja plasticidad: esta zona está conformada principalmente por sucesión de horizontes de arcillas de baja plasticidad y algunos lentes ocasionales de limos, con espesores que varían desde algunos centímetros hasta 10 m. Subyaciendo los anteriores materiales se encuentra el perfil de meteorización de la Formación Bogotá (*Teb*),

constituida por arcillas rojizas y grises de baja plasticidad, que se detectó a profundidades variables desde 1.0 m hasta 5.0 m. De acuerdo con los resultados de los ensayos de laboratorio, este horizonte posee resistencia mecánica alta. Una vez pasado este horizonte, se encuentran arcillolitas abigarradas (grises, violáceas, moradas y rojas) de la formación Bogotá (*Teb*).

De acuerdo con la profundidad a la que se encuentra el basamento rocoso, dentro la zona II se puede ubicar una subzona IIA, a saber:

Zona IIA. Se diferencia esta zona por encontrarse el basamento rocoso a profundidades mayores a 10 m.

Zona III. Formación Cacho: el basamento rocoso de esta zona está constituido por el conjunto de arcillolitas y limolitas grises, rojizas y abigarradas que hacen parte de la Formación Cacho (*Tpc*). Se destaca en esta zona la presencia de un depósito Fluvioglacial no consolidado compuesto por bloques y cantos de arenisca y limolita silíceo en una matriz limoarcillosa (Figura 1).



ESPECTROS SÍSMICOS PROPUESTOS

Los espectros sísmicos de respuesta fueron calculados con los programas SPECEQ/UQ (Nigam y Jennings, 1968); Shake91 (Idriss y Sun, 1992) y EduShake (Edu Pro Civil Systems, 1999). Para la determinación de los Espectros Sísmicos de Diseño se utilizaron métodos estadísticos (Housner, 1941). Se calculó la media, la desviación estándar y una confiabilidad del 90%. Este procedimiento generó espectros sísmicos de diseño los cuales fueron idealizados a partir del espectro del 90% de confiabilidad de la velocidad (Alfaro *et al.*, 2002; 2002b; 2002c). Los registros utilizados siguieron los hallazgos de Alfaro-Arias y Alfaro (2001, 2001b); Alfaro-Arias *et al.*, (2001); Arévalo y Alfaro (2002), Arévalo *et al.* (2003).

La Figura 2 muestra el espectro de aceleración promedio, más o menos la desviación estándar; el espectro de la NSR98; el 80% del NSR98 y el correspondiente a la zona de cerros del Decreto 074 de la Microzonificación de Bogotá.

A continuación se describe el espectro sísmico de diseño en roca para un período de retorno de 475 años que está basado en el 90% confiabilidad de los espectros de respuesta de los registros seleccionados. Para un período de 0.0 s se obtuvo una aceleración de 204 gales que crece linealmente hasta 561 gales para un período de 0.26 segundos; este valor permanece constante hasta un período de 0.67 segundos, a partir de este punto decrece con la siguiente fórmula: $a = 381.79 X^{-0.9785}$ hasta un período de 4.3 segundos donde se intersecta con el 80% del espectro de diseño de la norma (NSR-98), por lo cual de este período en adelante se toma el valor de 100 gales (Alfaro *et al.*, 2004). La Tabla 1 presenta de valores del espectro sísmico de diseño en roca, el cual se puede ver en la Figura 3.

TABLA 1. ESPECTRO SÍSMICO DE DISEÑO EN ROCA $T_R = 475$ AÑOS

| T (seg) | Aa (gales) | %g |
|-----------|-----------------------|------|
| 0.00 | 204 | 0.21 |
| 0.26 | 561 | 0.57 |
| 0.67 | 561 | 0.57 |
| 0.67-4.30 | $381.79T^{(-0.9785)}$ | |
| 4.30-5.00 | 100 | 0.10 |

La mayor parte de los grandes edificios de la Universidad Javeriana se encuentran cimentados en roca sana de la formación Bogotá. El espectro sísmico de diseño en roca debe ser mayorado según el factor de importancia para el Hospital Universitario San Ignacio. Adicionalmente, se calcularon los espectros sísmicos de diseño en roca para períodos de retorno de 1.000 y 2.000 años. La aceleración pico en roca para 1.000 años se estima en 265 gales y para 2.000 años en 354 gales (Caneva, 2002; Caneva *et al.*, 2003; 2004).

Caso aparte corresponde al del Edificio N° 67, que aparentemente se encuentra sobre roca meteorizada y cuyo espectro se presenta en la Figura 4. Este espectro corresponde a la información geotécnica y geofísica obtenida de la PC-13 y de la LSJAVPAR. La Figura 4 presenta el espectro propuesto después análisis estadístico realizado. Se observa que el espectro sísmico hallado para el 90% de confiabilidad es inferior al propuesto para Piedemonte del Decreto 074 para períodos entre 0.0 y 0.4 segundos; lo supera para períodos entre 0.4 y 1.2 segundos, y vuelve a ser inferior para períodos mayores a 1.5 segundos. Se deben realizar investigaciones adicionales para saber donde está cimentado el Edificio N° 67. La Tabla 2 presenta el espectro idealizado para el análisis de vulnerabilidad estructural del Edificio José Rafael Arboleda, S.J.

TABLA 2. ESPECTRO SÍSMICO DE DISEÑO EDIFICIO JOSÉ RAFAEL ARBOLEDA, S.J. $T_R = 475$ AÑOS

| T (seg) | Aa (gales) | %g |
|-----------------------------|------------------|-------|
| 0.00 | 341 | 0.348 |
| 0.55 | 1079 | 1.100 |
| 1.07 | 1079 | 1.100 |
| Para valores mayores a 1.07 | $-1.232xT^{1.6}$ | |

La Casa Navarro (Edificio N°1), por encontrarse sobre el coluvión, tiene otro espectro, dicha construcción por su carácter patrimonial merece especial atención. La Figura 5 presenta los espectros sísmicos de respuesta y el análisis estadístico respectivo, es en términos generales un espectro “plano” coherente con depósitos aluviales de un cierto espesor, en la PC-1 se encontró a 15 metros de profundidad el estrato rocoso, las pruebas geofísicas tipo *Down-Hole* indicaron que el contraste de rigidez de materiales presenta a 9.0 metros de profundidad (Alfaro *et al.*, 2002d). La Figura 5 muestra adicional al espectro sísmico del 90% de confiabilidad con las legislaciones nacional y local, para la evaluación se recomienda utilizar la NSR98.

CONCLUSIONES

El basamento rocoso dentro de la zona de estudio se encuentra a profundidades que varían desde aproximadamente dos metros hasta profundidades de 18 metros. Debido al proceso de urbanización, los depósitos cuaternarios han sido removidos para dar paso a nuevas construcciones, por lo que la zona que abarcaba dicho depósito ha disminuido en forma importante (Figura 1).

La capacidad portante admisible y la capacidad de carga arrojaron valores altos debidos principalmente a la alta resistencia mecánica de la arcilla proveniente de la formación Bogotá (*Teb*) y además a que la roca se encuentra a profundidades someras en esta zona, en condiciones de baja meteorización.

FIGURA 2. ESPECTROS SÍSMICOS DE DISEÑO EN ROCA TR = 475 AÑOS (ALFARO ET AL., 2002B, 2004)

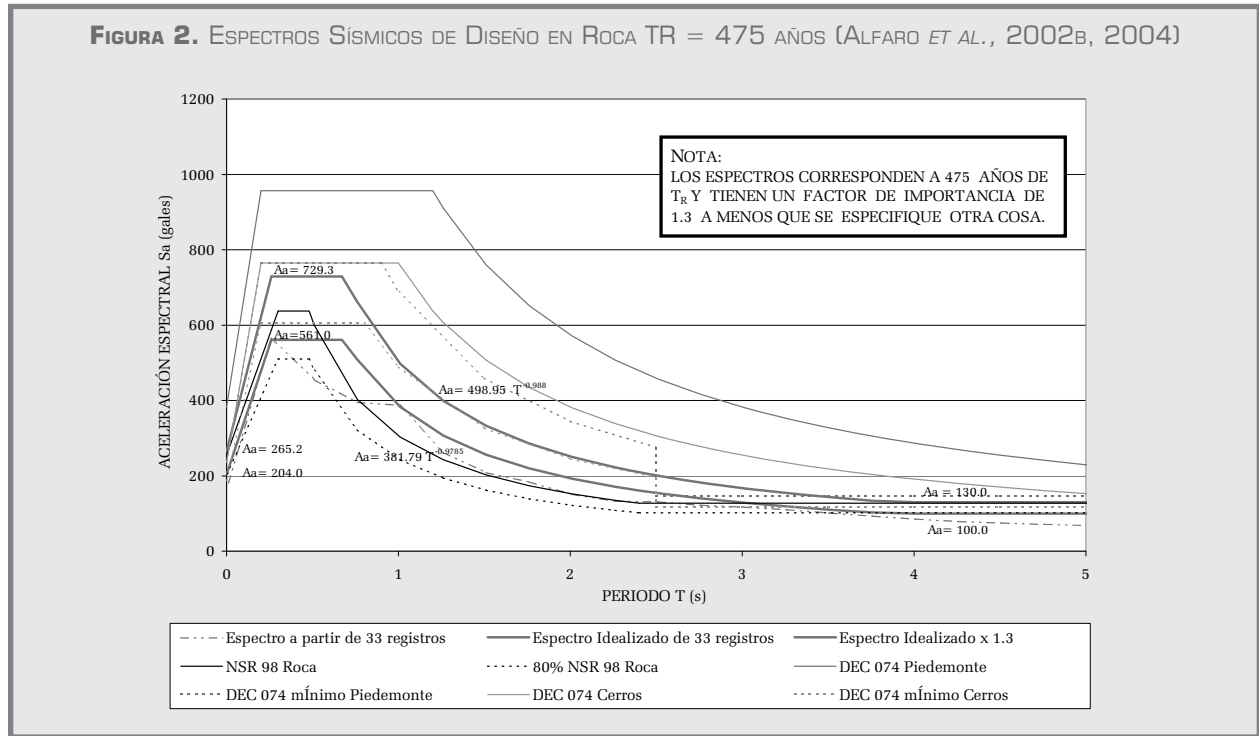


FIGURA 3. ESPECTROS SÍSMICOS DE DISEÑO EN ROCA, FACTORES DE IMPORTANCIA 1.0 Y 1.3 (ALFARO ET AL., 2002B)

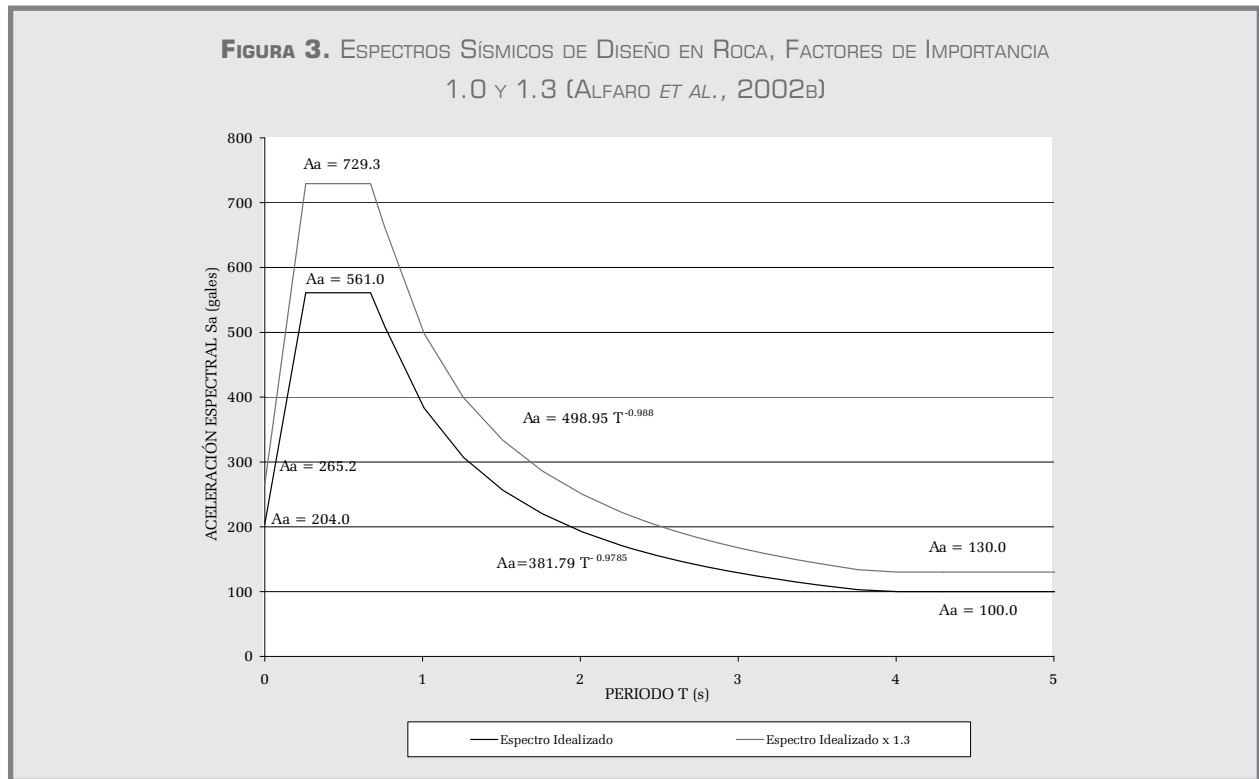


FIGURA 4. ESPECTRO SÍSMICO DE DISEÑO ED. 71.(ALFARO ET AL. 2002B, 2000D)

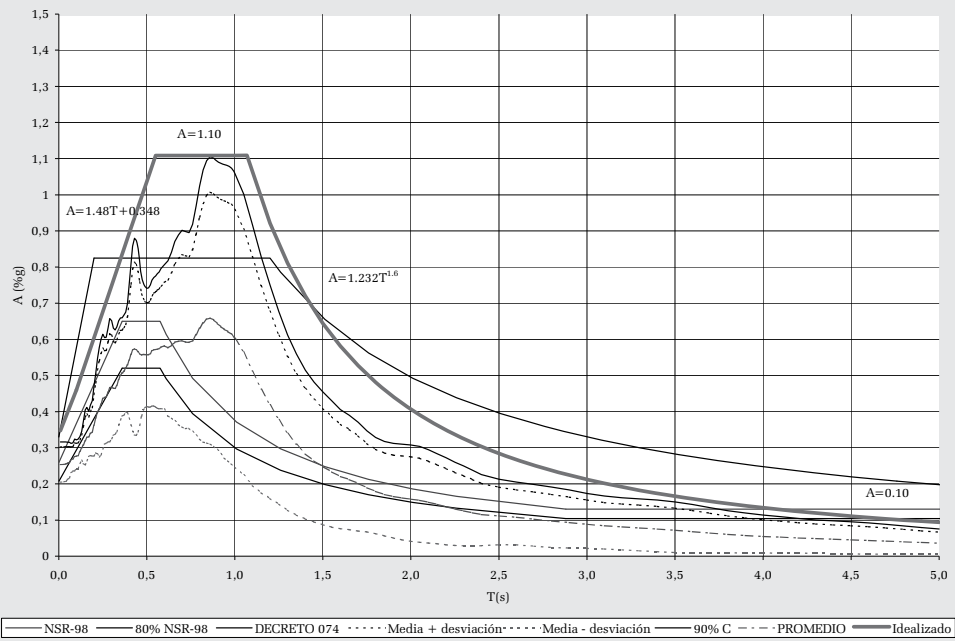
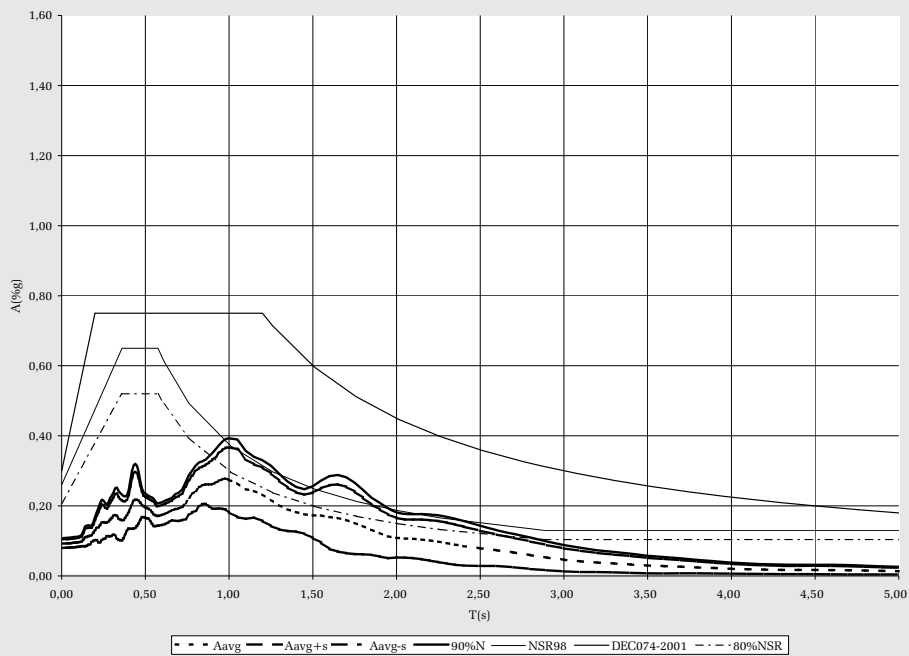


FIGURA 5. ESPECTROS SÍSMICOS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO. CASA NAVARRO. PC1. TR=475 AÑOS. (ALFARO ET AL. 2002B, 2000D)



En la zona al oriente de la Avenida Circunvalar existe la presencia de un depósito Fluvioglacial no consolidado compuesto por bloques y cantos de arenisca y limolita silíceas en una matriz limoarcillosa, por lo que en el momento en que se decida urbanizar dicho lote y, por lo tanto, realizar algún tipo de excavación, se debe realizar una secuencia cuidadosa, para evitar que se genere algún tipo de fenómeno de remoción en masa debido a la naturaleza no consolidada del mismo. Con los datos recolectados de la campaña de exploración del subsuelo y de los resultados de ensayo del laboratorio los materiales no son potencialmente licuables.

La mayor parte de los grandes edificios de la Universidad Javeriana se encuentran cimentados en roca sana de la formación Bogotá, lo cual significa, en términos sísmicos, una ventaja importante con respecto a otras construcciones cimentadas en suelo.

Caso aparte corresponde al del Edificio N° 67, que aparentemente se encuentra sobre roca meteorizada y cuyo espectro se ha presentado. La Casa Navarro (Edificio N° 1) por encontrarse sobre el coluvión tie-

ne otro espectro, dicha construcción por su carácter patrimonial merece especial atención.

AGRADECIMIENTOS

Las campañas de exploración del 2002 fueron financiadas por la Rectoría de la Pontificia Universidad Javeriana. El personal que trabajó en el proyecto fue: Director Andrés José Alfaro Castillo; Coordinador Víctor Hernán Giraldo Calderón; Ingeniero Auxiliar Jorge Eduardo Ardila Rueda; Auxiliar de Ingeniería Alfonso Mariano Ramos Cañón; Auxiliar de Ingeniería Diego Fernando García Borrero; Auxiliar de Ingeniería Ingrid Tatiana Caicedo Amado; Auxiliar de Ingeniería Magda Natalia Arévalo Caro; **Asesores:** Padre Rene Van Hissenhoven Goenaga, S.J; Ingeniera Lucía del Pilar Monroy Pedroza; Ingeniero Juan José Obagui. **Subcontratistas:** Geología: Alberto Lobo-Guerrero Uscategui; Prospección Geofísica: Alejandro Ulloa; Sismología: Alexander Ivanovich Caneva Rincón; Sismología: Elkin de Jesús Salcedo Hurtado; Prospección Geotécnica: Geotecnia y Cimentaciones Compañía Ltda., Topografía: Sonia Paredes y Video realizado por Fernando Moreno del Centro Javeriano de Medios Audiovisuales.

BIBLIOGRAFÍA

Alfaro-Arias, C. y Alfaro, A. Caracterización en los Dominios de la Frecuencia de Sismos Colombianos Registrados en la Estación BOCO. *Memorias del Segundo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, 16 al 19 de Octubre*, Madrid, España, 2001.

Alfaro-Arias, C., Van Hissenhoven, R. y Alfaro, A. Caracterización en el Dominio de la Frecuencia de Sismos Colombianos. *Memorias XIV Jornadas Estructurales de la Ingeniería de Colombia, 19 al 21 de Septiembre*, Bogotá, 2001.

Alfaro, A. y Giraldo, V. Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Espectro Sísmico de Diseño para el Hospital Universitario San Ignacio, versión 1.0, Julio 29 de 2002. Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002.

Alfaro, A y Monroy, P. "Caracterización Dinámica de Arcillas Sobre la Formación Bogotá". *Revista de Investigación* 4. (2004): 173 - 180.

Alfaro, A., Giraldo, V., Ramos, M. y García, D. Información Geotécnica en la Zona del Edificio Gabriel Giraldo, S. J., Bogotá, Julio de 2002. Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002a.

- Alfaro A., Giraldo, V., Ramos, M y García, D. Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Caracterización Geotécnica del Campus Universitario. Bogotá, Septiembre de 2002. Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002b.
- Alfaro A., Giraldo, V., Ramos, M. y García, D. Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Modelación Numérica de Efectos Locales. Bogotá, Noviembre de 2002. Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002c.
- Alfaro A., Arévalo, M., García, D., Caicedo, T. y Ramos, A. Propuesta de Espectros Sísmicos de Respuesta y Diseño para Basamento Rocoso en el Oriente de Bogotá. Primer Congreso Latinoamericano y Segundo Colombiano de Sismología. CDROM, 2004.
- Alfaro, A., *et al.* “Modelación 1D y 2D de efectos locales en algunas arcillolitas de la formación Bogotá al centro-oriente de la ciudad”. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería* 38. (2005): 25 - 30.
- Arévalo-Caro, N. y Alfaro, A. Contenidos Frecuenciales de Sismos Colombianos Registrados en BOCO y en SDV. *Memorias del Primer Simposio Colombiano de Sismología*. Bogotá, 2002.
- Arévalo, N. Caycedo, T., Van Hissenhoven, R. y Alfaro, A. Contenidos Frecuenciales de sismos colombianos registrados en BOCO (Bogotá) y SDV (Santo Domingo, Venezuela) (1994-1996) *Ingeniería y Universidad* 7. 1. (2003): 19 – 31.
- Caneva, A. “Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Estudio de Amenaza Sísmica”. Bogotá, 2002.
- Caneva A., Salcedo, E., Van Hissenhoven, R. y Alfaro, A. “Análisis de la Amenaza Sísmica y de la Magnitud Representativa para Bogotá”. *Ingeniería y Universidad* 7. 2. (2003): 133 - 150.
- Caneva, A., Salcedo, E., Van Hissenhoven, R. y Alfaro, A. “Estudio de sismicidad regional para el análisis de la amenaza sísmica de Bogotá”. *Ingeniería y Universidad*. 8. 1. (2004): 9 – 25.
- Congreso de Colombia, 1997. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente 1998. Ley 400 de 1997
- Edu Pro Civil Systems, Inc. EduShake Versión 1.10. Redmond. 1999.
- García, D. “Estimación de Efectos Locales en el Campus de la Universidad Javeriana Mediante Modelación Numérica”. Trabajo de Grado, 2001.
- García, D. y Alfaro, A. “Caracterización Geotécnica del Campus de la Universidad Javeriana”. *I Congreso Internacional y XII Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Civil, ANEIC 2001*.
- García, D. y Alfaro, A. “Estimación de Efectos Locales en el Campus de la Universidad Javeriana Mediante Modelación Numérica”. *Memorias del Segundo Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, 16 al 19 de Octubre de 2001 Madrid - España*. (2001b): 181 - 191. Doc 100.6.pdf.
- García, D. y Alfaro, A. “La Prevención Sísmica Empieza por Casa. Estudios de Microzonificación Sísmica en el Campus de la Universidad Javeriana – Bogotá – Colombia”. *Memorias del XIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Octubre 31 a Noviembre 3 de 2001 Guadalajara – México*, 2001c. Doc T11A04.pdf.
- García, D., Alfaro, A. y Giraldo V. “Estimación de los Efectos Locales para la Reducción del Riesgo Sísmico en el Campus de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá”. *Memorias de las XIV Jornadas Estructurales de la Ingeniería en Colombia, Septiembre 19, 20 y 21*. Bogotá, 2001.

- Geotecnia y Cimentaciones Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana – Sede Bogotá. Exploración Geotécnica, 2002.
- Giraldo V., Alfaro, A. y García, D. “Estimación de Efectos Locales en el Campus de la Universidad Javeriana Mediante Modelación Numérica”. Proyecto VA-913, Bogotá. Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002.
- Housner, G. W. “Calculations of the Response of an Oscillator to Arbitrary Ground Motion”. *Bull. Seism. Soc. of Am.* 31. (2002): 143 - 149.
- Hudson, M., Idriss, I. y Beikae, M. Quad4M A Computer Program to Evaluate the Seismic Response of Soil Structures Using Finite Element Procedures and Incorporating a Compliant Base. University of California, 1994.
- Idriss, I., Dezfulian, H. y Seed, H. *Computer Programs for Evaluating the Seismic Response of Soil Deposits with Non-linear Characteristics Using Equivalent Linear Procedures*. Univ. Of California. Berkeley, 1969.
- Idriss, I., Lysmer, M., Hwang, R. y Bolton Seed, H. QUAD-4 A Computer Program for Evaluations the Seismic Response of Soil Structures by Variable Damping Finite Element Procedures. University of California, 1973.
- Idriss, I. y Sun J. Shake '91: A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response Analyses of Horizontally Layered Soil Deposits. University of California, 1992.
- Lobo-Guerrero, A. “Microzonificación sísmica del campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Estudio Geológico”, 2002.
- Nigam, N. and Jennings, P. “Calculation of Response Spectra from Strong Motion Earthquake Records”. *Bull. Seis. Soc. Amer* 59. 2. (1969): 909 - 922.
- NOAA, National Oceanic And Atmospheric Administration. Earthquake Strong Motion. CD-ROM, (1996).
- Paredes, S. Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Sede Bogotá. Levantamiento Topográfico del Campus Universitario. Bogotá, Septiembre de 2002. Instituto Geofísico Universidad Javeriana, 2002.
- Schnabel, B., Lysmer, J. y Seed, H. Shake. A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites. College of Engineering University of California, Berkeley, 1972.
- Ulloa, A. Microzonificación Sísmica del Campus de la Pontificia Universidad Javeriana – Sede Bogotá. Prospección Geosísmica. Bogota, Julio de 2002.