

CRITERIOS SISMOLÓGICOS PARA SELECCIONAR ACELEROGRAMAS REALES DE LA RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS DE COLOMBIA PARA SU USO EN ANÁLISIS DINÁMICOS

ANA BEATRIZ ACEVEDO*

RESUMEN

Utilizar acelerogramas reales para la realización de análisis dinámicos es deseable, ya que contienen información real sobre la naturaleza del movimiento fuerte e indican las características variadas que diferentes sismos en lugares diversos pueden producir. El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, contempla el uso de acelerogramas reales en procedimientos cronológicos, especificando un uso de la componente horizontal de mínimo tres acelerogramas diferentes, todos ellos representativos de los movimientos esperados en el terreno. En este trabajo se explora la base de datos de acelerogramas de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia, RNAC, analizando la disponibilidad de registros para diferentes condiciones de movimiento fuerte para ser usados en análisis dinámicos. Como resultado se identificaron grupos de acelerogramas que podrían utilizarse como datos de entrada para análisis dinámicos. Sin embargo, el análisis efectuado muestra cómo, empleando solo la información de la RNAC, no es posible cumplir totalmente con los requisitos de selección del reglamento colombiano.

PALABRAS CLAVE: acelerograma; análisis dinámico; espectro de diseño; amenaza sísmica; escenario sísmico; movimiento fuerte.

* Ingeniera Civil, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín; Magíster y Doctora en Reducción del Riesgo Sísmico, Università di Pavia, Italia. Profesora Asociada, Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. aceved14@eafit.edu.co

SEISMOLOGICAL CRITERIA FOR THE SELECTION OF REAL ACCELEROGRAMS FROM THE COLOMBIAN NATIONAL NETWORK OF ACCELEROGRAMS FOR USE IN DYNAMIC ANALYSIS

ABSTRACT

The use of real accelerograms as input in dynamic analysis is desirable as they provide realistic information about the nature of the strong ground motion; in addition, accelerograms capture different characteristics that can be produced by earthquakes at different locations. Colombian design code allows for the use of real accelerograms as input to time-history analysis. The horizontal component of a minimum of three different accelerograms is required by the code; all of the accelerograms must be representative of the expected ground motion at the site. In this paper the database of Colombian National Network of Accelerographs (*Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia, RNAC*) is analyzed in order to assess the availability of records for different ground motion characteristics for their use as input in dynamic analysis. Groups of accelerograms that could be used as input for dynamic analysis were identified. However, if only records from the RNAC are used, it is not possible to completely cover the selection requirements specified on the Colombian design code.

KEY WORDS: accelerogram; dynamic analysis; design spectrum; seismic hazard; seismic scenario; strong motion.

CRITÉRIOS SISMOLÓGICOS PARA SELECIONAR ACELEROGRAMAS REAIS DA REDE NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS DE COLÔMBIA PARA SEU USO EM ANÁLISES DINÂMICAS

RESUMO

Utilizar acelerogramas reais para a realização de análises dinâmicas é desejável, já que contêm informação real sobre a natureza do movimento forte e indicam as características variadas que diferentes sismos em lugares diversos podem produzir. O Regulamento Colombiano de Construção Sismo-Resistente, NSR-10, contempla o uso de acelerogramas reais em procedimentos cronológicos, especificando um uso da componente horizontal de mínimo três acelerogramas diferentes, todos eles representativos dos movimentos esperados no terreno. Neste trabalho explora-se o banco de dados de acelerogramas da Rede Nacional de Acelerógrafos de Colômbia, RNAC, analisando a disponibilidade de registros para diferentes condições de movimento forte para ser usados em análises dinâmicas. Como resultado se identificaram grupos de acelerogramas que poderiam utilizar-se como dados de entrada para análises dinâmicas. No entanto, a análise efetuada mostra como, empregando unicamente a informação da RNAC, não é possível cumprir totalmente com os requisitos de seleção do regulamento colombiano.

PALAVRAS-CÓDIGO: acelerograma; análise dinâmica; espectro de desenho; ameaça sísmica; cenário sísmico; movimento forte.



1. INTRODUCCIÓN

La energía liberada por un sismo se transmite mediante ondas sísmicas que recorren una ruta específica atravesando la corteza terrestre. El material que se encuentra en la corteza disipa la energía sísmica, razón por la cual el movimiento fuerte del terreno producido por un sismo usualmente sólo se registra en distancias cercanas al punto de liberación de energía. Sin embargo, existen casos en que, a pesar de la mencionada disipación de energía, es posible registrar el movimiento fuerte del terreno a distancias considerables del epicentro debido a efectos locales o topográficos, como ocurrió en el terremoto de México de 1985, en el cual se registraron aceleraciones importantes a distancias de 350 km del epicentro.

Los acelerogramas son registros de la aceleración del terreno debida a un movimiento fuerte producido por un sismo. El registro de la aceleración se lleva a cabo mediante acelerógrafos, equipos que deben ser instalados en lugares donde se espera que ocurra un movimiento fuerte.

Existen tres factores que influyen en los acelerogramas: fuente sísmica, trayectoria y efectos locales. La fuente sísmica se refiere a la liberación de energía; los parámetros de fuente sísmica que definen la naturaleza del movimiento fuerte son la magnitud, el mecanismo de ruptura, la directividad y la profundidad focal. La trayectoria se refiere a la ruta específica que recorre la energía liberada en la fuente sísmica; las principales variables que caracterizan la trayectoria son la distancia de la fuente al sitio y la estructura de la corteza. En cuanto a los efectos locales, la presencia de depósitos superficiales hace que las características de las ondas sísmicas se modifiquen al propagarse las ondas a través de dichos depósitos.

Los acelerogramas reales, es decir, aquellos que han sido registrados por acelerógrafos al ocurrir un sismo, presentan todas las características del movimiento fuerte: amplitud, frecuencia, contenido de energía y duración. Estos registros tienen la ventaja

de que proporcionan medidas detalladas del movimiento real del terreno durante un sismo e indican las características variadas que pueden producir diferentes sismos en diversos lugares. Adicionalmente, la doble integración de los acelerogramas permite la generación de historias de tiempo de velocidad y desplazamiento.

Los acelerogramas reales se usan para el diseño de estructuras cuando se requiere un análisis dinámico, como en el caso de edificaciones con irregularidades, edificios donde es probable que los altos modos sean excitados y estructuras diseñadas para niveles altos de ductilidad. Además se requieren para la evaluación de la respuesta de estructuras de tierra ante cargas sísmicas (estabilidad, potencial de licuefacción y respuesta dinámica del sitio).

La norma sísmica colombiana NSR-10 o Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (AIS, 2010) especifica en el numeral A.2.7 el uso de la componente horizontal de un mínimo de tres acelerogramas diferentes, si se desean emplear procedimientos de análisis dinámicos consistentes en evaluaciones contra el tiempo. Los acelerogramas seleccionados deben ser representativos de los movimientos esperados del terreno, para lo cual la norma indica que “deben provenir de registros tomados en eventos con magnitudes, distancias hipocentrales o a la falla causante, y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar, pero que cumplan la mayor gama de frecuencias y amplificaciones posibles”. Al utilizar tres registros se deben considerar los valores máximos de los análisis individuales. En el caso en que se empleen siete o más acelerogramas, la norma permite utilizar el promedio de los valores obtenidos al usar todos los acelerogramas.

El mismo numeral de la norma contempla la situación en la cual no sea posible encontrar el número requerido de registros reales, por lo que permite usar registros sintéticos simulados, de modo que se represente de una manera adecuada el movimiento sísmico prescrito para el lugar. Los acelerogramas

sinéuticos son generados mediante modelación del movimiento fuerte, y aunque se han desarrollado para su generación algunos programas de libre acceso (p. ej., Zeng, Anderson y Yu, 1994; Boore, 2003), se requiere un alto conocimiento del tema para obtener registros confiables.

La finalidad de este artículo es analizar las características de los registros de movimiento fuerte recopilados por la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia. El análisis se hace en términos de los parámetros de movimiento fuerte que se encuentran en la base de datos, de modo que se pueda concluir sobre la factibilidad del uso de acelerogramas reales registrados en Colombia en análisis dinámicos.

2. RED NACIONAL DE ACELERÓGRAFOS DE COLOMBIA

El primer acelerógrafo del país fue instalado en Bogotá, en mayo de 1945. Dos décadas después, en 1967, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U. S. Geological Survey, USGS) instaló siete acelerógrafos entre Panamá y Colombia, cinco de los cuales se instalaron en ciudades colombianas: Bogotá, Cali, Medellín, Cartagena y Barranquilla. El mantenimiento de los equipos estuvo a cargo del Instituto Geofísico de los Andes, que removió los acelerógrafos de las ciudades de Barranquilla y Cartagena y más tarde los instaló en las ciudades de Medellín y Manizales. En la década de los setenta se instalaron un total de 18 acelerógrafos análogos en el país (Bermúdez y Duarte, 2002).

La operación de la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) comenzó en 1993 mediante la instalación de 24 acelerógrafos en el país, 18 de los cuales eran controlados por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). Entre 1993 y 1994 se instalaron 35 acelerógrafos digitales, 17 de los cuales se ubicaron en una alineación Este-Oeste (Bahía Solano - Villavicencio), los restantes 18 se alinearon desde Popayán hasta el centro de Antio-

quia y el nordeste de Colombia, con el propósito de estudiar la atenuación del movimiento fuerte a través de la cordillera de los Andes. En 1995 se instalaron cinco nuevos acelerógrafos y en 1996 se adquirieron 52 acelerógrafos digitales. En el año 2002 la RNAC contaba con 120 acelerógrafos, 32 de ellos instalados en Bogotá. Para el año 2011, según información del sitio web de la RNAC (www.ingeo Minas.gov.co/RNAC), la red cuenta con 74 estaciones activas, las cuales tienen equipos instalados en la actualidad y son de carácter permanente; 25 estaciones inactivas, que dejaron de funcionar por diversos motivos; y 61 estaciones de red portátil, las que se instalan por un periodo específico con diferentes fines: registrar réplicas después de un sismo fuerte, recolección de información para estudios de microzonificación, estudios de vibración ambiental, etc.

La mayoría de los acelerógrafos de la RNAC están emplazados en roca. Su localización depende de la sismicidad del sitio y de las condiciones de accesibilidad, disponibilidad de energía y seguridad (Bermúdez y Duarte, 2002).

Los eventos registrados por la red son sometidos a corrección instrumental y de línea base, al igual que a procesos de filtración. Además se calculan historias de tiempo de velocidad y desplazamiento y espectros de respuesta de aceleración para periodos hasta de 5 segundos y valores de amortiguamiento de 0, 2, 5 y 10 %.

Adicional a la red nacional existen en el país varias redes locales instaladas, como la Red de Acelerógrafos de Santafé de Bogotá (RSB), la Red Acelerográfica de Medellín (RAM) y la Red Acelerográfica de Santiago de Cali (RAC).

En este trabajo se emplea la información disponible en los *Boletines de movimiento fuerte* de la RNAC, que son de libre acceso y presentan información sobre los eventos sísmicos que ha registrado la RNAC en el territorio nacional. Para acceder al registro de los acelerogramas es necesario elevar una solicitud a los administradores de la red.



3. CARACTERÍSTICAS DE LA BASE DE DATOS DE LA RNAC

La Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia genera *Boletines de movimiento fuerte*, documentos anuales donde se registra la actividad sísmica del territorio nacional. Los boletines se encuentran en el sitio web de la RNAC con disponibilidad desde 1993 hasta dos años atrás de la fecha de consulta (actualmente hasta 2009). Adicional a los boletines anuales, se cuenta con un boletín especial sobre el sismo de Armenia del 25 de enero de 1999.

Los *Boletines de movimiento fuerte* presentan la lista de los eventos con esta información sobre ellos: fecha, hora, magnitud, profundidad y coordenadas del epicentro, e información sobre la estación acelerográfica: código, coordenadas, aceleración máxima registrada y distancia hipocentral.

Para este trabajo se analizó la información presentada en los boletines 1993-1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 1999 sismo de Armenia, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009. El número total de registros con un valor de magnitud asociado es de 2960.

Los boletines presentan información sobre las estaciones acelerográficas discriminando la geología de la estación en varios tipos (roca, suelo, suelo/roca, suelo-edificio, coluvión, dique, galería, relleno sanitario, lava, lava maciza y flujo piroclástico); 67 % de los registros fueron obtenidos por estaciones en roca (1990 registros), mientras que 31 % corresponden a estaciones en suelo o en roca y suelo (919 registros).

A partir del boletín de 2001 se discrimina la topografía de las estaciones en seis tipos: ondulada, escarpada, plana, túnel, dique y edificio.

De los 2960 eventos registrados, el 12 % reporta un valor de profundidad de cero o no lo reporta (362 registros); el 18 % de los registros, aunque no presentan un valor de profundidad, son catalogados como superficiales (538 registros). En cuanto a los registros con valor de profundidad asociado su distribu-

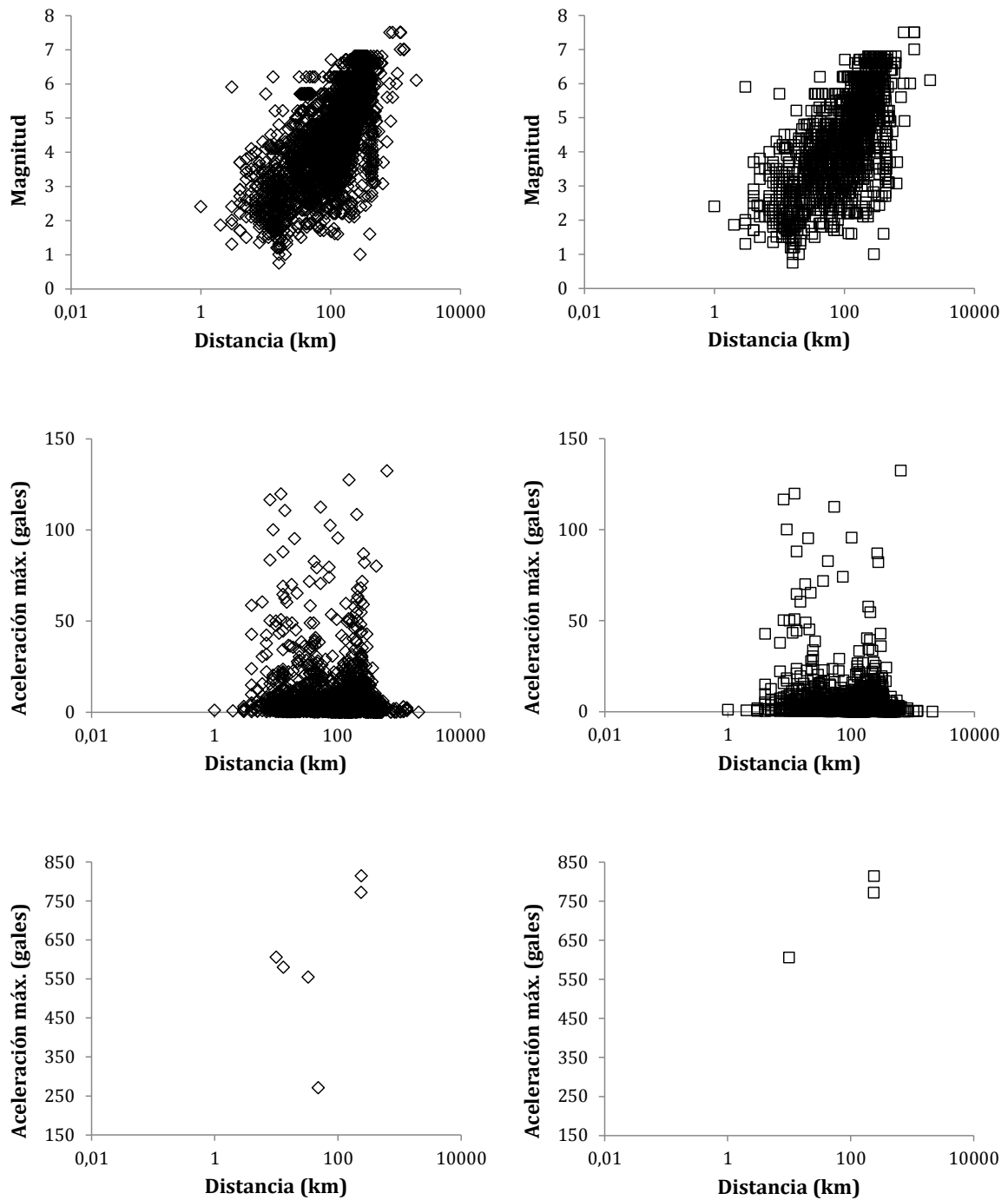
ción es la siguiente: 20 % presentan una profundidad hasta 33 km (586 registros); 8 % entre 33 y 100 km (243 registros); 38 % son sismos con profundidades entre 100 y 200 km (1123 registros); el restante 4 % corresponde a eventos con profundidades mayores de 200 km (108 registros). La mayor profundidad focal registrada corresponde a un valor de 230 km.

La figura 1 presenta la distribución de los eventos registrados según magnitud-distancia y magnitud-aceleración horizontal máxima registrada.

4. SELECCIÓN DE ACELEROGRAMAS REALES

La norma colombiana da indicaciones para la selección de acelerogramas reales, basadas tanto en parámetros sismológicos como en el espectro de respuesta.

En el numeral A.2.7.1 (a) se especifica sobre los acelerogramas seleccionados: “Todos ellos representativos de los movimientos esperados del terreno teniendo en cuenta que deben provenir de registros tomados en eventos con magnitudes, distancias hipocentrales o a la falla causante, y mecanismos de ruptura similares a los de los movimientos sísmicos de diseño prescritos para el lugar”. En el numeral A.2.7.1 (c) se especifica: “Los espectros de respuesta de los acelerogramas empleados, apropiadamente escalados en consistencia con la amenaza, no pueden tener individualmente ordenadas espectrales, para cualquier periodo de vibración en el rango comprendido entre $0,8T$ y $1,2T$, donde T es el período de vibración fundamental inelástico esperado de la estructura en la dirección bajo estudio, menores que el 80 % de las ordenadas espectrales del movimiento esperado del terreno definidas en A.2.6, y el promedio de las ordenadas espectrales de todos los registros utilizados, en el rango comprendido entre $0,2T$ y $1,5T$, no debe ser menor que las ordenadas espectrales en el mismo rango de períodos para el movimiento esperado del terreno definido en A.2.6”.



(a) Estaciones en roca y en suelo

(b) Estaciones en roca

Figura 1. Distribución de los eventos de la RNAC (1993-2009). (a) Eventos registrados en roca, suelo o roca y suelo; (b) eventos registrados en roca



Las especificaciones de la norma colombiana implican definir un escenario sísmico en términos de magnitud, distancia y mecanismo de ruptura. La definición de tal escenario requiere el conocimiento de la amenaza en el sitio de análisis, ya sea mediante un estudio de amenaza sísmica determinístico, en donde el sismo de diseño es claramente identificado; o mediante los resultados de un estudio de amenaza sísmica probabilístico, en donde es necesario efectuar una desagregación para obtener los escenarios sísmicos que más contribuyen a la amenaza del sitio (existen varias técnicas para realizar la desagregación tales como las propuestas por McGuire, 1995; Bazzurro y Cornell, 1999; Harmsen, Perkins y Frankel, 1999). Una vez definido el escenario, las ordenadas de los espectros de respuesta de los acelerogramas deben ser semejantes a las ordenadas del espectro de diseño de la norma. Aunque el espectro de respuesta de cada acelerograma debe ser semejante al espectro de diseño únicamente en el rango entre $0,8T$ y $1,2T$, el promedio de las ordenadas espectrales de todos los registros deben estar por encima de las ordenadas del espectro de diseño para el rango entre $0,2T$ y $1,5T$. Esto último puede generar dificultades en el momento de selección de los registros: el espectro de diseño corresponde a un espectro de amenaza uniforme (todas las ordenadas presentan la misma probabilidad de excedencia); por lo tanto, el espectro de diseño no corresponde a un único escenario sísmico, sino que es una envolvente de diferentes escenarios que pueden ocurrir en el lugar de análisis. Lo anterior dificulta encontrar registros que a su vez cumplan con las condiciones sismológicas requeridas (magnitud, distancia, mecanismo de ruptura) y que produzcan un espectro que cubra varios escenarios. Para poder cumplir ambas condiciones, en la mayoría de las ocasiones se requerirá aplicar factores de escalamiento a los registros seleccionados.

Realizar una selección basada en términos de escenario sísmico (como lo especifica la norma colombiana) implica conocer las características del evento esperado en términos de fuente sísmica, trayectoria y efectos locales. Sin embargo, encon-

trar registros de sismos que cumplan con todas las características puede ser algo imposible. Es necesario entonces reducir el número de parámetros para realizar la búsqueda de acelerogramas de modo que se pueda obtener el suficiente número de registros para el análisis.

Bommer y Acevedo (2004) especifican los siguientes parámetros para ser utilizados como criterios de selección (en orden de importancia): magnitud, distancia, tipo de suelo, mecanismo de ruptura, etc. El número de criterios para considerar depende de la cantidad de registros disponibles.

El primer criterio, la magnitud, tiene una alta influencia en la forma espectral. Autores como Stewart *et al.* (2001) sugieren usar valores de magnitud con diferencias de $\pm 0,25$ unidades, debido a que la magnitud influye de manera importante en el contenido frecuencial y en la duración del movimiento fuerte. Bommer y Acevedo (2004) recomiendan usar una diferencia de magnitud menor ($\pm 0,20$ unidades). Una diferencia de $0,20$ unidades en la magnitud implica un factor de $2,0$ en el momento sísmico (medida de la energía liberada por un sismo); es decir, si se selecciona un sismo con una magnitud $0,2$ unidades mayor que la magnitud del sismo definido en el escenario sísmico, la cantidad de energía considerada es el doble de la energía del sismo especificado. Adicional a la cantidad de energía liberada, la magnitud influye en la forma espectral, como se puede observar en la figura 2, donde se presenta el espectro de aceleración normalizado para valores medios de las ecuaciones de atenuación de Ambraseys, Simpson y Bommer (1996) y Campbell (1997) para sismos ubicados a 10 km del sitio con magnitudes de 5 , 6 y 7 .

En cuanto a la distancia, la forma espectral es menos sensible a este parámetro que a la magnitud. Bommer y Acevedo (2004) proponen utilizar la ventana más pequeña posible en términos de magnitud y utilizar una ventana de distancia del tamaño que se requiera para tener éxito en la búsqueda. La figura 3 presenta el espectro de aceleración

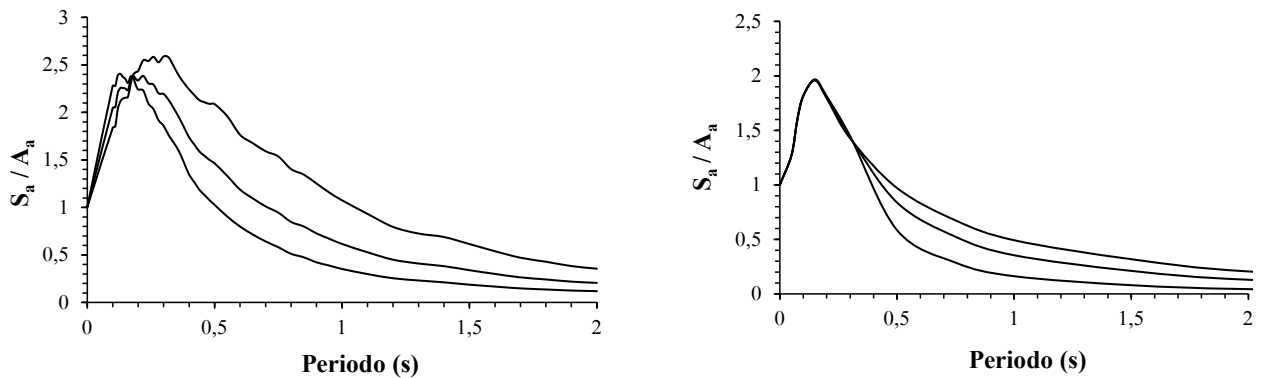


Figura 2. Formas espectrales normalizadas para sitios en roca a una distancia de 10 km de la fuente para magnitudes de 5, 6 y 7. (*Izquierda*) ecuación de atenuación de Ambraseys, Simpson y Bommer (1996); (*derecha*) ecuación de atenuación de Campbell (1997)

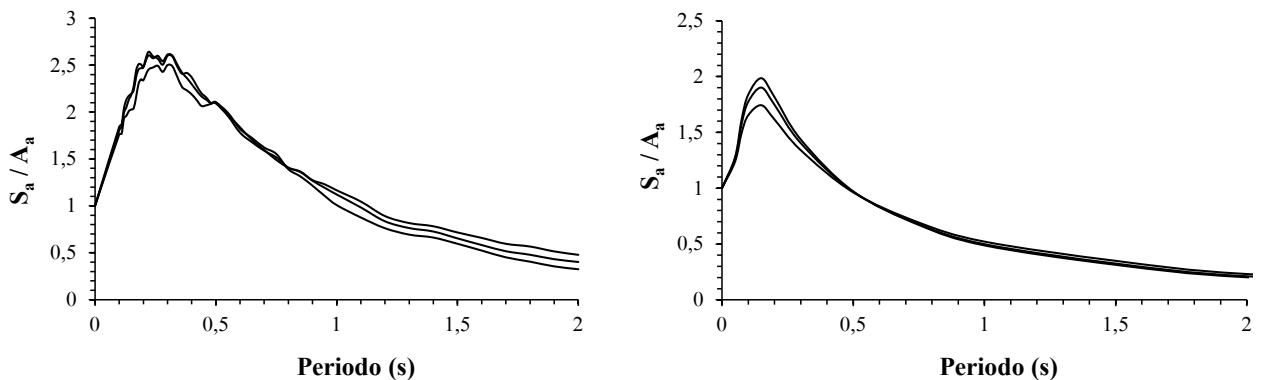


Figura 3. Formas espectrales normalizadas para sitios en roca a distancias de 5, 20 y 50 km de la fuente y magnitud 7. (*Izquierda*) ecuación de atenuación de Ambraseys, Simpson y Bommer (1996); (*derecha*) ecuación de atenuación de Campbell (1997)

normalizado para valores medios de las ecuaciones de atenuación de Ambraseys, Simpson y Bommer (1996) y Campbell (1997) cuando se consideran tres distancias diferentes para un sismo de magnitud 7. Al comparar las figuras 2 y 3 se observa claramente la mayor sensibilidad de la forma espectral a la magnitud.

El tipo de suelo influye de manera importante en el movimiento fuerte del terreno, afectando tanto la amplitud como la forma del espectro de respuesta. Encontrar acelerogramas que han sido

registrados en un suelo similar al del sitio de análisis no es tarea fácil, debido a que se reduce de modo considerable el número de registros disponibles y en muchas ocasiones el perfil de suelo de las estaciones acelerográficas no se encuentra lo suficientemente detallado. Una forma de sortear esta dificultad es realizar la selección de acelerogramas en términos de magnitud y distancia para acelerogramas registrados en roca; más tarde se puede realizar un estudio de propagación de ondas para determinar el comportamiento para un perfil de suelo específico.



Si el número de registros disponibles es suficiente, el siguiente criterio para considerar, según Bommer y Acevedo (2004), es el mecanismo de ruptura. Este, al igual que la dirección de la propagación de ondas con respecto al sitio –directividad– y la posibilidad de desplazamientos permanentes debido al deslizamiento de la falla, influye ante todo en el movimiento del terreno para distancias cercanas a la ruptura de la falla (distancias entre 20 y 60 km). Por lo tanto, al seleccionar registros para sitios cercanos al epicentro, es importante utilizar valores apropiados de distancia y registros con el mecanismo de ruptura esperado para captar los efectos de fuente cercana: mayor duración en el caso de directividad hacia atrás y presencia de un pulso corto que contiene la mayor cantidad de energía para la directividad hacia adelante (Stewart *et al.*, 2001).

Aunque lo ideal es considerar el mayor número de parámetros posible para hacer la selección, cuanto mayor número de parámetros considerados, menor número de registros disponibles. Por lo anterior, el número de parámetros para considerar depende en alto grado del número de registros de la base de datos.

5. ANÁLISIS DE LA BASE DE DATOS

Como se expuso, los criterios mínimos que se deben utilizar para la selección de acelerogramas reales son la magnitud y la distancia. Otros parámetros pueden incluirse dependiendo de la información disponible.

La información suministrada por la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia incluye para todos los eventos, a más de la magnitud y la distancia, el tipo de suelo y la profundidad focal; para los eventos registrados a partir de 2001 se adiciona la topografía de la estación. Aunque el reglamento colombiano especifica el mecanismo de ruptura como criterio de selección, no se incluye en la información de los boletines.

A continuación se presenta un análisis de la información de la RNAC en términos de disponibilidad de registros según los parámetros de magnitud, distancia y tipo de suelo. Se consideraron para el análisis registros con un valor mínimo de magnitud 4,0, pues a partir de este valor la energía liberada puede causar daños en las estructuras. Se consideraron distancias hasta 300 km (los eventos con mayores distancias es usual que presenten una alta atenuación de la energía, por lo que se generan valores muy bajos de aceleración en el sitio).

El análisis se presenta mediante figuras en las que se indica el número de registros disponibles al utilizar ventanas de magnitud y distancia. Por ejemplo, en la figura 4, el valor de 12 situado en la casilla superior izquierda indica que existen 12 eventos con una magnitud entre 4,0 y 4,2 registrados en roca o suelo, a distancias entre 0 y 20 km.

El análisis se realizó para una ventana de 0,2 unidades de magnitud y 20 km de distancia. La figura 4 presenta los resultados sin discriminar el tipo de suelo de la estación de registro; en la figura 5 solo se consideraron registros en roca.

Al comparar las figuras 4 y 5 se observa con claridad como el número de registros disponibles disminuye de forma considerable si se buscan no más que registros en roca. A pesar de la disminución del número de registros, se decidió incluir en los análisis sucesivos solo registros en roca para excluir la variabilidad que imprime el suelo en el movimiento fuerte del terreno.

La figura 6 presenta un análisis más detallado para los sismos registrados en roca considerando una distancia máxima de 140 km. La figura 6a presenta el número de eventos disponibles; la figura 6b muestra la máxima aceleración horizontal registrada por los eventos de cada ventana (valor en porcentaje de aceleración). Se observa que, en la mayoría de los casos, la aceleración máxima registrada es inferior a 5 % de g, y excluyendo la ventana con aceleración de 62 % de g, la aceleración máxima registrada es de 12 % de g. El valor de 62 % de g corresponde a un

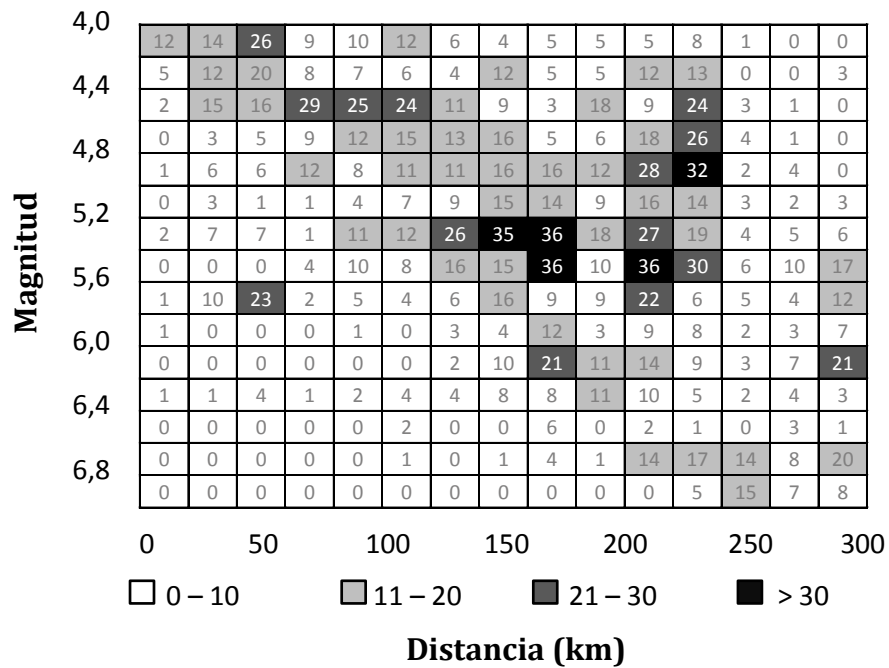


Figura 4. Número de eventos disponibles según magnitud y distancia (Δ Mag = 0,2; Δ Dist. = 20 km, registros en roca o suelo)

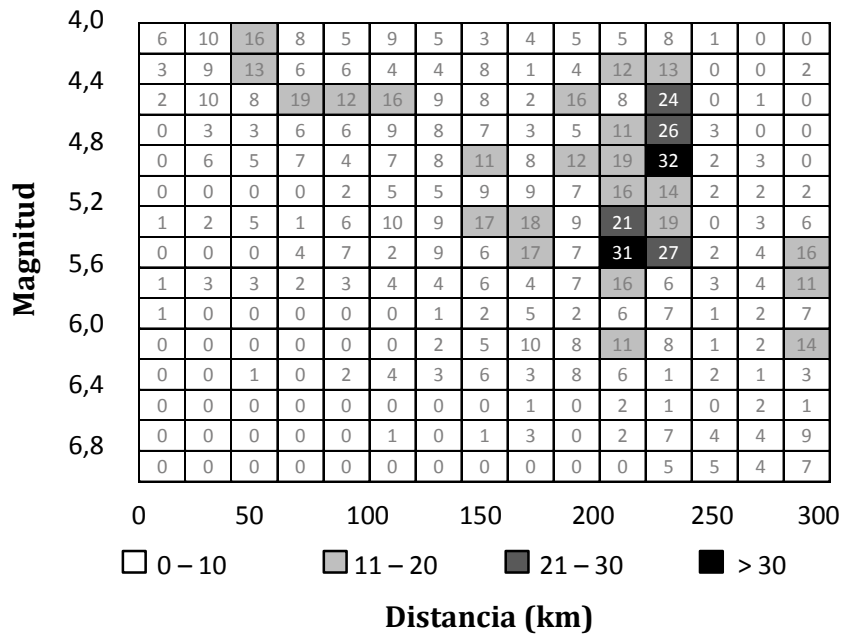


Figura 5. Número de eventos disponibles según magnitud y distancia (Δ Mag = 0,2; Δ Dist. = 20 km, registros en roca)



único evento registrado en la ventana de magnitud (5,6-6,0) y distancia (0-20 km).

La tabla 1 presenta el detalle de los eventos pertenecientes a ventanas en que existen al menos tres registros, de los cuales la aceleración horizontal máxima registrada por uno de ellos es mayor de 6 % de la gravedad. También se consideran dos ventanas con menos de tres registros: la ventana de magnitud 5,6-5,8 y distancia 0-20 km, por presentar el registro en roca con la mayor aceleración horizontal; y la ventana de magnitud 4,4-4,6 y distancia 0-20 km, por presentar el registro con aceleración de 12 % de g, que corresponde a la segunda aceleración máxima registrada. En la tabla 1 se presentan la magnitud M y la distancia d de la ventana, información del sismo (magnitud M , profundidad h , coordenadas del epicentro: latitud y longitud, y fecha) e información de la estación de registro (coordenadas de la estación, distancia de la fuente al sitio, d , y aceleración máxima

registrada, $A_{m\acute{a}x}$). Se observa que, utilizando ventanas con un ancho de 20 km, ninguna de ellas cuenta con tres registros que presenten una aceleración mayor o igual al 6 % de la gravedad. Únicamente al ampliar el ancho de la ventana es posible obtener tres registros con valores de aceleración mayores del 6 % de la gravedad para la ventana de magnitud 4,4-4,6 y distancia 0-80 km (aceleraciones de 12,2 %, 9,7 % y 7,5 % de g). De modo adicional se obtienen tres registros con magnitudes de 4,1, 4,0 y 4,3 con distancias de 13,0, 18,0 y 9,0 km respectivamente y aceleraciones máximas de 9,0 %, 7,1 % y 10,2 % de g. Existe una ventana adicional donde se hallan dos registros que cumplen con el criterio de aceleración mínima de 6 % de g: magnitud 5,6-5,8 y distancia 0-40 km. Esta última ventana es de gran importancia, ya que en ella se encuentra el registro en roca de mayor aceleración de la base de datos (lo que implica un menor factor de escalamiento para ajustarse al espectro de la norma).

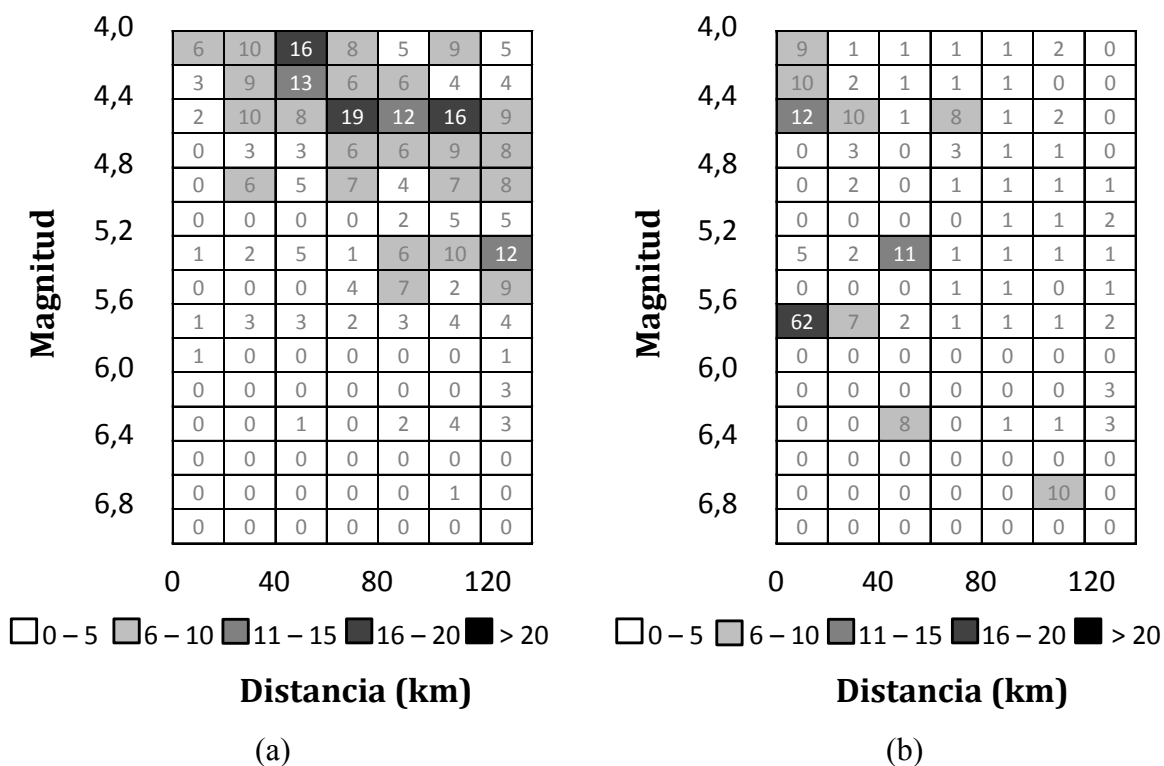


Figura 6. (a) Número de eventos disponibles según magnitud y distancia: $\Delta \text{Mag} = 0,2$; $\Delta \text{Dist.} = 20 \text{ km}$, registros en roca; (b) Aceleración horizontal máxima registrada (% de g) del grupo de registro de cada ventana: $\Delta \text{Mag} = 0,2$; $\Delta \text{Dist.} = 20 \text{ km}$, registros en roca

Tabla 1. Acelerogramas correspondientes a ventanas con mínimo tres eventos y aceleración máxima de uno de ellos mayor de 6 % de g

| Ventana | | Sismo | | | | | Estación | | | |
|------------------|---------------|-------|---------|------------|----------|------------|----------|----------|--------|-----------------------|
| M. | d (km) | M. | h. (km) | Lat (°) | Long (°) | Fecha | Lat (°) | Long (°) | d (km) | A _{máx} (%g) |
| 4,0 - 4,2 | 0-20 | 4,0 | -- | 4,38 | -73,83 | 28/05/2008 | 4,33 | -73,86 | 7,0 | 3,9 |
| | | 4,1 | -- | 4,36 | -73,78 | 24/05/2008 | 4,33 | -73,86 | 10,0 | 5,1 |
| | | 4,1 | -- | 4,43 | -75,71 | 22/06/2005 | 4,51 | -75,63 | 12,0 | 5,2 |
| | | 4,1 | 2 | 4,98 | -74,66 | 25/08/1999 | 5,06 | -74,59 | 12,4 | 0,7 |
| | | 4,1 | -- | 4,44 | -73,83 | 24/05/2008 | 4,33 | -73,86 | 13,0 | 9,0 |
| | | 4,0 | 10 | 4,39 | -73,73 | 24/05/2008 | 4,33 | -73,86 | 18,0 | 7,1 |
| 4,2 - 4,4 | 0-20 | 4,3 | -- | 4,39 | -73,81 | 25/05/2008 | 4,33 | -73,86 | 9,0 | 10,2 |
| | | 4,2 | 2 | 5,13 | -75,09 | 16/12/1995 | 5,04 | -75,12 | 11,2 | 4,4 |
| | | 4,2 | 12 | 5,15 | -74,68 | 27/03/2008 | 5,07 | -74,59 | 17,0 | 0,2 |
| 4,4 - 4,6 | 0-20 | 4,5 | 6 | 4,42 | -73,83 | 24/05/2008 | 4,33 | -73,86 | 12,0 | 12,2 |
| | | 4,5 | 8 | 1,15 | -77,91 | 19/07/1998 | 1,22 | -78,00 | 15,0 | 0,4 |
| 4,4 - 4,6 | 20 - 40 | 4,4 | 14 | 4,42 | -73,76 | 24/05/2008 | 4,33 | -73,86 | 20,0 | 9,7 |
| | | 4,4 | 0 | 4,76 | -74,67 | 24/05/2000 | 4,59 | -74,52 | 26,0 | 0,7 |
| | | 4,5 | 0 | 4,38 | -75,68 | 25/02/1999 | 4,25 | -75,93 | 31,0 | 0,5 |
| | | 4,5 | 0 | 8,16 | -72,50 | 21/02/1999 | 7,88 | -72,51 | 31,4 | 1,1 |
| | | 4,5 | 6 | 4,42 | -73,83 | 24/05/2008 | 4,62 | -74,06 | 34,0 | 0,2 |
| | | 4,5 | 0 | 8,16 | -72,50 | 21/02/1999 | 8,06 | -72,79 | 34,7 | 0,3 |
| | | 4,4 | 14 | 4,42 | -73,76 | 24/05/2008 | 4,14 | -73,64 | 36,0 | 1,0 |
| | | 4,5 | 6 | 4,42 | -73,83 | 24/05/2008 | 4,64 | -74,08 | 37,0 | 0,1 |
| | | 4,5 | 6 | 4,42 | -73,83 | 24/05/2008 | 4,14 | -73,64 | 38,0 | 1,0 |
| | | 4,5 | 0 | 5,55 | -74,54 | 09/10/1999 | 5,56 | -74,89 | 39,0 | 1,0 |
| 4,4 - 4,6 | 60 - 80 | 4,5 | 0 | 4,03 | -74,18 | 30/12/1995 | 4,17 | -73,64 | 62,4 | 0,5 |
| | | 4,4 | 60 | 4,06 | -76,65 | 30/04/2006 | 3,88 | -76,56 | 63,0 | 0,2 |
| | | 4,4 | 0 | 3,96 | -74,96 | 19/11/2000 | 4,47 | -75,25 | 66,0 | 0,1 |
| | | 4,4 | 0 | 4,76 | -74,67 | 24/05/2000 | 4,64 | -74,08 | 67,0 | 0,0 |
| | | 4,5 | 31 | 0,70 | -77,47 | 30/09/2001 | 1,19 | -77,32 | 68,0 | 0,9 |
| | | 4,5 | -- | 4,00 | -75,68 | 29/03/2004 | 4,47 | -75,25 | 70,0 | 0,2 |
| | | 4,5 | 6 | 4,42 | -73,83 | 24/05/2008 | 4,25 | -74,44 | 70,0 | 0,2 |
| | | 4,4 | 22 | 8,68 | -72,71 | 24/08/1996 | 8,08 | -72,79 | 71,0 | 0,3 |
| | | 4,4 | 32 | 4,62 | -75,89 | 31/03/2008 | 4,22 | -76,32 | 72,0 | 0,1 |
| | | 4,4 | 0 | 4,76 | -74,67 | 24/05/2000 | 4,47 | -75,25 | 72,0 | 0,2 |
| | | 4,4 | 60 | 4,06 | -76,65 | 30/04/2006 | 4,22 | -76,32 | 72,0 | 0,3 |
| | | 4,5 | --- | 3,87 | -75,79 | 28/09/2002 | 4,51 | -75,63 | 73,0 | 0,1 |
| | | 4,5 | 10 | 5,84 | -76,12 | 13/01/2009 | 5,26 | -75,82 | 73,0 | 7,5 |
| | | 4,5 | 0 | 4,38 | -75,68 | 25/02/1999 | 4,22 | -76,32 | 74,0 | 0,1 |
| | | 4,4 | 60 | 4,06 | -76,65 | 30/04/2006 | 3,66 | -76,71 | 75,0 | 0,6 |
| | | 4,5 | --- | 4,00 | -75,68 | 29/03/2004 | 4,22 | -76,32 | 75,0 | 0,1 |
| | | 4,5 | --- | 3,68 | -74,10 | 21/01/2006 | 4,18 | -73,64 | 75,0 | 0,2 |
| | | 4,5 | 0 | 5,00 | -74,60 | 02/02/1998 | 5,39 | -75,16 | 76,0 | 0,8 |
| 4,4 | 32 | 4,62 | -75,89 | 31/03/2008 | 5,26 | -75,82 | 78,0 | 0,5 | | |
| 5,2 - 5,4 | 40 - 60 | 5,3 | 15 | 5,71 | -75,92 | 24/04/2007 | 5,42 | -75,72 | 41,0 | 0,2 |
| | | 5,2 | --- | 4,57 | -76,08 | 08/03/2005 | 4,22 | -76,32 | 47,0 | 0,7 |
| | | 5,2 | --- | 4,57 | -76,08 | 08/03/2005 | 4,51 | -75,63 | 50,0 | 2,4 |
| | | 5,2 | 0 | 4,29 | -73,76 | 01/06/1999 | 4,64 | -74,08 | 52,9 | 0,1 |
| | | 5,3 | 15 | 5,71 | -75,92 | 24/04/2007 | 5,26 | -75,82 | 53,0 | 11,5 |
| 5,6 - 5,8* | 0 - 20 | 5,7 | --- | 4,41 | -73,81 | 24/05/2008 | 4,33 | -73,86 | 10,0 | 62,0 |
| 5,6 - 5,8 | 20 - 40 | 5,7 | --- | 4,41 | -73,81 | 24/05/2008 | 4,14 | -73,64 | 35,0 | 7,3 |
| | | 5,7 | --- | 4,41 | -73,81 | 24/05/2008 | 4,62 | -74,06 | 36,0 | 2,3 |
| | | 5,7 | --- | 4,41 | -73,81 | 24/05/2008 | 4,64 | -74,08 | 39,0 | 0,9 |

* Ventana con un único registro



La tabla 2 presenta los grupos de registros que se identificaron como factibles para usar como datos de entrada en análisis dinámicos.

Tabla 2. Grupos de acelerogramas seleccionados para utilizar en análisis dinámicos

| Ventana | | Sismo | | | | Estación | | | |
|-----------------|--------|-------|---------|------------|----------|------------------------|--------|--------|------------------------|
| M. | d (km) | M. | h. (km) | Fecha | Hora | Nombre | Nombre | d (km) | A _{máx} (% g) |
| 4,1 - 4,3 | 0-20 | 4,1 | -- | 24/05/2008 | 17:08:15 | Fómeque (Cundinamarca) | CQUET | 13,0 | 9,0 |
| | | 4,0 | 10 | 24/05/2008 | 20:21:31 | El Calvario (Meta) | CQUET | 18,0 | 7,1 |
| | | 4,3 | -- | 25/05/2008 | 09:39:53 | Quetame (Cundinamarca) | CQUET | 9,0 | 10,2 |
| 4,4 - 4,6 | 0-80 | 4,5 | 6 | 24/05/2008 | 19:23:04 | Fómeque (Cundinamarca) | CQUET | 12,0 | 12,2 |
| | | 4,4 | 14 | 24/05/2008 | 20:08:02 | El Calvario (Meta) | CQUET | 20,0 | 9,7 |
| | | 4,5 | 10 | 13/01/2009 | 19:47:52 | Bolívar (Antioquia) | CANSE | 73,0 | 7,5 |
| 5,6 - 5,8 | 0-40 | 5,7 | --- | 24/05/2008 | 19:20:44 | Quetame (Cundinamarca) | CQUET | 10,0 | 62,0 |
| | | 5,7 | --- | 24/05/2008 | 19:20:44 | Quetame (Cundinamarca) | CVIL1 | 35,0 | 7,3 |

6. CONCLUSIONES

En este artículo se analizaron las características de los acelerogramas registrados por la Red Nacional de Acelerógrafos de Colombia (RNAC) para analizar su factibilidad de uso como datos de entrada para la realización de análisis dinámicos.

Al considerar solo los parámetros de magnitud, distancia y acelerogramas registrados en roca fue posible identificar 8 registros que se creen pueden ser usados en análisis dinámicos. Estos 8 registros se hallan agrupados según su magnitud. Se encontraron dos grupos en donde se cuenta con tres registros: magnitud 4,1-4,3, distancia 0-20 km y magnitud 4,4-4,6, distancia 0-80 km; y un grupo donde se cuenta con dos registros: magnitud 5,6-5,8, distancia 0-40 km. Sin embargo, al analizar el lapso ocurrido entre los eventos de cada grupo y la localización de sus epicentros, se observa que para la mayoría de los

casos los eventos identificados no son independientes. Apenas en la ventana de magnitud 4,4-4,6, distancia 0-80 km se identifican dos eventos independientes.

Del análisis de los datos se concluye que los criterios sismológicos de selección que presenta la norma colombiana no se pueden cumplir en toda su extensión por varias razones: i) el número de registros de la base de datos no es lo suficientemente amplio para incluir un alto número de parámetros de selección, ii) la información de los *Boletines de movimiento fuerte* no incluye parámetros como mecanismo de falla, y la información sobre la profundidad focal es incompleta, iii) de los registros seleccionados solo en un caso se identifican sismos independientes, por lo que no se atiende el criterio de que “cumplan la mayor gama de frecuencias y aplicaciones posible”.

Si se desea utilizar acelerogramas reales registrados por la RNAC es necesario complementar

los acelerogramas seleccionados con registros adicionales provenientes de otras bases de datos o con acelerogramas sintéticos. Aunque la base de datos de la RNAC todavía no es lo suficientemente amplia para seleccionar el número de acelerogramas reales especificado por la norma sismorresistente, la base de datos cuenta con información valiosa que puede ser complementada para realizar análisis dinámicos. Con el tiempo se espera que el aumento de la información permita hacer la selección de un mayor número de registros con características apropiadas para diferentes escenarios sísmicos.

En este trabajo únicamente se realizó la selección de los acelerogramas a partir de criterios sismológicos. Adicional a este criterio se debe considerar la similitud con el espectro de diseño, para lo cual es necesario solicitar a los administradores de la RNAC los acelerogramas seleccionados.

REFERENCIAS

- Ambraseys, Nicolas N.; Simpson, K. A. y Bommer, Julian J. (1996). "Prediction of horizontal response spectra in Europe". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, vol. 25, No. 4 (April), pp. 371-400.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10*. Bogotá: AIS, 2010.
- Bazzurro, Paolo and Cornell, C. Allin (1999). "Disaggregation of seismic hazard". *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 89, No. 2 (April), pp. 501-520.
- Bermúdez, María L. y Duarte, Juan A. (2002). "La red nacional de acelerógrafos de Colombia". *Memorias Primer Simposio Colombiano de Sismología*, Bogotá, Colombia.
- Bommer, Julian J. and Acevedo, Ana B. (2004). "The use of real accelerograms as input to dynamic analysis". *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 8, edición especial 1, pp. 43-91.
- Boore, David, M. (2003). "Simulation of ground motion using the stochastic method". *Pure and Applied Geophysics*, vol. 160, No. 3-4, pp. 635-676.
- Campbell, Kenneth W. (1997). "Empirical near-source attenuation relationships for horizontal and vertical components of peak ground acceleration, peak ground velocity, and pseudo-absolute acceleration response spectra". *Seismological Research Letters*, vol. 68, No. 1, pp. 154-179.
- Harmsen, Stephen D.; Perkins, David and Frankel, Arthur (1999). "Deaggregation of probabilistic ground motions in the central and eastern United States". *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 89, No. 1, pp. 1-13.
- McGuire, Robin K. (1995). "Probabilistic seismic hazard analysis and design earthquakes: Closing the loop". *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 85, No. 6, pp. 1275-1284.
- Stewart, Jonathan P.; Chiou, Shyh-Jeng; Bray, Jonathan D.; Graves, Robert W.; Somerville, Paul G. and Abrahamson, Norman A. *Ground motion evaluation procedures for performance-based design. PEER Report 2001/09*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2001, 229 p.
- Zeng, Yuehua; Anderson, John G. and Yu, Guang (1994). "A composite source model for computing realistic synthetic strong ground motions". *Geophysical Research Letters*, vol. 21, No. 8, pp. 725-728.