



## **Respuesta sísmica del suelo en la ciudad de Bucaramanga a partir de los registros de la red de acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES – CDMB**

### **Seismic ground response in Bucaramanga city based on the records of the strong motion network of Seismological Observatory UDES - CDMB**

*Carlos Fernando Lozano Lozano* <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Ingeniero Civil, MSc Geofísica, Profesor Asistente, Universidad de Santander, Bucaramanga.  
Dirección para correspondencia: ca.lozano@mail.udesa.edu.co

#### **Ingeniería Sismo - Geotécnica**

#### **Resumen**

La ciudad de Bucaramanga, capital del departamento de Santander, está ubicada en una zona de alta amenaza sísmica según el Reglamento NSR-10 y puede verse afectada por un sismo producto de la convergencia de las fallas geológicas de Bucaramanga – Santa Marta, la Falla Frontal de la Cordillera Oriental y la actividad del denominado Nido Sísmico de Bucaramanga. Los daños en la ciudad se pueden incrementar debido a los efectos de la amplificación de las ondas sísmicas causados por las características particulares del subsuelo y en algunos casos a la topografía del terreno, situación que sumada a la vulnerabilidad de gran parte de las edificaciones de la ciudad constituyen un riesgo importante para la sociedad en general.

El estudio de Zonificación Sismo Geotécnica de Bucaramanga (ZSGB) realizado por el Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS (actualmente Servicio Geológico Colombiano - SGC) en el año 2001, dividió la ciudad en tres (3) zonas de respuesta sísmica que corresponden a Roca, Suelos Rígidos y Llenos. Dado que en la época del estudio de ZSGB no existía instrumentación sísmica en la ciudad, la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga - CDMB instaló en el año 2013 una red conformada por 8 acelerógrafos ubicados en diferentes zonas de respuesta sísmica para el monitoreo local y la evaluación de fenómenos de efectos de sitio.

Este artículo presenta el análisis de la respuesta sísmica de los suelos de la ciudad de Bucaramanga con base en la determinación de espectros de respuesta a partir de la información registrada de eventos sísmicos con magnitud mayor a 4.8 por la Red de Acelerógrafos operada por el Observatorio Sismológico UDES – CDMB. Se realiza una comparación con los espectros de diseño propuestos en la ZSGB para establecer si cubren las distintas formas de los espectros de respuesta registrados. Los resultados de esta investigación aportan al conocimiento para la gestión integral del riesgo sísmico en la ciudad de Bucaramanga.

**Palabras-clave:** Acelerógrafo, respuesta sísmica, espectro de respuesta.



## Abstract

Bucaramanga, the capital city of the Santander department, is located in a high seismic hazard zone according to the Colombian seismic code (NSR-10) and could be affected by a seismic event as a consequence of the geological fault convergence of the Bucaramanga – Santa Marta system, the “Frontal de la Cordillera Oriental” fault and the activity of the renowned “Nido sísmico de Bucaramanga”. The damages in the city can increase as a consequence of the seismic wave amplification caused by the particular characteristics of the subsoil in the city and in some cases the ground topography, factors that added to the vulnerability of the buildings, constitute an important risk to society in general.

The Seismic and Geotechnical Zonation of Bucaramanga (ZSGB) study developed by Colombian Institute of Geology and Mining - INGEOMINAS (now Colombian Geological Survey - SGC) at 2001, divided the city into three (3) response seismic zones: Rock, Rigid Soils and Soft Soils (Llenos). Given the fact that at the time of the study there was no seismic instrumentation in the city, the Regional Autonomous Corporation of Bucaramanga City - CDMB installed in 2013 a network consisting of 8 accelerographs located in different seismic response zones for the local monitoring and evaluation of site effects phenomena.

This paper presents the analysis of the seismic soil response for Bucaramanga based on response spectra determination from data of seismic events with magnitude over 4.8 recorded by the Strong Motion Network operated by the Seismological Observatory UDES – CDMB. A comparison with the design spectra proposed by the ZSGB is presented in order to establish if it covers the different shapes of the recorded response spectra. The results of this research will contribute to the integrated seismic risk management in the city of Bucaramanga.

**Keywords:** Accelerograph, seismic response, response spectra.

## 1. Introducción

El conocimiento del riesgo sísmico en el área metropolitana de Bucaramanga es un asunto de gran importancia debido a que es una de las zonas de mayor proyección en el país por su crecimiento económico, industrial y comercial en los últimos años. El área metropolitana de Bucaramanga se encuentra ubicada dentro de un ambiente sismo tectónico de reconocida actividad histórica, en la cual tiene influencia el denominado Nido Sísmico de Bucaramanga (que concentra la mayor parte de la actividad sísmica que ocurre en el territorio colombiano), y las fuentes sismogénicas que tendrían efectos sobre el departamento de Santander, que corresponden a los sistemas de fallas Bucaramanga – Santa Marta, falla Suárez y falla Frontal de la Cordillera Oriental.

En el pasado, el área metropolitana de Bucaramanga fue afectada por eventos sísmicos ocurridos en 1957, 1967 y 2015 los cuales produjeron daños en zonas cercanas al epicentro (SGC, 2018). Dados estos antecedentes, el Instituto Colombiano de Geología y Minería – INGEOMINAS y la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga – CDMB realizaron el estudio de Zonificación Sismo Geotécnica de Bucaramanga – ZSGB (INGEOMINAS, 2001), el cual divide el área metropolitana de Bucaramanga en tres zonas, cada una con un espectro de diseño típico, basado en la caracterización geotécnica y en los resultados de modelaciones de la respuesta sísmica de los suelos. Las zonas se encuentran divididas en: Zona 1 – Roca, Zona 2 – Suelo Rígido y Zona 3 – Llenos.

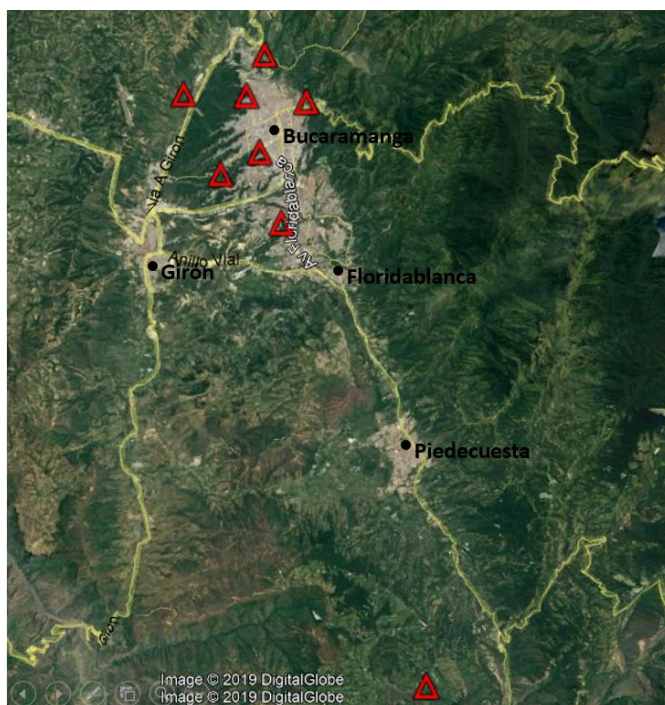
En el momento de la ejecución de las investigaciones correspondientes a la ZSGB (INGEOMINAS, 2001), los datos disponibles de acelerogramas de eventos sísmicos registrados en estaciones ubicadas en el área metropolitana de Bucaramanga, permitieron proponer modelos de respuesta ante comportamiento dinámico con un grado de confiabilidad acorde con el estado del arte y la información existente en su momento, logrando un aporte muy significativo en materia de caracterización geológica y geotécnica.

En el año 2013, la CDMB comenzó un proyecto de instalación y mantenimiento de una red de acelerógrafos para el área metropolitana de Bucaramanga, y en el año 2016 se inició el proyecto Observatorio Sismológico UDES – CDMB mediante un convenio con la Universidad de Santander – UDES para realizar actividades de monitoreo sísmico y el desarrollo de proyectos de investigación que permitan mejorar el conocimiento del riesgo sísmico en la región.

En este artículo se presenta la red de acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES – CDMB, así como la verificación de la respuesta sísmica del suelo evaluada en la Zonificación Sismo Geotécnica de Bucaramanga mediante el análisis de los registros sísmicos obtenidos con la instrumentación acelerográfica operada por el Observatorio Sismológico UDES - CDMB en el área metropolitana de Bucaramanga, aportando nuevos criterios y herramientas de discusión para la actualización de los espectros y parámetros de diseño sismo resistente en la ciudad.

## **2. Red de Acelerógrafos de Bucaramanga**

Los objetivos que se plantearon con la operación de la red de acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES – CDMB son: Instrumentación de las zonas caracterizadas en el estudio de Zonificación Sismo Geotécnica de Bucaramanga, llevar a cabo el registro de movimientos fuertes y débiles con incidencia en el área metropolitana de Bucaramanga, procesamiento y análisis de la información registrada, comparación de resultados de la respuesta sísmica de los suelos con el estudio de ZSGB y la elaboración de una base de datos para la organización de los registros sísmicos. La Figura 1 y la Tabla 1 presentan la ubicación y características de las estaciones de la red de acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES – CDMB.



**Figura 1. Ubicación de las estaciones de la red de acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES - CDMB. Los triángulos rojos muestran las estaciones en superficie.**

**Tabla 1. Ubicación de las estaciones de la Red de Acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES - CDMB.**

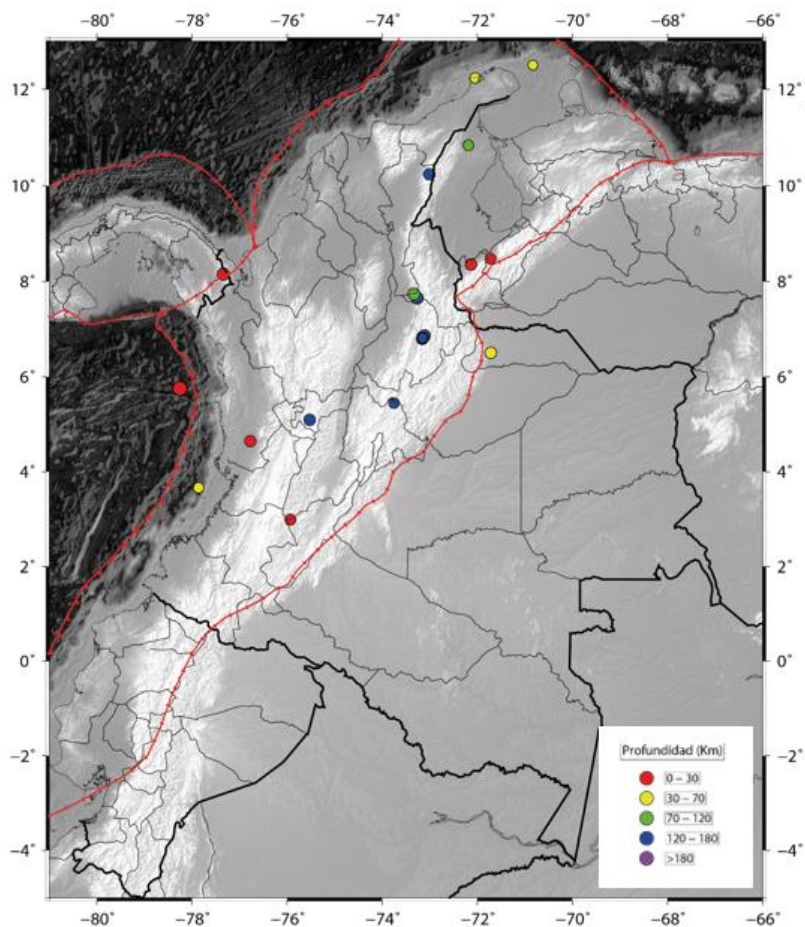
NOMBRE	CODIGO	ZONA RESPUESTA SISMICA	LATITUD (grados Norte)	LONGITUD (grados Oeste)
VILLA HELENA	VHEL	1	7.15454	-73.12661
VEREDA CARRIZAL	CARR	1	7.13433	-73.16019
VIVERO NAZARETH	VNAZ	1	7.13451	-73.1327
PARQUE MORRORICO	MORR	1	7.13326	-73.10692
VIVERO LA ROSITA	LROS	1	7.11119	-73.12479
CAMPO HERMOSO	CHER	2	7.10075	-73.1407
VIVERO PROVENZA	VPRV	2	7.08224	-73.11267
MESA DE LOS SANTOS	LMES	-	6.89742	-73.03601

### 3. Base de datos de eventos sísmicos

Desde mayo de 2013 hasta diciembre de 2018, la red ha registrado 24 eventos sísmicos con magnitud de momento  $M_w$  que varían entre 4.8 y 7.3; profundidades desde superficial hasta 156 km y la mayoría de ellos han ocurrido en el Nido Sísmico de Bucaramanga (epicentro en el municipio de Los Santos). La localización de los epicentros de los sismos registrados se presenta en la Figura 2. Para cada sismo, se compiló la siguiente información sismológica (Tabla 2) a



partir del Catálogo de Sismicidad de la RSNC (SGC, 2018): (1) fecha de ocurrencia; (2) tiempo de origen del sismo (GMT); (3) magnitud de momento ( $M_w$ ) tomada del CMT Harvard (Dziewonski et al., 1981; Ekström et al., 2012) y la Red Sismológica Nacional de Colombia - RSNC (SGC, 2018); (4) profundidad del hipocentro (km); (5) coordenadas del epicentro del sismo (latitud y longitud); (6) municipio más cercano al epicentro; (7) distancia hipocentral (km) y (8) número de estaciones que registraron el evento.

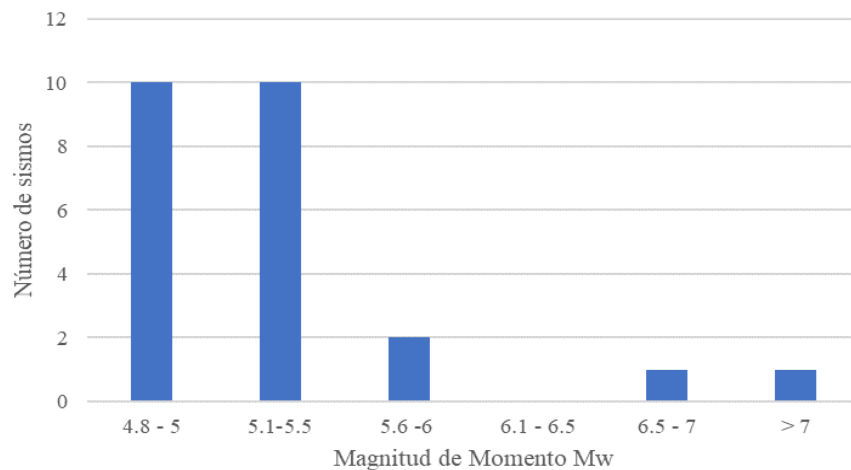


**Figura 2. Mapa de epicentros de eventos sísmicos registrados por la Red de Acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES - CDMB con magnitud mayor a 4.8 entre mayo de 2013 y diciembre de 2018.**

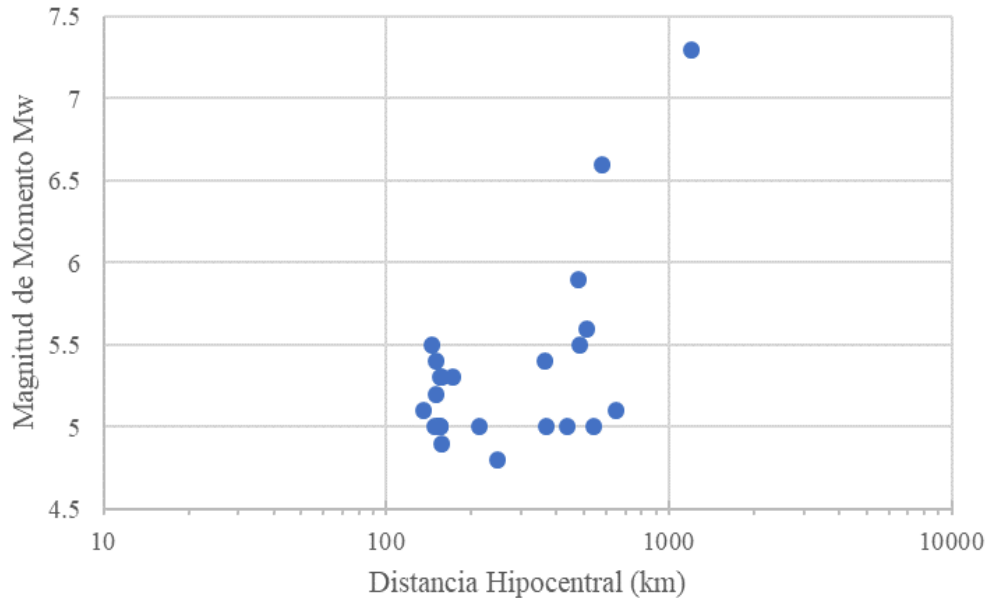
Mediante la identificación del tiempo de ocurrencia de los eventos sísmicos se asociaron los registros de las estaciones de la red de acelerógrafos, realizando un procesamiento de los datos que consiste en la corrección instrumental y el filtrado de las señales. La distribución de la magnitud de momento  $M_w$  y la correlación entre  $M_w$  y la distancia hipocentral se muestran en las Figuras 3 y 4, respectivamente.

**Tabla 2. Eventos sísmicos registrados por la Red de Acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES - CDMB.**

N o	Fecha AAAA- MM-DD	Hora (UT) HH:MM:SS	Mag. (Mw)	Prof. Km	Latitud (grados N)	Longitud (grados O)	Municipio	Distancia Hipocentral (km)	Número de estaciones
1	2013-07-25	12:09:26	5.0	148.5	6.816	-73.150	LOS SANTOS (Santander)	149	6
2	2013-08-13	15:43:13	6.6	12.3	5.755	-78.254	BAHIA SOLANO (Chocó)	583	4
3	2014-01-05	03:36:39	5.5	19.0	4.642	-76.774	SIPI (Chocó)	483	7
4	2014-01-09	12:50:16	5.0	0.0	2.989	-75.930	SANTA MARIA (Huila)	539	5
5	2014-02-07	20:37:11	5.3	156.0	6.798	-73.155	LOS SANTOS (Santander)	156	5
6	2014-02-17	09:41:37	5.3	42.6	6.502	-71.717	TAME (Arauca)	157	5
7	2014-02-21	11:43:29	5.1	32.0	12.503	-70.829	URIBIA (La Guajira)	648	6
8	2014-03-14	23:26:36	5.0	133.7	10.240	-73.008	MANAURE BALCON DEL CESAR (Cesar)	369	5
9	2014-11-25	20:20:16	5.0	152.0	6.811	-73.142	LOS SANTOS (Santander)	152	7
10	14/12/2014	01:49:30	4.8	151.1	5.449	-73.748	SUSA (Cundinamarca)	246	6
11	2015-02-05	04:21:51	5.3	4.1	8.355	-72.131	PUERTO SANTANDER (Norte de Santander)	172	4
12	2015-03-22	22:27:37	4.9	154.6	6.804	-73.147	LOS SANTOS (Santander)	157	4
13	2015-07-29	00:10:24	5.9	14.1	8.155	-77.337	UNGUIA (Chocó)	476	5
14	2015-08-09	19:36:19	-	114.6	10.840	-72.187	ALBANIA (La Guajira)	437	5
15	2015-10-14	07:47:19	5.1	117.6	7.742	-73.329	SAN ALBERTO (Cesar)	136	6
16	2017-09-04	20:28:23	-	156.0	6.827	-73.145	LOS SANTOS (Santander)	156	5
17	01/10/2017	01:35:25	5.2	137.7	7.657	-73.261	LA ESPERANZA (Norte de Santander)	150	4
18	2017-11-18	05:54:54	5.0	0.1	8.476	-71.721	PUERTO SANTANDER (Norte de Santander)	213	5
19	2018-01-08	12:58:27	5.0	154.7	6.839	-73.139	LOS SANTOS (Santander)	155	5
20	2018-04-23	15:42:11	5.4	121	5.096	-75.524	MANIZALES (Caldas)	362	6
21	2018-05-31	3:02:11		142	6.826	-73.144	LOS SANTOS (Santander)	145	6
22	2018-08-07	15:53:59	5.4	150	6.87	-73.109	LOS SANTOS (Santander)	150	6
23	2018-08-18	19:39:09	5.6	14	8.66	-77.336	MAR CARIBE	511	6
24	2018-08-21	21:31:10	7.3	146	10.779	-62.907	RIO CARIBE (Venezuela)	1200	6



**Figura 3. Distribución de la magnitud Mw de los eventos sísmicos registrados por la Red de Acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES - CDMB.**



**Figura 4. Magnitud Mw con respecto a la Distancia Hipocentral para los 24 eventos sísmicos registrados por la Red de Acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES - CDMB.**

#### 4. Análisis de espectros de respuesta

Se identificaron las componentes horizontales de los registros sísmicos y luego se calculó el espectro de respuesta para un 5% de amortiguamiento con respecto al crítico y por último se hizo una normalización de los espectros de respuesta con relación a la aceleración máxima del suelo (PGA) de cada registro. Se agruparon los espectros de respuesta calculados por las zonas propuestas y se compararon con los espectros de diseño definidos en el estudio de ZSGB (Figuras 5 y 6).

En las zonas 1 y 2 existen varias franjas de periodos dominantes, lo que sugiere que dentro de una zona existen diferentes formas de comportamiento sísmico. Estas diferencias pueden deberse a características geotécnicas y topográficas particulares del sitio o a la fuente sísmica.

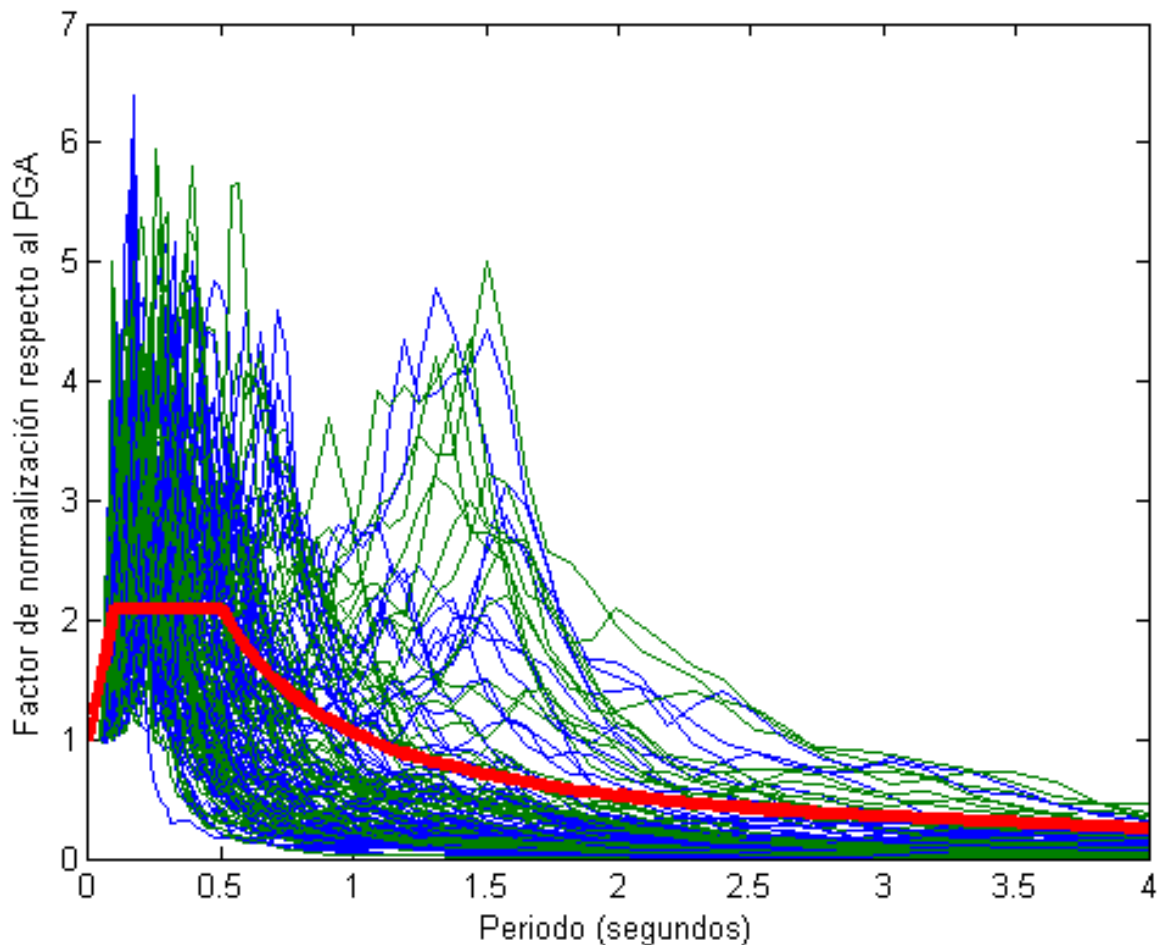
En la Figura 5, correspondiente a los espectros calculados para estaciones ubicadas en la Zona 1 – Roca, se puede observar que la mayor parte de los periodos dominantes son menores que 0.5 segundos. Se presentan amplificaciones que no están cubiertas por el espectro de diseño planteado en el estudio de ZSGB para el rango entre 0.5 y 0.9 segundos. Se observan amplificaciones en periodos de 1.2 a 1.7 segundos que corresponden a espectros calculados para sismos de fuente lejana (> 200 km de la ciudad de Bucaramanga).



Para el caso de la Zona 2 – Suelos Rígidos (Figura 6), se puede observar que la mayor parte de los periodos dominantes se encuentran en el rango comprendido entre 0.1 y 0.5 segundos. El espectro de diseño propuesto en la ZSGB para la Zona 2, es superado en el rango de periodos comprendido entre 0.5 y 0.8 segundos. Se puede observar en la Figura 6 la presencia de periodos entre 1.1 y 1.7 segundos que corresponden a espectros de sismos de fuente lejana.

En general, las variaciones en las formas de las respuestas espectrales, dependen del tipo de fuente sismogénica (cercana, intermedia y lejana), las características particulares del suelo donde están ubicadas las estaciones de monitoreo y en algunos casos de la topografía del terreno.

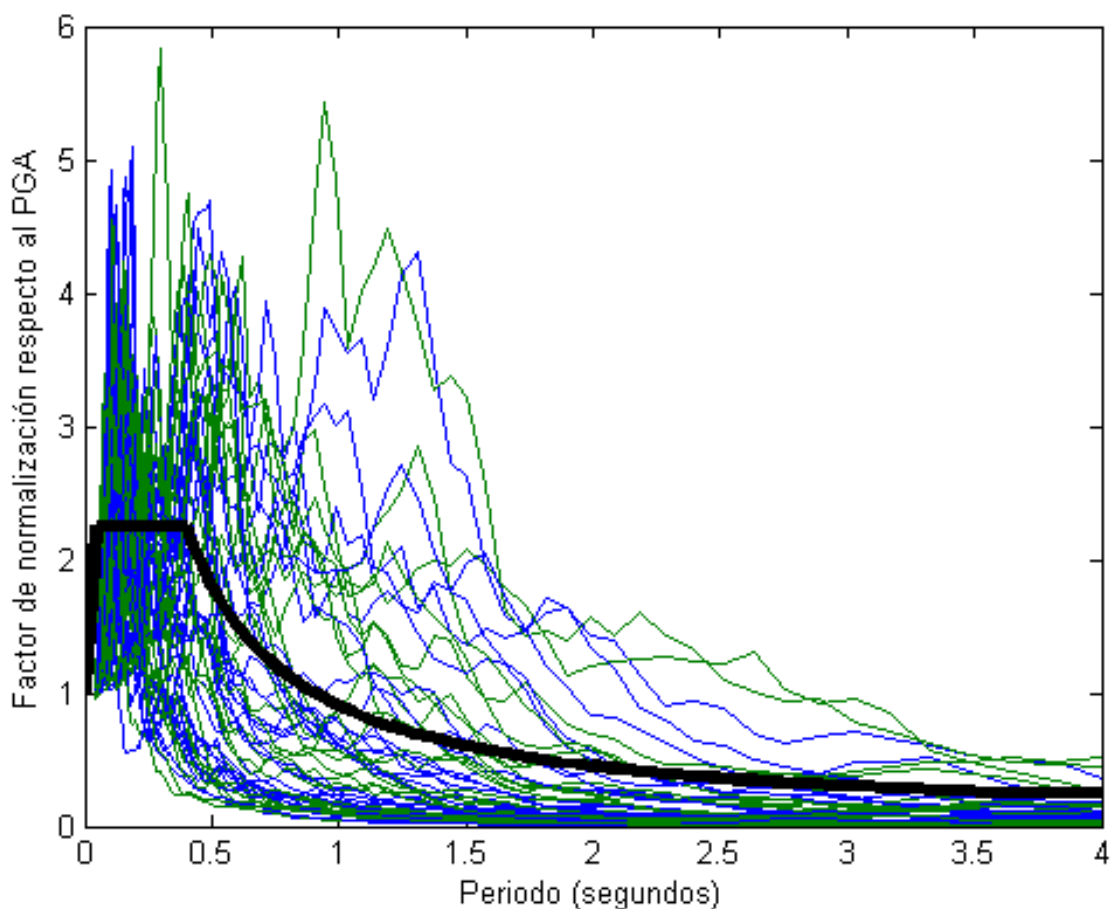
**Figura 5. Espectros normalizados de los 24 eventos sísmicos registrados por la Red de Acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES - CDMB correspondientes al periodo mayo 2013 a diciembre de 2018, calculados para la zona 1 definida en el estudio de ZSGB.**







**Figura 6. Espectros normalizados de los 24 eventos sísmicos registrados por la Red de Acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES - CDMB correspondientes al periodo mayo 2013 a diciembre de 2018, calculados para la zona 2 definida en el estudio de ZSGB.**



## 5. Conclusiones

Se han expuesto en el desarrollo de este trabajo, diferentes argumentos que indican claramente que los espectros de diseño propuestos en el Estudio de ZSGB, para las zonas 1 y 2, deben ser revisados y/o ajustados a los resultados obtenidos con el monitoreo realizado por la Red de Acelerógrafos.

En el análisis comparativo entre los espectros de respuesta registrados y el espectro de diseño propuesto en la ZSGB, se observan amplificaciones que no está cubiertas por los espectros de diseño en el rango de periodos entre 0.5 y 1.0 segundos.



El análisis de los registros sísmicos disponibles en la Red de Acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES - CDMB, permitió observar una gran variabilidad de formas de respuesta sísmica y diferentes rangos de periodos dominantes, lo que podría asociarse con sismos ocurridos en diferentes fuentes sismogénicas (cercana, intermedia y lejana), características locales del suelo en el sitio donde están ubicadas las estaciones de monitoreo y efectos causados por cambios en la topografía del terreno.

La información registrada por la Red de Acelerógrafos del Observatorio Sismológico UDES - CDMB y los estudios detallados de respuesta local, se constituyen en información valiosa y obligada a considerar en los futuros estudios de microzonificación sísmica.

## 6. Referencias Bibliográficas

Dziewonski, A. M., T.-A. Chou and J. H. Woodhouse, “**Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity**”, J. Geophys. Res., 86, 2825-2852, 1981. doi:10.1029/JB086iB04p02825

Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski, “**The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes**”, Phys. Earth Planet. Inter., 200-201, 1-9, 2012. doi:10.1016/j.pepi.2012.04.002

INGEOMINAS (2001), “**Zonificación Sismo Geotécnica Indicativa del Área Metropolitana de Bucaramanga, Fase II**”, Convenio realizado entre la CDMB e Ingeominas, Bucaramanga.

Servicio Geológico Colombiano. “**Catálogo de Sismicidad**” [En línea]. Disponible en: <https://www2.sgc.gov.co/sgc/sismos/Paginas/catalogo-sismico.aspx> [Fecha de consulta: 28/01/2018].

Servicio Geológico Colombiano. “**Sistema de Información de Sismicidad Histórica de Colombia**” [En línea]. Disponible en: <http://sish.sgc.gov.co/visor/> [Fecha de consulta: 28/11/2018].