



**CONFERENCIA INTERNACIONAL EN  
INGENIERIA SÍSMICA**  
Lima - Perú, 20, 21 y 22 de agosto del 2007

## **ANÁLISIS Y TRATAMIENTO DE SEÑALES DE FUENTES SISMOGÉNICAS DE CAMPO CERCANO A SAN JOSÉ DE CÚCUTA**

**Carlos Humberto FLOREZ<sup>1</sup>, Carlos Fernando LOZANO<sup>2</sup>**

### **Resumen**

Esta investigación determina el contenido frecuencial de un conjunto de señales de fuentes sísmogénicas cercanas a la ciudad de San José de Cúcuta, obtenidas mediante la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) perteneciente al INGEOMINAS. La etapa de tratamiento comprende los procesos de corrección por línea base y el filtrado de la señal sísmica. Las técnicas utilizadas para el análisis espectral son la Transformada de Fourier y la Transformada Wavelet, mediante sus respectivos espectros de amplitudes. Los análisis se realizaron bajo el uso de herramientas computacionales, programas como EERA, SEISMOSIGNAL, DEGTRA A4, MATLAB®. Además se realizó una modelación teórica de la propagación de ondas sísmicas a través del suelo, se utilizaron señales registradas en la ciudad y otro conjunto de señales correspondientes a sismos fuertes registrados en diversas partes del mundo, esto con el fin de conocer la respuesta de los suelos de Cúcuta ante la eventual ocurrencia de un movimiento telúrico de dimensiones catastróficas.

### **INTRODUCCIÓN**

El presente proyecto de investigación, se enmarca dentro de lo que podría denominarse ingeniería teórica y analiza parte del fenómeno sísmico, consistente en la liberación de una cantidad de energía que se ha venido acumulando lentamente debido a los desplazamientos de las placas tectónicas que conforman la superficie terrestre. La energía liberada se disipa generando un proceso ondulatorio que se propaga por el interior de la superficie del planeta. Las ondas llegan a las zonas urbanas y después de atravesar la capa de suelo donde se asientan, sacuden las construcciones generando oscilaciones que pueden afectarlas severamente, Sarria [9].

La señal sísmica en sí, es el resultado del mecanismo de ruptura en la fuente sísmogénica, contiene parámetros sísmicos de importancia como el contenido frecuencial y la aceleración en el sitio donde se construyen nuestras estructuras, además esta señal será modificada por los distintos medios que atraviesa, hasta poder establecer una respuesta o efecto de sitio en la superficie y si esta presenta un patrón o relación en su contenido frecuencial.

---

<sup>1</sup> Ingeniero Civil, M.Sc – Profesor Investigador. Grupo de Investigación en Geotecnia Ambiental, GIGA, Universidad Francisco de Paula Santander. San José de Cúcuta, Colombia. [florezgongora@yahoo.com.ar](mailto:florezgongora@yahoo.com.ar); [chflorez@bari.ufps.edu.co](mailto:chflorez@bari.ufps.edu.co).

<sup>2</sup> Estudiante Ingeniería Civil Universidad Francisco de Paula Santander, Grupo de Investigación en Geotecnia Ambiental, GIGA, UFPS. San José de Cúcuta, Colombia. [carloslozano53@yahoo.es](mailto:carloslozano53@yahoo.es).

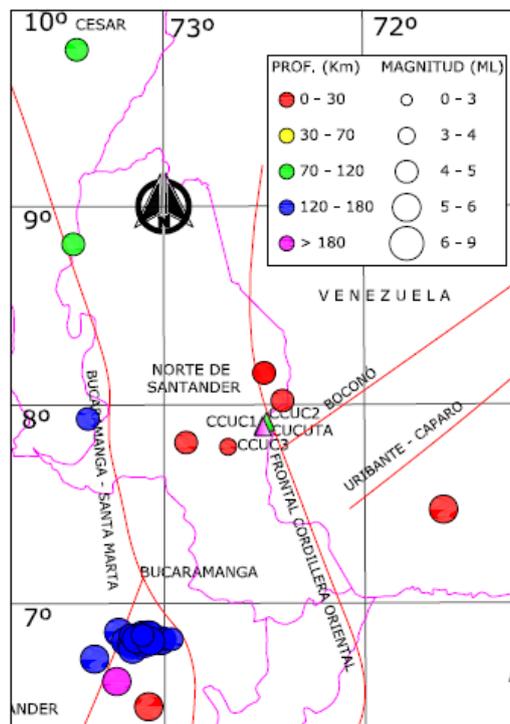
Para realizar el tratamiento de la señal, se utilizaron técnicas como la corrección por línea base, el filtrado de la señal para eliminar bandas de frecuencias no deseadas presentes en la señal, además se hace el análisis espectral por medio de las transformadas de Fourier y Wavelet, como también la obtención de espectros de respuesta. El análisis de propagación unidimensional de onda realizado con el programa EERA [2] muestra la amplificación del tren ondulatorio a su paso por los perfiles del subsuelo analizados para la ciudad de Cúcuta, presentando notables resultados con las señales de sismos fuertes registrados a nivel mundial.

La ciudad de Cúcuta, capital del departamento de Norte de Santander, se localiza geográficamente a los 7°54' de latitud norte y 72°31' de longitud al oeste de Greenwich. La ubicación de San José de Cúcuta en una zona de alta sismicidad sobre la falla frontal de la cordillera oriental de Colombia, con una aceleración pico efectiva horizontal de diseño de 0.30g [6], exige llevar a cabo estudios de rigor sobre los distintos aspectos técnicos y científicos que cubre un estudio completo de Microzonificación Sísmica, por lo tanto, las fuentes sismogénicas cercanas requieren de estudio a nivel frecuencial para la determinación de patrones que pueden aportar información importante sobre la naturaleza del tren ondulatorio, Florez et al [3].

### Análisis de la Información Sísmica Disponible

Los registros sísmicos para este proyecto, comprenden un conjunto de 69 señales sísmicas con sus correspondientes componentes (Este – Oeste, Vertical, Norte – Sur), registradas por la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) a cargo del INGEOMINAS, de los cuales se mostrará un análisis preliminar con sismos registrados por estaciones situadas en la ciudad de Cúcuta. La localización geográfica de estos eventos y la ubicación de las principales fallas geológicas se muestran en la figura No 1, un acelerograma típico se presenta en la figura No 3.

**Figura No 1. Localización Geográfica de los eventos registrados en las estaciones de la ciudad de Cúcuta. Fuente: Autores.**



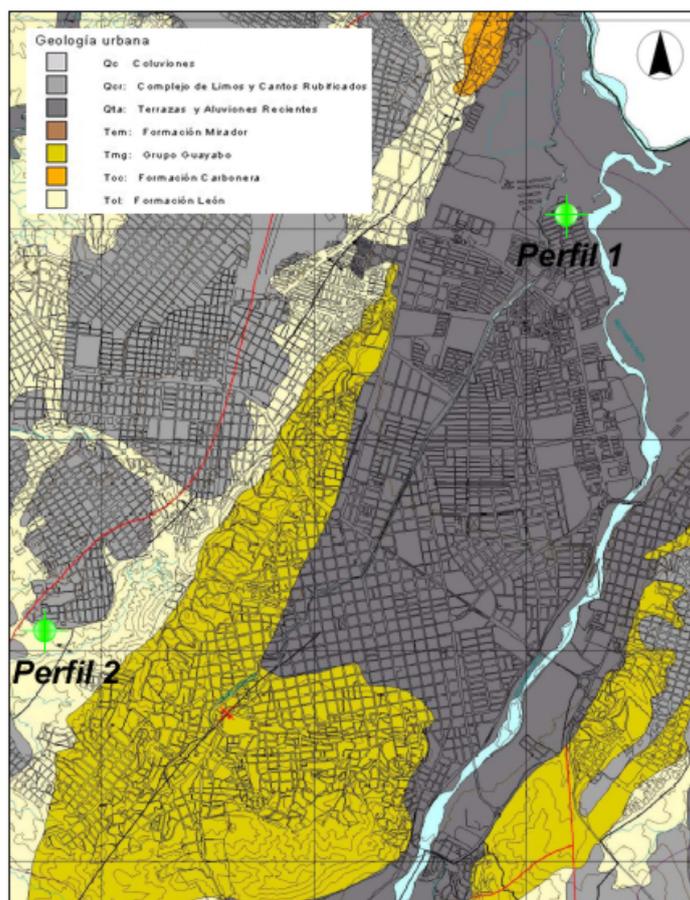
### **Análisis de la Información Geotécnica**

Se utilizaron dos perfiles geotécnicos para la modelación de la propagación unidimensional de onda, a los cuales se les calcularon los parámetros dinámicos de forma teórica. El perfil 1 corresponde a terrazas del cuaternario reciente (Qal), constituidas por material aluvial depositados por corrientes principales superficiales; en diferentes niveles topográficos. Los aluviones recientes (Qal), se muestran depositados en forma de terrazas, dejados por las corrientes superficiales que aún se aprecian en el área, siendo la principal de ellas, el río Pamplonita. Estos depósitos están integrados por sobretamaños de arrastre (de naturaleza ígnea, metamórfica y sedimentaria), con matriz combinada de grava, arena, limo y arcilla, con predominio de las dos últimas, Florez et al [4].

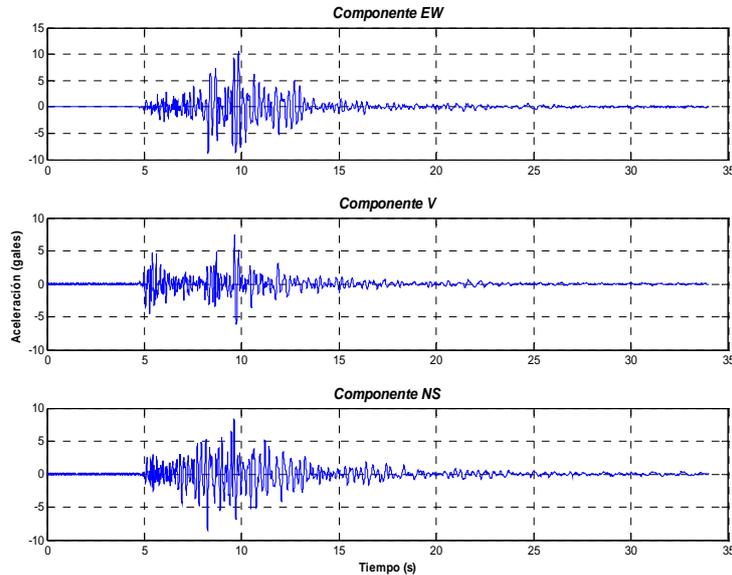
El perfil 2 pertenece a la formación León, que se constituye por un conjunto de arcillolitas abigarradas, microlaminadas de media a alta plasticidad, con láminas delgadas de yeso y trazas carbonáceas, ínter estratificadas; estos materiales son untuosos en estado húmedo y friables en estado seco; en su condición “in situ”, el macizo registra alta fracturación y diaclasamiento y registra lentes de arenisca muy fina, en la parte superior de la formación. Las arcillas de estos grupos, son sedimentos altamente erosionables y susceptibles a experimentar cambios volumétricos por modificaciones en su contenido de humedad, Florez et al [4].

**Figura No 2. Localización Geográfica de los perfiles analizados para la ciudad de Cúcuta.**

**Fuente: PBOT San José de Cúcuta.**



**Figura No. 3. Acelerograma, sismo 21 de Febrero de 1999. Fuente: RNAC.**



## **Análisis y Tratamiento de la Señal Sísmica**

### ***Adquisición de la Señal Sísmica***

En el procesamiento de señales, la primera etapa consiste en la adquisición de la señal sísmica. En la práctica este proceso se realiza mediante los acelerógrafos, los cuales registran la aceleración de las ondas sísmicas. Los acelerógrafos instalados en Cúcuta de la RNAC, son de la marca Kinemetrics, modelos SSA-2MC y ETNA, son de 12 y 18 bits de resolución respectivamente. El acelerógrafo registra continuamente la aceleración, pero solo hasta cuando se satisfacen las condiciones de “disparo”, el instrumento guarda el registro en una tarjeta de almacenamiento.

### ***Tratamiento de la Señal***

Una vez la señal es adquirida mediante los diferentes acelerógrafos, ésta no puede analizarse todavía, ya que se le debe realizar un tratamiento, que consiste en los siguientes pasos:

- Elección de unidades de Trabajo.
- Corrección de línea base.
- Filtrado de la Señal.

#### ***Elección de Unidades de Trabajo***

Con el programa **kw2cnts.exe** de Kinemetrics se hace el cambio de unidades de voltaje a unidades de aceleración que en este caso son Gales ( $\text{cm/s}^2$ ) y posteriormente son cambiadas a unidades de gravedad (g).

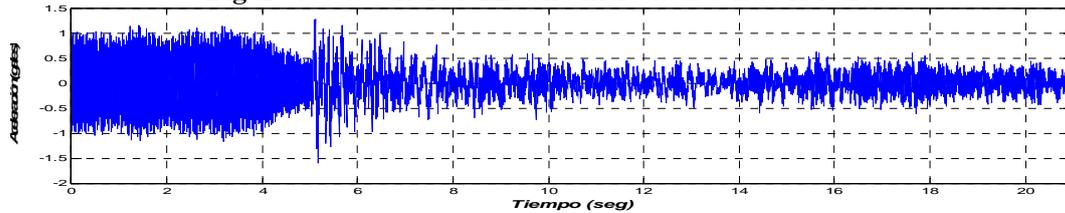
#### ***Corrección de línea base***

Este proceso se realiza para evitar la desviación de los acelerogramas respecto al centro, aplicando al acelerograma una corrección punto a punto igual al promedio aritmético del registro. Este proceso se realiza con el programa **kw2cnts.exe** de Kinemetrics, los resultados son corroborados mediante la versión demo del programa **SMA** (Strong Motion Analyst) perteneciente también a Kinemetrics, obteniendo excelentes resultados.

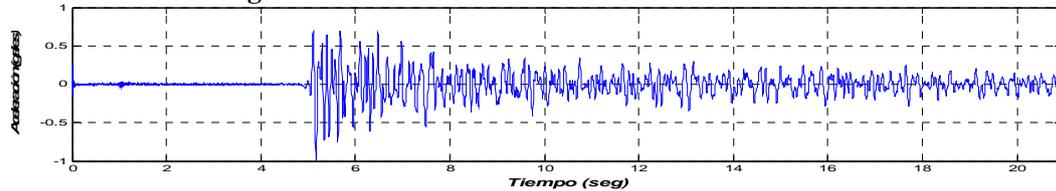
### Filtrado de la Señal

Es un proceso computacional, o algoritmo que convierte una secuencia de números representada por la señal de entrada en otra secuencia representada por la señal de salida. El proceso de filtrado es empleado para remover componentes frecuenciales no deseadas para una señal dada, el ruido de baja y alta frecuencia que se presenta en los sitios de registro, debido a factores como el paso de automóviles, ruido ambiental, etc, esto produce que a la señal original se superponga otra señal de cierto nivel que puede ocultar características significativas de la misma. Este proceso se realiza a través del programa SEISMOSIGNAL [10], el cual genera la señal filtrada en formato txt.

**Figura No 4. Señal Sísmica no filtrada. Fuente: Autores.**



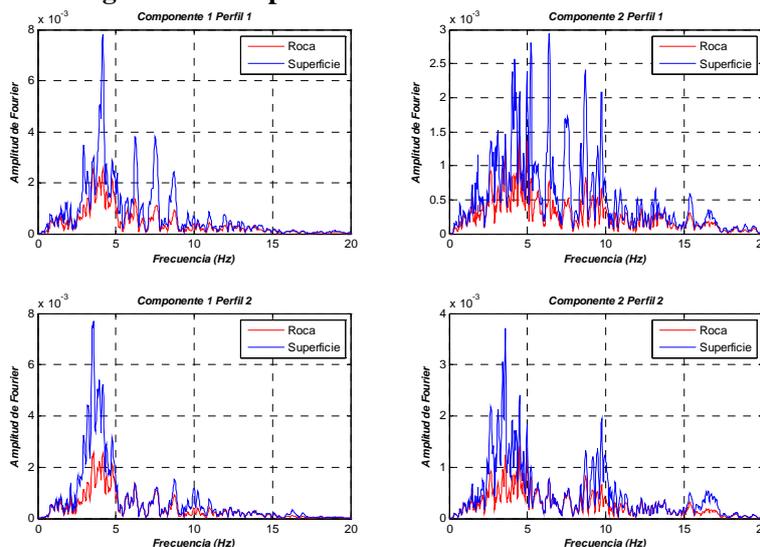
**Figura No 5. Señal Sísmica filtrada. Fuente: Autores.**



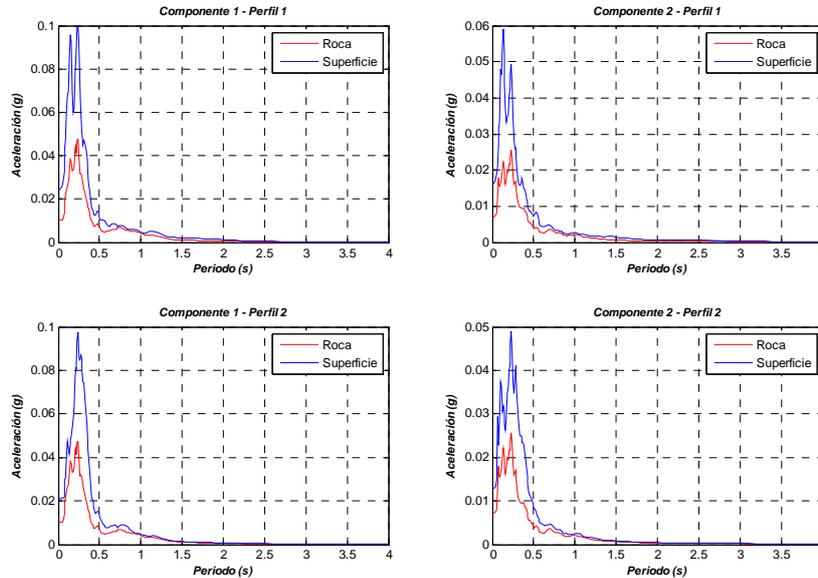
### Análisis Unidimensional de Propagación de Onda

El análisis unidimensional mediante el programa EERA [2], se hizo con el fin de obtener la respuesta de la señal sísmica en la superficie, ya que la mayoría de estas son registradas en roca. Se utilizaron dos perfiles estratigráficos a los cuales se les calcularon los parámetros dinámicos a nivel teórico. El programa EERA [2] calcula el espectro de Fourier a través del algoritmo de la FFT, además calcula el espectro de respuesta tanto en roca como en superficie, Rodríguez [8]. En las figuras No 6 y No 7, se muestran los resultados gráficos del espectro de Fourier y el espectro de respuesta, respectivamente, correspondiente a una señal sísmica registrada en una de las estaciones de la ciudad de Cúcuta. Los resultados se corroboraron con los programas SEISMOSIGNAL [10] y DEGTRA A4 [7].

**Figura No 6. Espectro de Fourier. Fuente: Autores.**



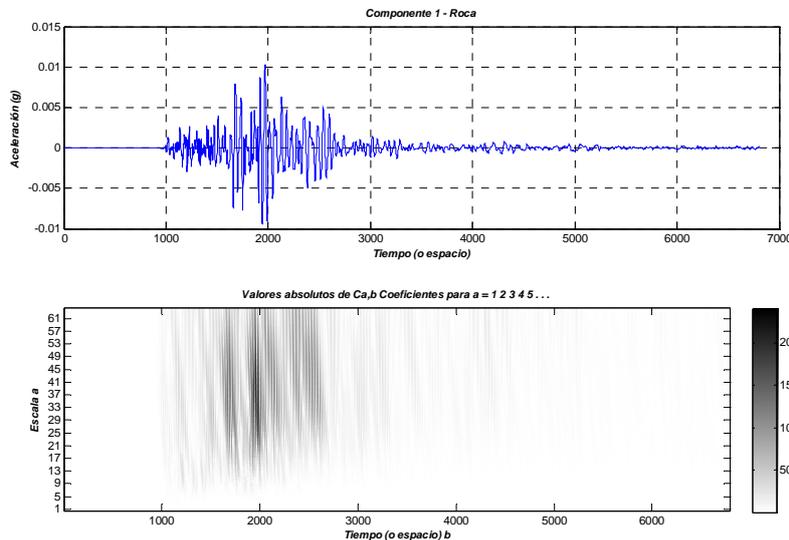
**Figura No 7. Espectro de Respuesta. Fuente: Autores.**



**Análisis Espectral con la Transformada Wavelet**

Con el programa Matlab, se elaboró un algoritmo para calcular la Transformada Wavelet de las señales sísmicas, se utilizó la wavelet de Daubechies (db6) como wavelet madre para el análisis. En la figura No 8, se muestra una señal sísmica y en la parte inferior su respectivo espectro de la Transformada Wavelet, el cual se representa en el plano Tiempo – Escala, lo cual hace posible saber en que instantes de tiempo aparecen las frecuencias principales de la señal y cuál es su duración, Misiti [5].

**Figura No 8. Espectro de la Transformada Wavelet. Fuente: Autores.**



En la figura No 8, se muestran los valores correspondientes a la Escala (a) en el eje vertical, se utiliza una variación de 1 a 64, este parámetro puede variar en potencias de 2, es decir, 64, 128, 256, 512,...<sup>2n</sup>; en términos de frecuencia, las bajas frecuencias (altas escalas) corresponden a una información global de la señal que comúnmente abarca toda la señal, mientras que las altas frecuencias (escalas bajas) corresponden a una información detallada de una característica oculta en la señal que comúnmente dura un tiempo relativamente pequeño. El parámetro Tiempo o espacio (b), que se ubica en el eje horizontal, está relacionado con la localización de la ventana a medida que ésta se desplaza a través de la señal, este término corresponde a la información del tiempo en el dominio transformado. La ecuación que relaciona

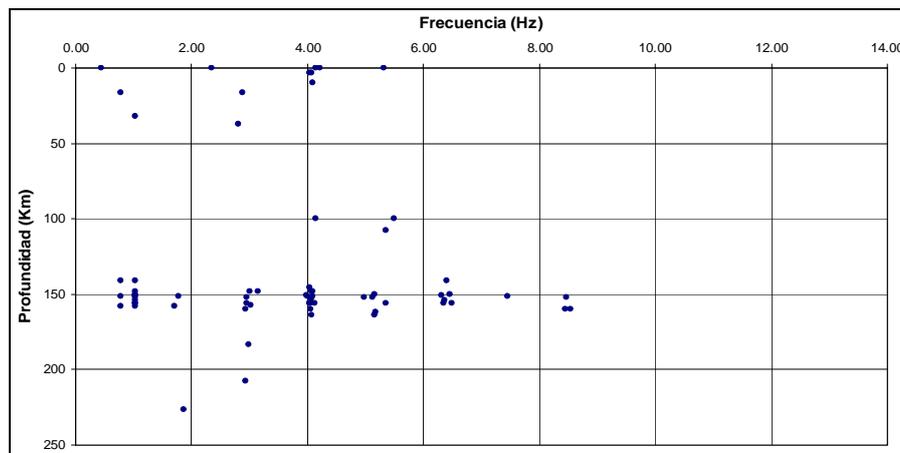
la Transformada Wavelet es definida como la suma de todos los tiempos de la señal multiplicada por versiones modificadas a escala de la función  $\psi$ :

$$C(\text{escala}, \text{posición}) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi(\text{escala}, \text{posición}, t)dt$$

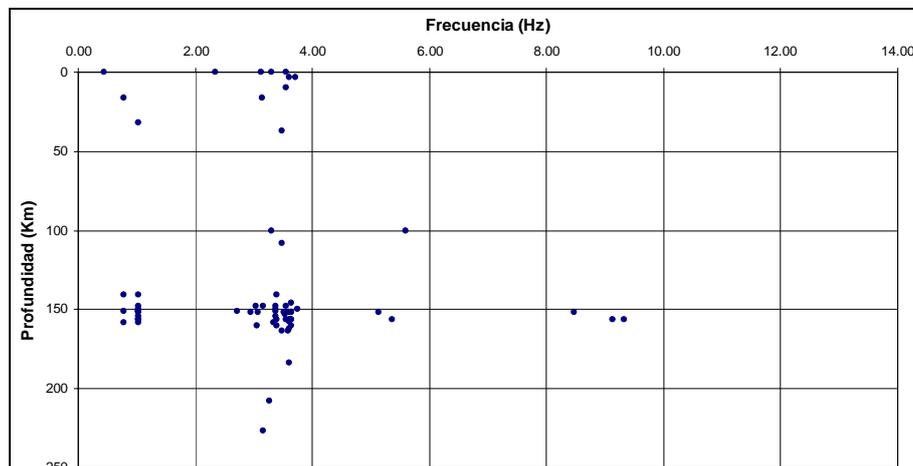
Los resultados de la señal transformada son muchos coeficientes  $C$  que son una función de la Escala y el Tiempo.

### Resultados Preliminares para el Contenido Frecuencial

**Figura No 9. Gráfico Profundidad vs Frecuencia (Perfil 1). Fuente: Autores.**



**Figura No 10. Gráfico Profundidad vs Frecuencia (Perfil 2). Fuente: Autores.**

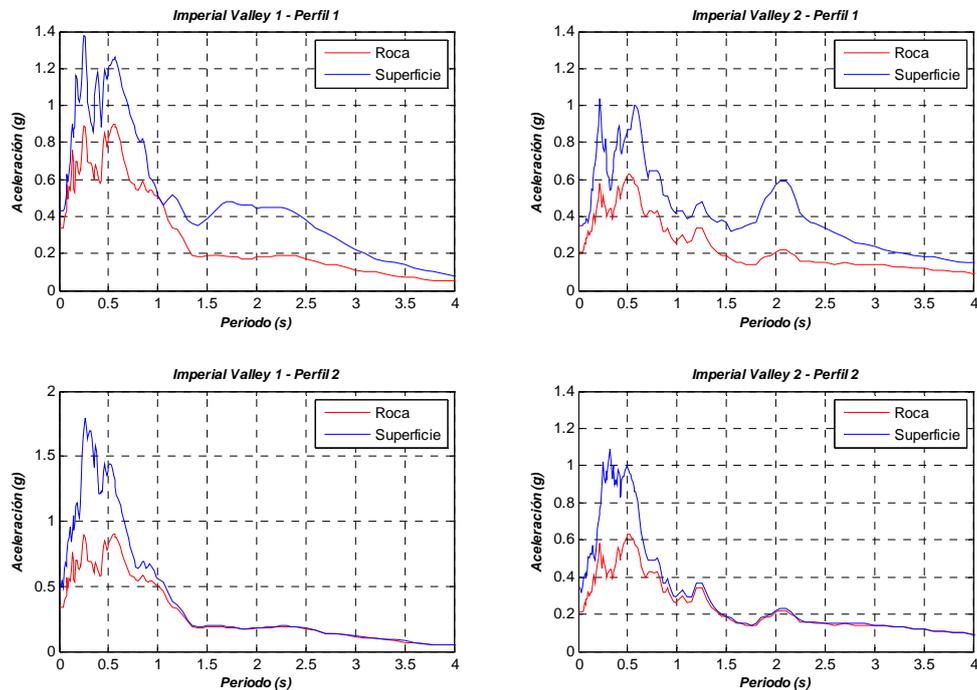


Se puede observar en las figuras anteriores que para el perfil 1, se obtienen valores de frecuencias que tienden a 1, 3, 4, 5 y 6 Hz y para el perfil 2 aparecen valores de frecuencia cercanos a 1 Hz y una banda de frecuencia bien definida entre 3 y 4 Hz.

### *Análisis para Sismos de Movimiento Fuerte*

A continuación se muestran los resultados para el sismo de El Centro para observar la amplificación de la señal al atravesar un perfil de suelo característico de la ciudad de Cúcuta.

**Figura No 11. Espectro de Respuesta (Sismo de El Centro). Fuente: Autores.**



### CONCLUSIONES

1. Los procesos de corrección de línea base y filtrado son vitales en análisis de este tipo, ya que ayudan a mejorar la señal considerablemente, eliminando algunas frecuencias que no son importantes, además se debe escoger un filtro que satisfaga las condiciones para el procesamiento de los registros sísmicos.
2. Los valores correspondientes a las frecuencias dominantes para señales registradas en la ciudad de Cúcuta, encontramos en la zona donde se localiza el Perfil 1, se tiene una banda aproximada de frecuencias de 1 a 6 Hz y para la ubicación del Perfil 2 se obtiene una banda de frecuencias de 3 y 4 Hz bien definida.
3. Según los espectros de respuesta, obtenidos con señales registradas en la ciudad de Cúcuta y los registros correspondientes a movimientos fuertes, podemos decir que los perfiles de suelo, amplifican la señal sísmica cuando esta llega a la superficie.
4. Por medio del espectro de la Transformada Wavelet podemos conocer si los contenidos frecuenciales, son de alta o baja frecuencia a través del parámetro escala que es el inverso de la frecuencia; además de conocer la duración en el tiempo de estas frecuencias.
5. En el análisis para sismos de movimiento fuerte, podemos observar que los suelos del Perfil 1 (suelos aluviales), amplifican la señal para periodos altos, mientras que los suelos que corresponden al Perfil 2 (suelos arcillosos), amplifican para bajos periodos pero atenúan la aceleración de la señal para altos periodos, es decir, para bajas frecuencias.
6. Los problemas de resolución que se presentan con la Transformada de Fourier, pueden ser solucionados mediante el uso de la Transformada Wavelet, ya que esta arroja datos más exactos sobre el contenido frecuencial, además de mostrar información sobre donde ocurren esas frecuencias y cuál es su duración en el tiempo.

## REFERENCIAS

1. Asociación de Ingeniería Sísmica, Comité AIS 300. “Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia” (1996). Bogotá, Colombia.
2. Bardet, J. P., et al (2000). “A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits – EERA”. Department of Civil Engineering, University of Southern California. <http://geoinfo.usc.edu/gees>.
3. Florez G, C.H, Lozano L, C.F. et al. (2005). “Análisis y Recopilación de información secundaria para la microzonificación sísmica preliminar de San José de Cúcuta”. Revista Respuesta, Año 10 No 2, San José de Cúcuta, N de S., Colombia, ISSN 0122820X.
4. Florez G, C.H, Pedroza R, A.O. (2006) “Desarrollo de estudios preliminares para la microzonificación sísmica de San José de Cúcuta, Colombia”. C.D. ISBN 958-33-9649-4. Simposio Latinoamericano y del Caribe en Geofísica. Bogota, Colombia.
5. Misiti, Michel et al (1997). “Wavelet toolbox for use with Matlab user’s guide”. The MathWorks Inc. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).
6. “Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR 98)”, Ley 400 de 1997. República de Colombia.
7. Ordaz, M., Montoya, C (2002). “Programa DEGTRA A4 versión 4.06”. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
8. Rodríguez, M (2005). “Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos”. Aplicación a la ciudad de Barcelona, Ph.D. Thesis. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
9. Sarria Molina, Alberto (2002). “Fundamentos de Ingeniería Sísmica” (Capítulo 7). Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia. ISBN 958- 695- 067- 0. <http://ingsismica.uniandes.edu.co>.
10. "SeismoSignal - A computer program for signal processing of strong-motion data" [online]. Available [2004] from URL: <http://www.seismosoft.com>.