



## LA PREVENCIÓN SÍSMICA EMPIEZA POR CASA. ESTUDIOS DE MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD JAVERIANA - BOGOTÁ - COLOMBIA

**D. García Borrero y A. Alfaro Castillo**

Instituto Geofísico Universidad Javeriana  
Trv 4 # 42-00. Tels 3208320 ext 4731  
E-mail: garciadfb@javeriana.edu.co  
Bogotá - Colombia

### RESUMEN

El Campus de la Universidad Javeriana de la ciudad de Bogotá, está localizada en zona de amenaza sísmica importante, con aceleraciones esperadas de 0.20g en roca, afectada por una variedad de sistemas de fallas que presentan alguna actividad, principalmente el sistema de fallas de Guaicaramo. El Instituto Geofísico de la Universidad Javeriana ha emprendido la labor de estimar los posibles efectos sísmicos locales en el Campus Universitario con el ánimo de reducir el riesgo sísmico de sus edificaciones esenciales. Resultados de las investigaciones indican que los suelos presentes en el Campus Universitario poseen características geotécnicas satisfactorias, pero debido a los bajos espesores de suelo y la localización bastante somera de la Formación Bogotá, los períodos predominantes del suelo están en el rango de los períodos de los edificios, lo cual es crítico por el fenómeno de resonancia

### SUMMARY

The Javeriana University in the city of Bogotá, is located in a zone of considerable seismic hazard (pga 20%g), caused by a variety of systems of active faults, specially Guaicaramo fault. Javeriana University Geophysical Institute has undertaken to estimate the seismic local effects in the Campus with a view to reducing the seismic risk of the university's main buildings. Results of the research indicate that the soils present in the University Campus have satisfactory statical geotechnical characteristics. However, due to the low thickness of soils and the superficial of the Bogotá Formation, as well as the fact that the predominant periods of the soils are coincident with periods of the buildings, which it is a serious problem due to resonance phenomena.

### INTRODUCCION

#### Fundamentos Básicos

Enmarcados dentro del gran esfuerzo que realiza el país tendiente a la reducción del Riesgo Sísmico de sus ciudades, principalmente de sus edificaciones esenciales, el Instituto Geofísico de la Pontificia Universidad Javeriana ha emprendido la labor de la estimación de los posibles efectos sísmicos locales en el Campus de la Universidad, por contener esta Auditorios, Aulas, y principalmente al Hospital Universitario San Ignacio, que en caso de un evento sísmico deberá funcionar en forma excepcional a plena carga.

La influencia de las condiciones locales, tipo de suelo y topografía sobre una señal sísmica, modificando su amplitud, contenido frecuencial y duración, es ampliamente conocida. Se define efecto sísmico local como la variación de la señal sísmica entre dos puntos próximos, debido a la configuración geológica caracterizada por su geometría y sus propiedades dinámicas (velocidades de las ondas S y P, densidad, módulo de corte y coeficiente de amortiguamiento, entre otros).

Existe variedad de métodos para evaluar los efectos sísmicos locales dentro de los cuales se pueden citar los siguientes: Métodos Empíricos Instrumentales, cuyo objetivo fundamental es determinar la función de transferencia del depósito superficial de manera puramente experimental. Métodos Empíricos Indirectos, donde se incluyen técnicas basadas en las observaciones experimentales de los daños producidos por la vibración sísmica, en relación con la naturaleza del suelo y sus propiedades mecánicas. Métodos numéricos, la modelación numérica, herramienta fundamental en el desarrollo del presente trabajo, la cual es especialmente útil para la evaluación de los efectos sísmicos locales, principalmente en los lugares en los que no se dispone de los requerimientos necesarios para utilizar los métodos experimentales, como es el caso del Campus Universitario.

## **OBJETIVOS**

Los objetivos del presente trabajo son:

- Estimar los efectos sísmicos locales para el Campus de la Universidad Javeriana debidos a las características del subsuelo, estimando la amenaza sísmica local para las estructuras que hacen parte de la planta física de la Universidad.
- Caracterizar estática y dinámicamente los diferentes tipos de suelo existentes en el campus universitario.
- Evaluar la respuesta sísmica de los distintos perfiles estratigráficos mediante simulación numérica de efectos locales.
- Formular recomendaciones fundamentadas en la información recopilada y los resultados obtenidos, proporcionando así un punto de partida en futuros estudios de vulnerabilidad y riesgo.

## **DESARROLLO DEL TRABAJO**

Para el desarrollo del presente trabajo se adoptó la siguiente metodología que se esquematiza en el diagrama de flujo de la Figura 1.

**El procedimiento se puede definir de la siguiente manera:**

### **Recopilación de información**

Se recopiló información geotécnica local, compuesta por 17 estudios de suelos que comprenden 57 sondeos repartidos en un área de 14.3 hectáreas, con profundidades que varían entre 4.5 y 20.0m. Como constante se encuentra la Formación Bogotá (Tpb) Caracterizada por una Arcillolita de consistencia alta en algunos casos moderadamente meteorizada. Estos estudios hacen parte de los proyectos planteados y construidos que componen la Infraestructura física de la Pontificia Universidad Javeriana.

### **Análisis de datos**

En los estudios de suelos se encuentran resultados de ensayos tanto de laboratorio como de campo: humedad natural, límites de consistencia, lavados sobre los tamices # 40 y 200 (Ensayos de Clasificación), penetrometro manual, veleta de campo, compresión inconfiada y resultados del ensayo de penetración estándar SPT. Con estos parámetros se elaboró una base de datos geotécnicos para el campus Universitario (García-Borrero y Alfaro, 2001) y de acuerdo a los ensayos de clasificación y espesores de suelo encontrados se logró caracterizar geotécnicamente el Campus Universitario.

### **Caracterización dinámica**

Se requiere estimar los principales parámetros dinámicos necesarios para el proceso de modelación. Estos

parámetros se estiman en función de los parámetros geotécnicos existentes. Así tanto la curva de variación del módulo de corte y del coeficiente de amortiguamiento en función de la deformación angular se estimaron a partir de correlaciones empíricas en función del índice de plasticidad del material plástico o se utilizaron curvas teóricas en el caso de suelos de carácter granular. Ejemplos de estas curvas se observan en la figura 2.

### Estimación de la velocidad de ondas de corte

Mediante las correlaciones de Ohta y Goto (1978), se estimó la velocidad de ondas de corte  $V_s$  para los diferentes tipos de suelo presentes, en función del resultado del ensayo de penetración estándar normalizado al 60% de la energía  $N_{60}$  (Decourt, 1989). Para determinar la velocidad de propagación de las ondas de corte en la Formación Bogotá, se utilizaron los resultados de los estudios de refracción sísmica realizados por Ingeominas (1997), estudios realizados para la Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá D.C.

Un ejemplo de columna estratigráfica por sondeo realizado caracterizada por parámetros geotécnicos y dinámicos se observa en la figura 3.

### Selección de la señal de entrada

El proceso de modelación requiere el uso de un registro sísmico en roca. Dicho registro debe ser acorde al nivel de amenaza sísmica local para la zona en estudio. El Campus de la Pontificia Universidad Javeriana se encuentra localizado en la ciudad de Bogotá, la cual según las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (Ley 400 de 1997, Decreto 33 de 1998, Decreto 34 de 1999), se ubica en la Zona de Amenaza Sísmica Intermedia, en la cual la aceleración pico efectiva para diseño es  $A_a = 0.20$ .

Los sismos empleados para la modelación numérica se presentan en la Tabla 1. La utilización de estos cinco registros busca simular el proceso estocástico de los sismos.

Sismo	Fecha	Magnitud
Yerba	1989 (sismo de Loma Prieta)	7
El Centro	1940 (sismo del Imperial Valley)	7
Petrolia	1992 (Sismo Cape Mendocino)	7
Topanga	1994 (sismo de Northridge)	6.7
Taft	1952 (sismo de Kern County)	7.4

El análisis en el dominio de la frecuencia, indica que los sismos de El Centro (Figura 4) y Taft (Figura 5) poseen amplios contenidos frecuenciales de 0.1Hz a 10Hz. De los estudios de Alfaro-Arias y Alfaro (2001) y Alfaro-Arias (2001), quienes analizaron los contenidos frecuenciales de cuatro fuentes sísmicas colombianas a saber: Nido de Bucaramanga (Figura 6), Sistema de Fallas de Atrato (Figura 7), Sistema de Fallas de Romeral (Figura 8) y el Sistema de Fallas de Guaicaramo (Figura 9), esta última la fuente sismogénica que más incidencia tiene sobre Bogotá, se sabe que los contenidos frecuenciales están entre 0.03Hz y 8.9Hz, por lo tanto el registro de El Centro como el de Taft son representativos. Este último puede ser bastante representativo por cuatro razones: magnitud ( $M_s = 7.4$ ), aceleración pico (0.19g), distancia epicentral (42km) y contenidos frecuenciales, características muy similares a la amenaza estimada para la zona.

### Modelación Numérica

Como método de modelación numérica se emplea el Método Unidimensional lineal equivalente: programa Shake'91 (Idriss & Sun, 1992), además se hace uso de la última actualización del mismo: programa Edushake. (Edupro Civil Systems, 1999)

Mediante la modelación numérica, se estimaron las funciones de transferencia del subsuelo, los periodos dominantes y las amplificaciones asociadas para cada uno de los sondeos realizados en el Campus Universitario.

## RESULTADOS

### Caracterización Geotécnica

Resultado de la recopilación de información geotécnica se elaboró una base de datos geotécnicos (García-Borrero y Alfaro 2001), de la cual se logra caracterizar el Campus Universitario como sigue: Según los resultados de los ensayos de clasificación y su descripción se observa que el tipo de material predominante en el campus universitario son las arcillas de baja plasticidad (CL), en menor proporción se encuentra arcillas de alta plasticidad (CH), limos de baja plasticidad (ML) que en algunos casos presentan lentes de arenas e intercalaciones de gravas. Igualmente existe presencia de suelos de carácter granular como arenas limosas (SM) y arenas arcillosas (SC). No se presenta en ninguno de los sondeos suelos con materia orgánica.

La mayoría de los sondeos finalizan al encontrar en profundidad la arcillolita rojiza perteneciente a la Formación Bogotá, siendo esta más próxima hacia los sectores oriental (sector de la Avenida Circunvalar), central (Hospital Universitario San Ignacio) y nororiental (sector de la calle 45). Hacia los sectores, suroriental (sector de la carrera 5), la formación Bogotá se alcanza para profundidades de aproximadamente 20m, e igualmente en el sector sur del campus universitario (Ed. Gabriel Giraldo y límites con el parque nacional) las condiciones del subsuelo hacen referencia a depósitos de coluvión (Qdp) debido a la presencia de gravas y rocas de gran magnitud en una matriz limosa y/o arcillosa. En la figura 10, se presenta la localización de los sondeos realizados.

### Resultados del proceso de Modelación

Los resultados de las funciones de transferencia evaluadas para los sondeos correspondientes a los distintos emplazamientos de las estructuras se presentan en la Tabla 2.

<b>Tabla 2. Resultados del proceso de Modelación</b>			
SONDEO	EMPLAZAMIENTO	Período (seg)	Amplitud
1	Acceso oriental Túnel	0.1	3.5
2		0.13	5
3		0.06	4.5
4	Ed. Facultad de Teología	0.6	2.5
5		0.6	2.5
6		0.4	2.7
7		0.4	2.8
8	Centro Deportivo –Gimnasio	0.075	3.5
9		0.09	2.8
10		0.15	3.3
11		0.2	4
12		0.2	5
13		0.08	5
14		0.07	3.2
15	Accesos vehiculares Ed. Estacionamientos	0.05	1.8
16		0.05	1.4
17	Ed. Centro Oncológico	Formación Bogotá Superficial	
18			
19	Ed. Lorenzo Uribe	0.3	2.6
20		0.2	2.4
22	Ed. Rafael Arboleda	0.3	3.2

<b>Tabla 2. Resultados del proceso de Modelación</b>			
<b>SONDEO</b>	<b>EMPLAZAMIENTO</b>	<b>Período (seg)</b>	<b>Amplitud</b>
23	Ed. Estacionamientos - Don Guillermo Castro	0.08	3.2
24		0.06	4.3
26		0.06	5
27		0.05	3.4
31	Cafeteria Empalme	0.3	3.9
32		0.25	3.4
33	Ed. Fernando Barón	0.07	3.3
34		0.15	3
35		0.25	3.2
36		0.5	2.4
37		0.2	3.5
38		0.5	3
39	Proyecto Ed. Aulas y Parqueaderos, Sector Av. Circunvalar	0.12	3.25
40		0.25	3
41		0.3	3.3
42		0.15	3.4
44		0.2	3.4
45		0.2	2.8
46	Proyecto Ed. Aulas Cataluña	0.09	3.5
48		0.08	3.3
49		0.15	3.5
50	Proyecto Ed. Parqueaderos UNESIS	0.09	2.75
52		0.3	2.7
53	Puente peatonal Cra 6 - Cll 40	0.05	1.92
54		0.05	4.3

En la figura 10, también se presentan los períodos predominantes relacionados en la tabla 2.

## **CONCLUSIONES**

Existe variabilidad del subsuelo en el Campus Universitario; predominan suelos de carácter plástico, arcillas de baja plasticidad (CL) principalmente, en menor proporción arcillas de alta plasticidad (CH) y Limos (ML), en menor proporción se presentan suelos de carácter granular como arenas limosas (SM) o arenas arcillosas (SC),

Debido a la localización del Campus Universitario dentro del entorno geológico y geotécnico de la ciudad de Bogotá, su cercanía a los cerros orientales hace que se presenten depósitos de tipo coluvial (Qpd), situación que se corrobora de acuerdo a la presencia de intercalaciones de arenas y gravas en los perfiles caracterizados.

La Formación Bogotá (Tpb), compuesta por una arcillolita rojiza ligeramente meteorizada en algunos casos, constituye el basamento rocoso en el campus Universitario.

Para cargas estáticas, es decir, capacidad portante, los suelos presentes en el Campus Universitario son satisfactorios, lo mismo que los asentamientos esperados, sin embargo desde el punto de vista dinámico debido a los bajos espesores y a que la roca sana (Formación Bogotá) se encuentra bastante somera, se estiman períodos bajos que varían entre 0.05 y 0.6 segundos.

Estos períodos pueden en un momento dado coincidir con los períodos fundamentales de las estructuras, generando así posibles inconvenientes de tipo estructural. Por otra parte las funciones de transferencia, permiten

estimar que la amplificación del movimiento sísmico en roca debido a las condiciones locales varía entre 1.4 y 5.0 veces. Este es un paso en las labores de Prevención de Desastres de tipo Sísmico en el Campus de la Universidad Javeriana –Sede Bogotá.

## REFERENCIAS

**Alfaro Arias, C.** (2001) ‘Caracterización en el dominio de la frecuencia de sismos colombianos’ Proyecto de Grado. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

**Alfaro Arias, C y A. Alfaro** (2001) ‘Caracterización en el dominio de la frecuencia de sismos colombianos registrados en la estación BOCO’ I Congreso Internacional y XII Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Civil, ANEIC 2001. Disponible en <http://ainsuca.javeriana.edu.co/geofisico/documentos>.

**Arango, G.** (1998) ‘Informe del Rector al Consejo de Regentes 1989-1998’. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

**Décourt, L** (1989). ‘The Standart Penetration Test, State of the Art Report.’

EduPro Civil Systems, Inc (1999). EduShake Versión 1.10. Redmond.

**García Borrero, D.** (2001) ‘Estimación de Efectos Locales en el campus de la Universidad Javeriana Mediante Modelación Numérica’. Proyecto de Grado. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.

**García Borrero, D y A. Alfaro** (2001) ‘Caracterización Geotécnica del Campus de la Universidad Javeriana’. I Congreso Internacional y XII Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Civil, ANEIC 2001. Disponible en <http://www.ainsuca.javeriana.edu.co/geofisico/documentos/caract.javeriana.pdf>

**Geotécnia y Cimentaciones** (1992). ‘Estudio Geotécnico Puente Peatonal Calle 40 Edificio Gabriel Giraldo.’ Bogotá.

Ingeominas, Unidad de Prevención y Atención de Desastres y Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y Universidad de Los Andes (1997). ‘Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá.’

**Ohta, Y. and N. Goto** (1978). Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes, Earthquake Eng. Struc. Dyn., 6, 167-187.

**Pablo Sáenz y Cia.Ltda.** (1994). ‘Edificio de Parqueaderos Unesis. Estudio de Suelos y Recomendaciones de Cimentación.’ Bogotá.

**Pablo Sáenz y Cia.Ltda.** (1991). ‘Gimnasio. Estudio de Suelos y Recomendaciones de Cimentación.’ Bogotá.

**Pablo Sáenz y Cia.Ltda.** (1989). ‘Lote Anexo Instituto Geofísico de los Andes. Estudio Preliminar de Suelos’ Bogotá.

**Pablo Sáenz y Cia.Ltda.** (1984). ‘Edificio ‘Jesús Emilio Ramírez’. Estudio de Suelos.’ Bogotá.

**Pablo Sáenz y Cia.Ltda.** (1980). ‘Edificio Servicios generales. Estudio de Suelos y Recomendaciones de Cimentación.’ Bogotá.

**Pablo Sáenz y Cia.Ltda.** (1971). ‘Proyecto División de Ingenierías Universidad Javeriana. Estudio de Suelos y Recomendaciones de Cimentación.’ Bogotá.

**Sáenz Ruiz Cadena** (1999). ‘Recomendaciones de Cimentación Acceso Oriental Túnel K7 Universidad Javeriana.’ Bogotá.

**Sáenz Ruiz Cadena** (1999). ‘Proyecto Facultad de Teología. Estudio de Suelos, Recomendaciones de Cimentación y Sistema Constructivo.’ Bogotá.

**Sáenz Ruiz Cadena** (1998). ‘Proyecto Centro Deportivo Gimnasio Anexo al Coliseo. Estudio de Suelos, Recomendaciones de Cimentación y Sistema Constructivo.’ Bogotá.

**Sáenz Ruiz Cadena** (1997). ‘Accesos Vehiculares #1 y #2 Edificio de Parquaderos. Estudio de Suelos, Recomendaciones de Cimentación y Sistema Constructivo.’ Bogotá.

**Sáenz Ruiz Cadena** (1996). ‘Edificio Centro Oncológico. Estudio de Suelos y Recomendaciones de Cimentación.’ Bogotá.

**Sáenz Ruiz Cadena** (1996). ‘Edificio Carrera Séptima. Estudio de Suelos y Recomendaciones de Cimentación.’ Bogotá.

**Sáenz Ruiz Cadena** (1996). ‘Edificio de Empalme y Estacionamientos. Estudio de Suelos, Recomendaciones de Cimentación y Proceso Constructivo.’ Bogotá.

**Sáenz Ruiz Cadena** (1996). ‘Estudio de Suelos SRC 3277. Cafetería Empalme Universidad Javeriana.’ Bogotá.

**Sáenz Ruiz Cadena** (1995). ‘Edificio de Aulas (Lote Anexo Inst. Geofísico de los Andes) . Recomendaciones de Cimentación y Sistemas de Muros y Sótano.’ Bogotá.

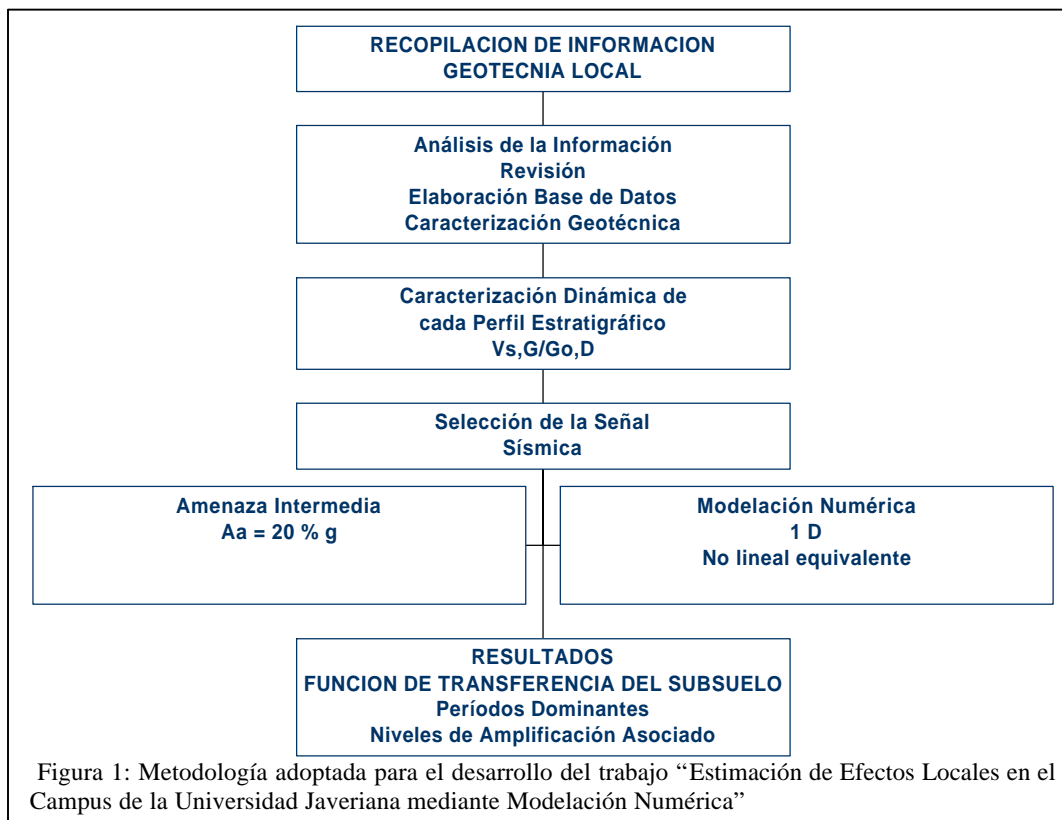
**Sáenz Ruiz Cadena** (1994). ‘Edificio para Aulas y Parquaderos Sector Avenida Circunvalar. Estudio de Suelos y Recomendaciones de Cimentación.’ Bogotá.

**Sáenz Ruiz Cadena** (1994). ‘Bloque de Aulas Edificio Cataluña. Estudio de Suelos y Recomendaciones de Cimentación’. Bogotá.

**Schnabel, B.; J. Lysmer y H.B. Seed** (1972). Shake. A computer program for earthquake response análisis of horizontally layered sites. College of engineering University of California, Berkeley.

### **Agradecimientos**

El Análisis y Consulta de los Estudios de Suelos ha sido posible gracias a la colaboración de los Arquitectos Lina Achury y Octavio Moreno de la Oficina de Planta Física de la Pontificia Universidad Javeriana.



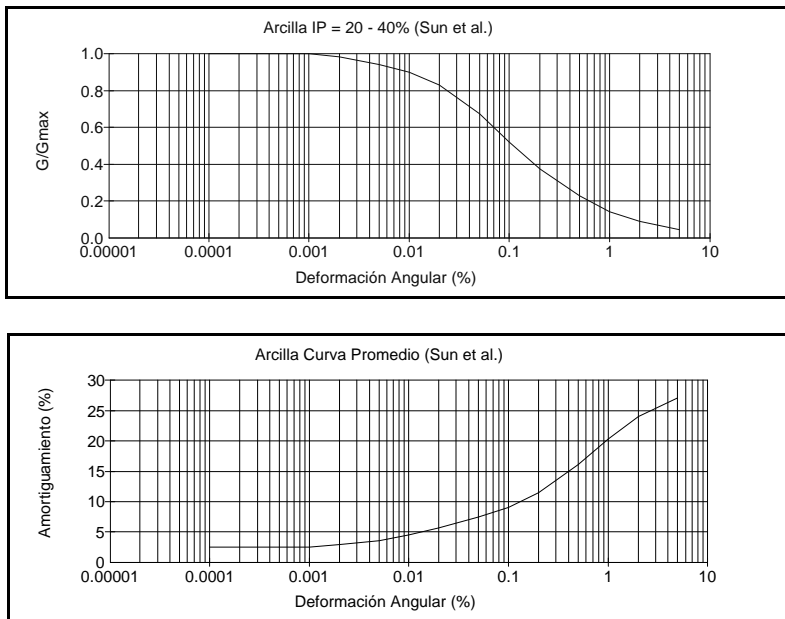
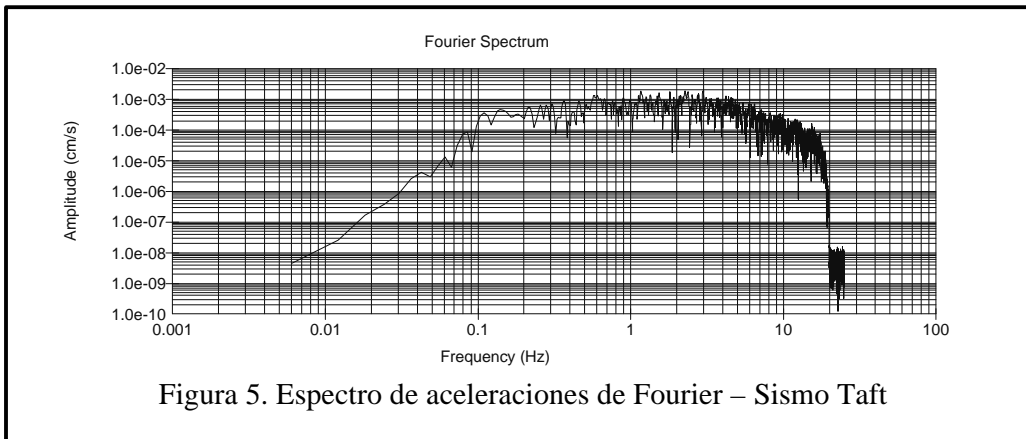
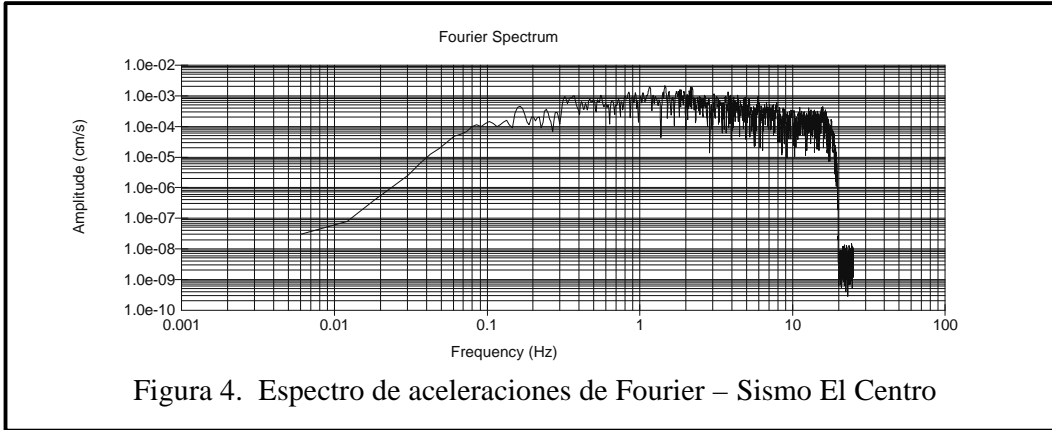
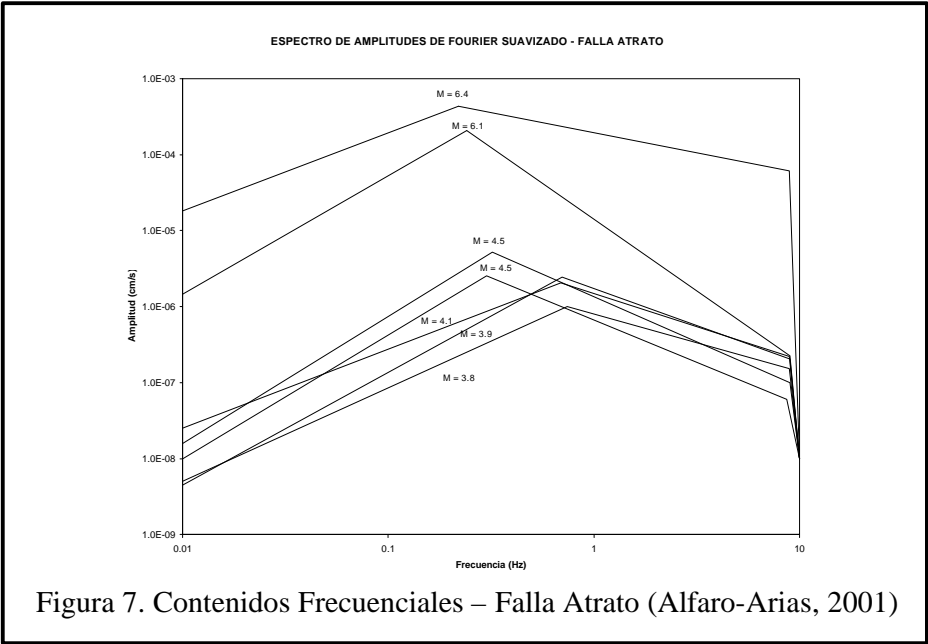
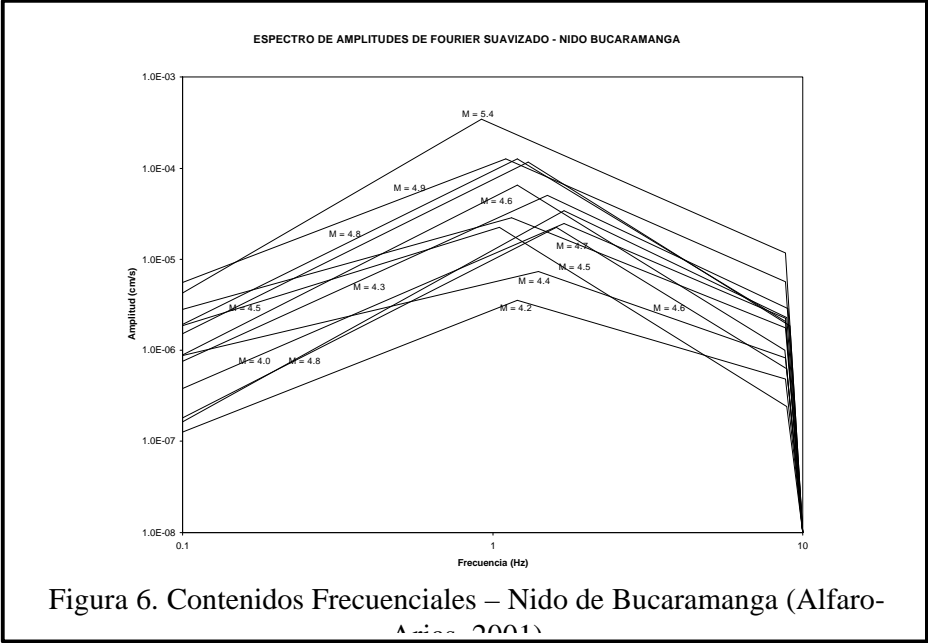


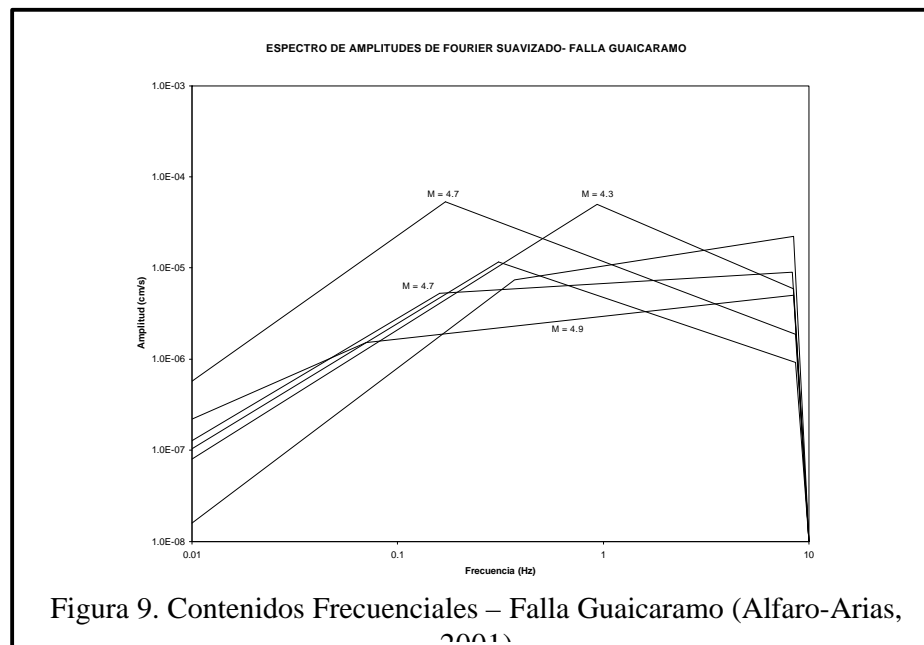
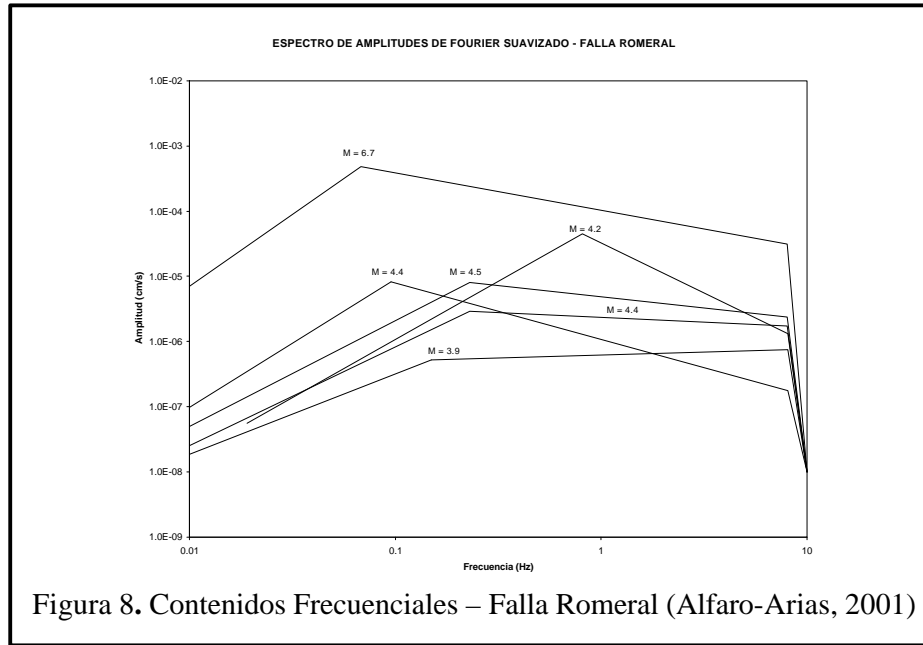
Figura 2. Curva de variación del módulo de corte dinámico estimada en función de las propiedades índice de los suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) IP = 25%

Summary Data   1   2   3   4   5									
Layer No	Material Name	Thickness (m)	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	Vs (m/s)	Mod. Reduction Curve	Mod. Parameter	Damping Curve	Damping Parameter
1	Limo arcilloso	0.6	18.6	35.7	137.0	Vucetic - Dobry	11.0	Vucetic - Dobry	11.0
2	Arcilla amarilla con vetas grises	0.5	21.9	45.6	143.0	Vucetic - Dobry	11.0	Gravel (Seed et al.)	11.0
3	Arcilla habana	0.4	21.9	38.9	132.0	Vucetic - Dobry	20.0	Vucetic - Dobry	20.0
4	Arcilla gris	0.5	21.9	96.5	208.0	Vucetic - Dobry	20.0	Vucetic - Dobry	20.0
5	Formación Bogotá (Tpb)	Infinite	24.5	1225.7	700.0	Rock		Rock	

Figura 3: Perfil estratigráfico totalmente caracterizado y dato de entrada para el proceso de modelación.







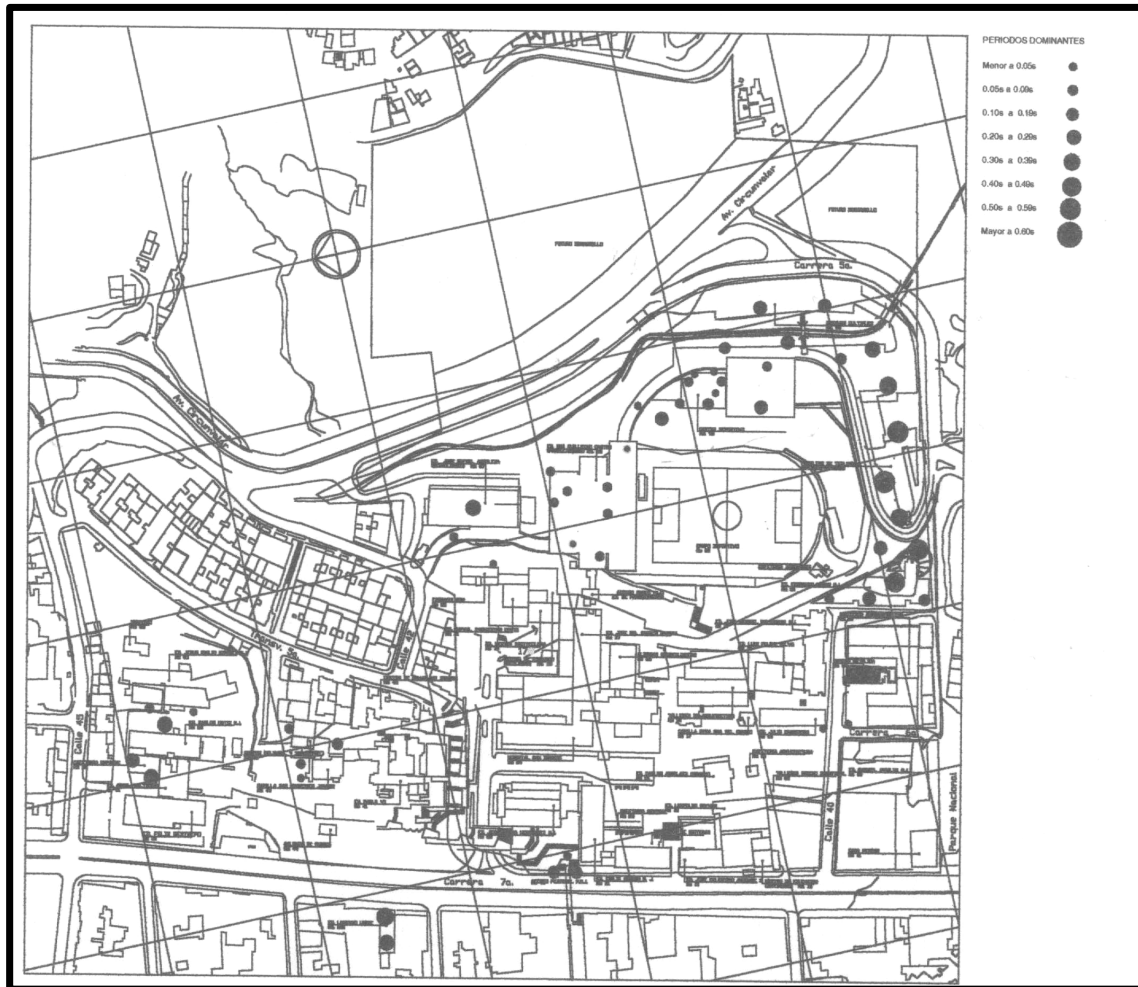


Figura 10: Campus Universitario, ubicación de sondeos y zonas analizadas mediante el proceso de modelación. Períodos dominantes estimados.