

EVALUACIÓN COHERENTE DE ESPECTROS DE PELIGRO UNIFORME EN SUELOS BLANDOS

Mauricio Gallego

Ingeniero Consultor e Investigador de la Universidad de los Andes

mgallego@uniandes.edu.co

Resumen

La evaluación del peligro sísmico sobre suelo firme es una técnica que ha sido bien establecida por muchos años y en muchos países. El peligro es generalmente expresado en términos de tasas de excedencia, que se definen como el número medio de veces por unidad de tiempo en que cierta intensidad es excedida. El inverso de las tasas de excedencia de alguna intensidad es llamado periodo de retorno medio. Usualmente la práctica para calcular el peligro sísmico se basó en evaluar tasas de excedencia de valores picos tales como: aceleración máxima, velocidad y desplazamiento. Más recientemente espectros de peligro uniforme han sido construidos en una forma más directa y precisa por medio de ecuaciones de atenuación que relacionan, típicamente, magnitud y distancia con valores espectrales de respuesta en un rango de periodos de vibración. De esta forma por medio de un análisis convencional de peligro sísmico periodo por periodo, es posible construir espectros de respuesta cuyas ordenadas son, todas, asociadas al mismo periodo de retorno, constituyendo un espectro de respuesta de peligro uniforme. Con el fin de calcular espectros de peligro uniforme de respuesta aproximados, varias aproximaciones han sido adoptadas en el pasado para sobrepasar diferentes dificultades que se presentan en este tipo de análisis. Este artículo muestra una aproximación más para la evaluación de espectros de respuesta de peligro uniforme en sitios de suelo blando, por medio de un software interactivo que trabaja en ambiente Internet llamado Zp, el cual es ilustrado con validaciones determinísticas del sismo del 25 de enero de 1999 en Quindío y ejemplos probabilísticos de la ciudad de Bogotá

Abstract

Computation of seismic hazard at rock or firm sites has been a well established technique for many years. Hazard is generally expressed in terms of exceedance rates (ER), defined as the mean annual number of times in which a given value of intensity is exceeded. The inverse of the ER of some intensity is called its mean return period. Usually, the practice was to compute seismic hazard in terms of ER of peak motion values, such as peak ground acceleration, velocity and displacement,. More recently, uniform-hazard response spectra (UHS) have been constructed in a more direct and precise way, by means of attenuation equations that relate, typically, magnitude and distance with response spectral values for a range of periods. By performing a conventional hazard analysis on a period by period basis, it is possible to construct response spectra whose ordinates are, all, associated to the same return period, thus constituting a UHS. In order to compute approximate uniform-hazard response spectra at places affected by local soil amplifications, several approaches have been adopted in the past to overcome different difficulties. We will present a coherent approach to construct real UHS of different intensities at soft soils sites by means of interactive Internet-software named Zp, which will be illustrated with deterministic validations on Armenia city during 25 January Armenia Earthquake and probabilistic examples for the Bogotá city.

Palabras claves: Espectros de Respuesta, Diseño Sísmico, Peligro Sísmico Dinámica de Suelos, Amenaza Sísmica, Espectros de amplitudes, Dinámica de suelos

INTRODUCCIÓN

Desde la década de los 80 se iniciaron estudios por parte de la Universidad de los Andes (Uniandes) e Ingeominas para la zonificación geotécnica de la ciudad de Bogotá. Dicha labor se efectuó mediante diversas técnicas hasta llegar a una distribución de zonas que para hoy se tienen bien definidas y delimitadas. Fue así como en 1992 se acordó realizar el proyecto de forma conjunta entre Uniandes y el Ingeominas, trabajo que fue terminado en 1997. En 1999, Uniandes y la firma PSI Ltda realizó el estudio de amenaza sísmica sobre puntos ubicados sobre la línea proyecto de metro de la ciudad de Bogotá, para lo cual se hicieron perforaciones hasta la roca y se midió la velocidad de onda en el sitio mediante técnicas geofísicas para

diferentes puntos en la ciudad. Para dicho proyecto se estudiaron un total de 25 puntos en los cuales se tenía la información suficiente para evaluar la respuesta sísmica del subsuelo de manera consistente.

En 2000, Gallego publica la “*Estimación de Riesgo Sísmico en la República de Colombia*”, (ERSC, 2000) documento que recopiló varias publicaciones en un conjunto que abarcó desde los aspectos primarios de la sismología hasta la evaluación rigurosa del daño de las estructuras. En el 2000, también la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias, DPAE, termina de realizar la instalación de 30 acelerógrafos en la ciudad. Dichos aparatos han venido arrojando información valiosa que sirve para evaluar empíricamente parámetros imposibles de encontrar con técnicas de laboratorio o procesos analíticos.

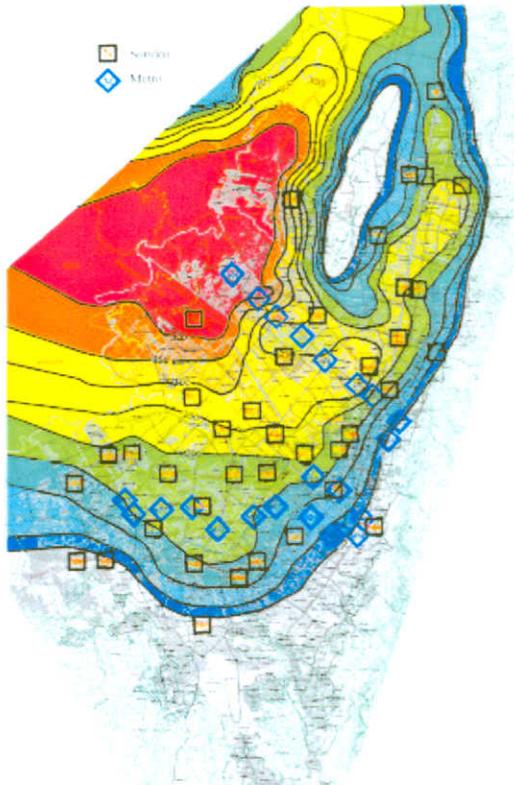


Figura 1: Ubicación de los sitios de estudio sobre el área urbana de Bogotá sobre la distribución de espesor de sedimentos de la Sabana.

En el 2001, se realizan diversos estudios de amenaza sísmica puntuales en los sitios donde se ubican el edificio principal de la EAAB, el Centro Administrativo Distrital, CAD, el edificio de FONADE y el proyecto de la ciudadela SANITAS. Además la UA publica la estimación de la aceleración máxima del suelo en Bogotá, estudio que actualiza la información del ERSC (2000), pero solo en términos de la aceleración máxima. Finalmente en el 2002, se adelantan estudios para el estadio “El Campín” y la Plaza de Toros, el puente de la calle 100, el puente de la calle 170, la edificación de MegaBanco en la calle 100 y además, fue realizado el estudio de recopilación, procesamiento e interpretación de la información sísmica de la red de acelerógrafos de Bogotá desde su instalación para la DPAE de la ciudad. El presente artículo presenta avances recientes en la estimación del peligro sísmico para la ciudad y la mejor forma de presentarlos, mostrando incluso resultados de los primeros análisis realizados con información extraída de la red de acelerógrafos de la ciudad.

La Figura 1 presenta la distribución de los sitios estudiados en el proyecto de microzonificación denotados con la letra “N”, y los sitios estudiados bajo el proyecto metro con la letra “M”. El presente estudio cuenta con la mejor y más actualizada información disponible de sitios estudiados, y representa un estado de conocimiento que puede actualizarse periódicamente con el funcionamiento adecuado de la red de acelerógrafos.

1. ANÁLISIS

Para cuantificar los efectos locales por condiciones geotécnicas especiales, el procedimiento que aquí se plantea consiste en evaluar las funciones de transferencia (FT) de los depósitos de suelos mediante las diversas técnicas existentes, con el fin de multiplicar aquellas por los espectros de amplitudes de Fourier (EAF) fuentes hallados previamente para el caso de suelo firme y así obtener el EAF en el caso que nos ocupa con efectos locales. Los $EAFs$ se evalúan con teoría sismológica clásica del modelo ² que sigue un mecanismo de dislocación de doble par. (véase: Aki (1969), Haskell (1966) Orowan (1960), Brune (1970), Singh (1989), Ordaz (1992), Gallego (2000)).

La Figura 2 ilustra el esquema planteado para el sismo de Armenia registrado con efectos locales de suelo en la Universidad del Quindío. El EAF fuente (Figura 2 Derecha) en un sitio determinado es hallado mediante la magnitud del evento ($M_l=6.2$) y la distancia hipocentral de 15 Km. Esto permite evaluar mediante la teoría sismológica el EAF de aceleración para la magnitud, distancia y mecanismo focal del sismo del ejemplo, esto se puede observar en la Figura 2 arriba.

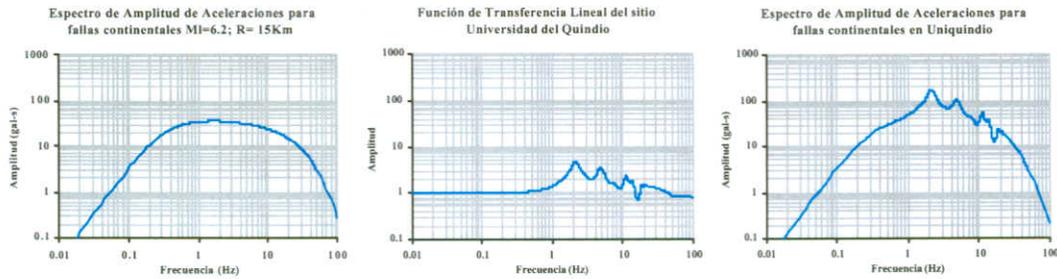


Figura 2. Izquierda: Espectro de amplitudes de Fourier Teórico del sismo de Armenia $M_I=6.2$, $R=15$ km; Centro: FT del sitio Uniquindio; Derecha: EAF del sismo de Armenia sobre Uniquindio Teórico.

1.1 Análisis Lineal

En el marco de la microzonificación de Armenia Uniandes realizó la exploración del suelo en el sitio donde se ubica la Universidad del Quindío, (UQ) y conformó un modelo con un perfil de suelo de propiedades dinámicas obtenidas con técnicas geofísicas y de laboratorio. Dicho modelo permitió evaluar la función de transferencia (FT) lineal de los suelos en el sitio sobre el cual se localiza la UQ. El resultado es una FT lineal de los suelos presentes mostrada en la Figura 2 (centro) donde se muestra el filtro que establecen los suelos a una señal definida mediante un EAF y su duración de fase intensa. El análisis de respuesta dinámica de los suelos y cálculos de las FTs siguió el método clásico de Thomson Haskell (1953). Al multiplicar punto a punto en el dominio de la frecuencia el EAF de magnitud, distancia y mecanismo focal asociado al sismo de Armenia con la FT del sitio de la UQ, se obtiene el EAF del sismo considerado teniendo en cuenta los efectos locales del sitio UQ como se observa en la Figura 2 (Derecha).

El resultado de este EAF es comparado en la Figura 3 (Arriba) con el EAF de la señal completa registrada por un aparato acelerografico de la red nacional (es decir el EAF de la suma vectorial de las componentes norte sur y Este-oeste) donde se observa la correcta convergencia en fases y buen grado de aproximación en amplitudes. Debido a la analogía entre el dominio de la frecuencia y el dominio del tiempo establecida por el teorema de Parseval a partir de los valores cuadráticos medios es posible concluir que si se tiene una buena estimación de los parámetros en el dominio de la frecuencia, la teoría de vibraciones aleatorias permitirá obtener de forma confiable una correcta estimación de los valores máximos esperados en el dominio del tiempo.

El EAF representa las intensidades máximas registradas en suelo. Sin embargo, es necesario para fines de diseño obtener las intensidades que se puedan llegar a registrar sobre las edificaciones, ya que, este es el objetivo final de un estudio de este tipo. Se hace necesario usar las FTs de osciladores de periodo y relación de amortiguamiento con respecto al crítico conocida, ζ . Las FT de los diferentes osciladores se presentan en la Figura 3 (Centro) para $\zeta=5\%$.

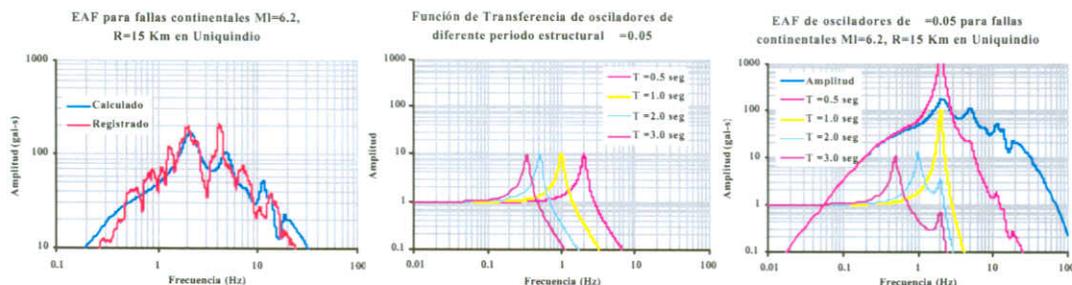


Figura 3 Izquierda: Comparación entre resultados teóricos y registrados de los EAF del sismo de Armenia registrado en Uniquindio; Centro: FT de osciladores con $\zeta=5\%$; Derecha: EAF Teórico de osciladores de 5% de amortiguamiento con respecto al crítico del sismo de Armenia sobre Uniquindio.

El EAF del suelo se multiplica nuevamente en el dominio de la frecuencia por cada una de las FT de osciladores y de esta manera se pueden construir los EAF de cada oscilador de periodo y amortiguamiento

conocido sobre los suelos del sitio *UQ* y para la magnitud y distancia hipocentral de sismos de fuentes continentales, tal como se muestran en la Figura 3 (Derecha). Al realizar a cada *EAF* de oscilador el proceso de teoría de vibraciones aleatorias mediante los momentos estadísticos espectrales y la duración de la fase intensa, es posible encontrar el valor de la aceleración cuadrática media, que es la variable típica que establece la analogía entre el dominio de la frecuencia y el dominio del tiempo.

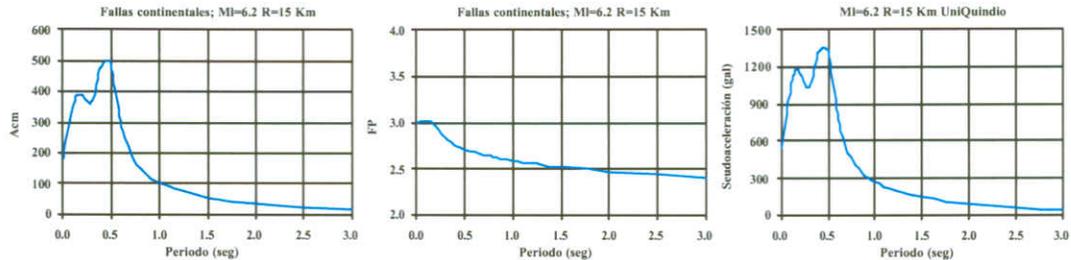


Figura 4. Izquierda: Espectro de Aceleración cuadrática media para $M=5$ del sismo de Armenia registrado en *UQ*; Centro: Espectro de Factor pico extraído de la Teoría de vibraciones aleatorias; Derecha: Espectro de Respuesta teórico de $M=5$ sobre *UQ*.

En la Figura 4 (Izquierda) se muestra el espectro de respuesta de aceleración cuadrática media (*Acm*) para el caso de análisis; siguiendo la Teoría de Vibraciones Aleatorias (*TVA*) para modelos estacionarios y gaussianos es posible además, encontrar el espectro de factor pico (*FP*) para este caso particular como se muestra en la Figura 4 (Centro) donde se presentan valores típicos de este tipo de análisis (ver Clough y Penzien, (1973); Cartwright y Longuett-Higgins, (1957), E. Vanmarcke (1979), S.O. Rice (1954), A. Powell (1958), S.H Crandall (1963), A.G. Davenport (1964), J. Solnes (1991), Ordaz (1992), Gallego (2000)).

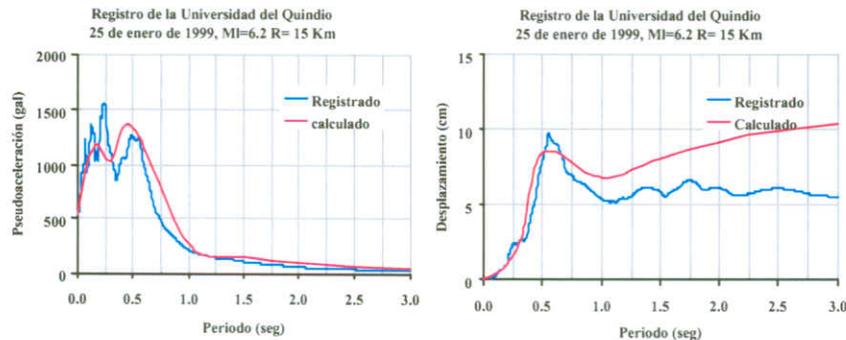


Figura 5 Izquierda: Comparación entre valores registrados y calculados de Espectros de respuesta de aceleración para $M=5$ del sismo de Armenia registrado en *UQ*; Derecha: Comparación entre valores registrados y calculados de Espectros de respuesta de aceleración para $M=5$ del sismo de Armenia registrado en *UQ*.

Los valores extremos esperados se generan a partir del producto de los valores cuadráticos medios y el factor pico; por ello a partir del espectro de respuesta de la *Acm* es posible, evaluar los valores de la aceleración máxima. Este resultado teórico se presenta en la Figura 4 (Derecha) donde se observa el espectro de respuesta de aceleraciones para la magnitud, distancia epicentral, suelos y mecanismo focal especificados para el sismo de Armenia registrado en el sitio de *UQ*. El resultado se compara con los registros del sismo en la estación acelerográfica y en términos de respuesta total (es decir los estimados a partir de la componente total del registro obtenida vectorialmente a partir de las componentes ortogonales). En la Figura 5 (Arriba) se observa la comparación del espectro de respuesta de aceleración para $M=5$ contra el cálculo teórico presentado. Se observa en general aceptable correspondencia entre el modelo teórico y los registros reales.

El proceso se puede generalizar y entonces establecer los *EAFs* para combinaciones de Magnitud, distancia y mecanismo focal de tal suerte que puedan obtenerse leyes de atenuación espectrales de valores máximos esperados de cualquier variable de interés.