

Evaluación del efecto de las ondas Love en la respuesta sísmica en superficie para las zonas lacustres del norte de Bogotá

Love wave effects in seismic site response for lacustrine areas in northern Bogotá

Jorge A. Rodríguez⁽¹⁾, Jaime Azuaje²

⁽¹⁾ Profesor, Pontificia Universidad Javeriana Bogotá, Colombia.

⁽²⁾ Ingeniero, Coordinador de geofísica, Jeoprobe SAS, Colombia.

Dirección para correspondencia: Jorge.rodriguez@jeoprobe.com

Ingeniería Sismo Geotécnica

Resumen

Durante un evento sísmico, se generan, además de las ondas de cuerpo, al menos dos tipos de ondas de superficie, una que causa movimientos verticales elípticos (onda Rayleigh) y la otra que causa movimientos laterales mucho más destructivos (onda Love). Las condiciones geológicas y morfológicas de una cuenca sedimentaria, tienden a modificar la señal sísmica proveniente de la roca, produciendo amplificaciones o de-amplificaciones en superficie. La respuesta sísmica de los depósitos de suelos blandos, ubicados en la zona norte de Bogotá, específicamente entre los cerros de Suba y los cerros orientales, se ha podido registrar por medio de la red acelerográfica, y muestra que los desplazamientos máximos ocurren a periodos largos que corresponden a la vibración natural de los depósitos, y cuya respuesta está dominada por movimientos elípticos horizontales, lo cual demuestra la predominancia de ondas tipo Love. Los modelos convencionales que se usan para análisis de respuesta sísmica consideran únicamente la propagación unidimensional de ondas de corte, lo cual no permite modelar de forma realista la propagación del frente de ondas del terremoto, teniendo fuertes implicaciones en la estimación de la respuesta en superficie, sobre todo en términos de desplazamiento. Para evaluar los efectos en superficie de las ondas Love, se utilizaron 15 registros de sismos medidos en 5 estaciones acelerográficas en el Norte de Bogotá y se compararon con la respuesta en superficie obtenida de los análisis dinámicos unidimensionales. Los resultados obtenidos demuestran que existe una relación de proporcionalidad entre los desplazamientos calculados y los desplazamientos medidos en superficie, y que dicha constante es atribuida a la amplificación debida al efecto de las ondas Love.

Palabras-clave: Ondas Love, desplazamiento, análisis dinámico, propagación, sismo.

Abstract

During a seismic event, in addition to body waves, at least two types of surface waves are generated, one that causes vertical elliptical movements (Rayleigh wave) and the other that

causes much more destructive lateral movements (Love wave). Geological and morphological conditions of a sedimentary basin usually modify the seismic signal on the surface, producing amplifications or de-amplifications. The seismic response of the soft soil deposits, located in northern Bogotá, specifically between the Suba hills and the eastern hills, has been recorded by strong motion network, and shows that the maximum displacements occur at long periods that correspond to the natural vibration of the deposits, and whose response is dominated by horizontal elliptical movements, which shows the predominance of Love waves. The conventional models used for seismic response analysis consider only the one-dimensional propagation of shear waves, which does not allow to realistically model the wave front propagation of the earthquake, having strong implications in the estimation of the surface response, especially in terms of displacement. To assess the surface effects of Love waves, 15 strong motion records from 5 accelerographic stations in North Bogota were used and compared with the surface response obtained from the one-dimensional dynamic analyzes. The results show that there is a proportional relationship between the calculated displacements and the displacements measured at the surface, and that constant is attributed to the amplification due to the effect of Love waves.

Keywords: Love wave, displacement, dynamic analyzes, propagation, earthquake.

1. Introducción

Durante un terremoto, la modificación de la señal sísmica debida a la influencia de las condiciones geológicas y topográficas, se conoce como efecto local. Esta modificación consiste en la amplificación fuerte de la señal así como una mayor duración de la misma y la modificación de su contenido frecuencial. Uno de los mayores ejemplos a nivel mundial de la amplificación de la señal sísmica se produjo durante el terremoto de México de 1985, de magnitud 8.1 Rodríguez (2005b). El sismo provocó daños severos en edificios altos y lo que es más remarcable, a una distancia epicentral lejana (alrededor de 300 km). Las características del movimiento se pueden resumir en: gran amplificación a períodos largos, larga duración y períodos predominantes claramente definidos. El valle de México, está constituido por rocas sedimentarias del Mesozoico y está relleno de rocas volcánicas Cuaternarias y Terciarias, y depósitos lacustres y aluviales Cuaternarios, y de una capa de arcilla de potencia variable, entre 30 y 70 m, extremadamente blanda, muy similar a las condiciones de la cuenca de Bogotá.

La amplificación de la señal sísmica debido al efecto de las ondas Love resulta mucho más significativo cuando se analizan los desplazamientos, siendo este parámetro de gran importancia en la integridad de Carreteras, ferrocarriles, tuberías, viaductos, etc.

El objetivo de la presente investigación es cuantificar el efecto de las ondas Love en la amplificación de la señal sísmica en términos de desplazamiento, para la zona lacustre del Norte de Bogotá, entre los cerros de la localidad de Suba y los cerros orientales.

2. Contexto general

La respuesta sísmica de los depósitos de suelos blandos de Bogotá, se ha podido registrar por medio de su red sísmica de acelerómetros (RAB) y muestra que los desplazamientos máximos

ocurren a periodos largos que corresponden a la vibración natural de los depósitos como se ilustra en la en la Figura 1 (Rodríguez, 2005^a). En ella se muestran las trazas de movimiento vistas en planta en ventanas de tiempo sucesivas de 25 segundos para estaciones representativas de las diferentes zonas de la ciudad. La respuesta máxima ocurre con posterioridad al paso del sismo, que para el caso del de Quetame tuvo una duración de movimiento fuerte del orden de 25 segundos mientras que la respuesta de los depósitos de suelo blando se extendió por más de 100 segundos. Esta respuesta resulta por la vibración natural del depósito que da lugar a ondas superficiales con movimiento vertical tipo Rayleigh, y de movimiento horizontal tipo Love. El rango de movimiento a nivel de roca fue del orden de 1,5 cm y en superficie, en el suelo blando, fue del orden de 4 a 8 cm. La amplitud del movimiento es proporcional al espesor del depósito e inversamente proporcional a la rigidez de los suelos. El periodo, y por lo tanto la longitud de onda de este movimiento, también depende del espesor y rigidez de las capas blandas.

En la zona norte de Bogotá, entre los cerros de Suba y los cerros orientales, la respuesta fue dominada por ondas tipo Love, con predominancia de movimiento elíptico horizontal, mientras que en la zona del occidente de la Sabana la respuesta fue más de ondas Rayleigh, con componente vertical y horizontal. En las zonas del sur, correspondientes a suelos aluviales, posiblemente similares a los que se encuentran en el tramo inicial de la conducción, la respuesta en algunos casos está controlada por la propagación de ondas de corte vertical y en otras por las ondas superficiales tipo Rayleigh y/o Love. Por lo tanto, es necesario identificar el tipo de perfil de suelo, incluyendo un estimativo de su rigidez y su espesor total, para poder asociar qué tipo de respuesta se puede tener.

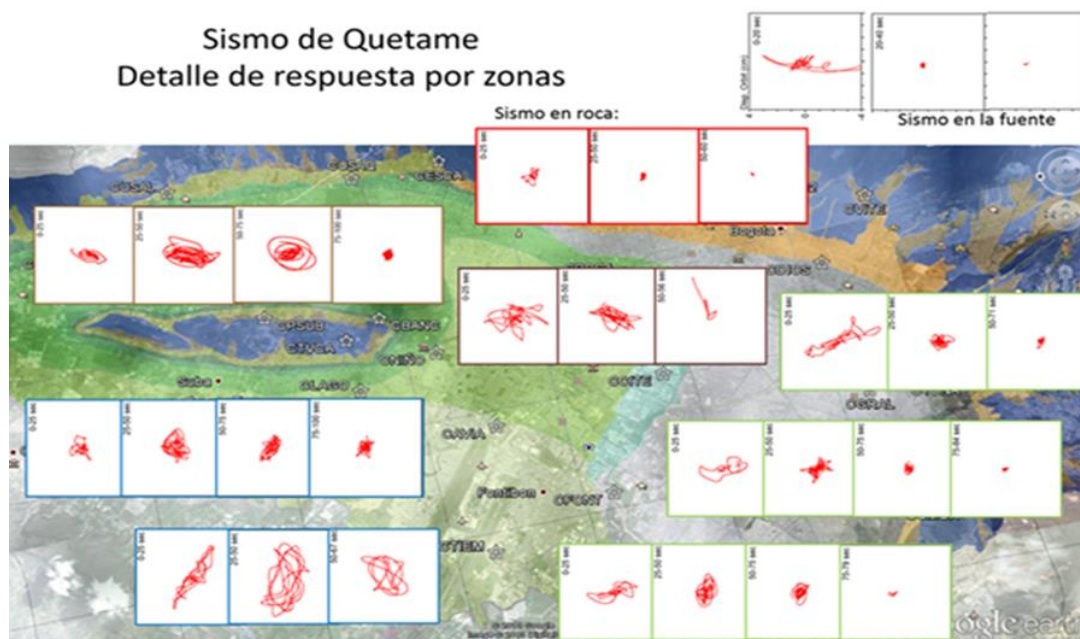


Figura 1. Odogramas de las componentes horizontales del movimiento para las estaciones de la RAB durante el sismo de Quetame (Rodríguez, 2005^a).

La respuesta real de los depósitos en la zona lacustre norte, se conoce por medio de las señales de varias estaciones de la RAB que han registrado sismos de pequeña intensidad. De estos registros se identifica con claridad la predominancia de ondas superficiales que controlan la magnitud y el periodo de los desplazamientos máximos que ocurren a periodos largos.

Cuando se analiza la vulnerabilidad sísmica de obras lineales en depósitos lacustres como los encontrados en la Sabana de Bogotá, el factor determinante del comportamiento de dicha estructura es el desplazamiento máximo en superficie y la longitud de onda asociada a dicho movimiento, a diferencia de las edificaciones, en las que el espectro de respuesta debe ser el condicionante del diseño. En la Figura 2 se puede observar el registro en superficie medido en la estación CUSAQ durante el sismo de Quetame y el registro en superficie obtenido a través de un análisis dinámico 1D para la misma estación en ambas componentes horizontales del movimiento (Jeoprobe, 2018).

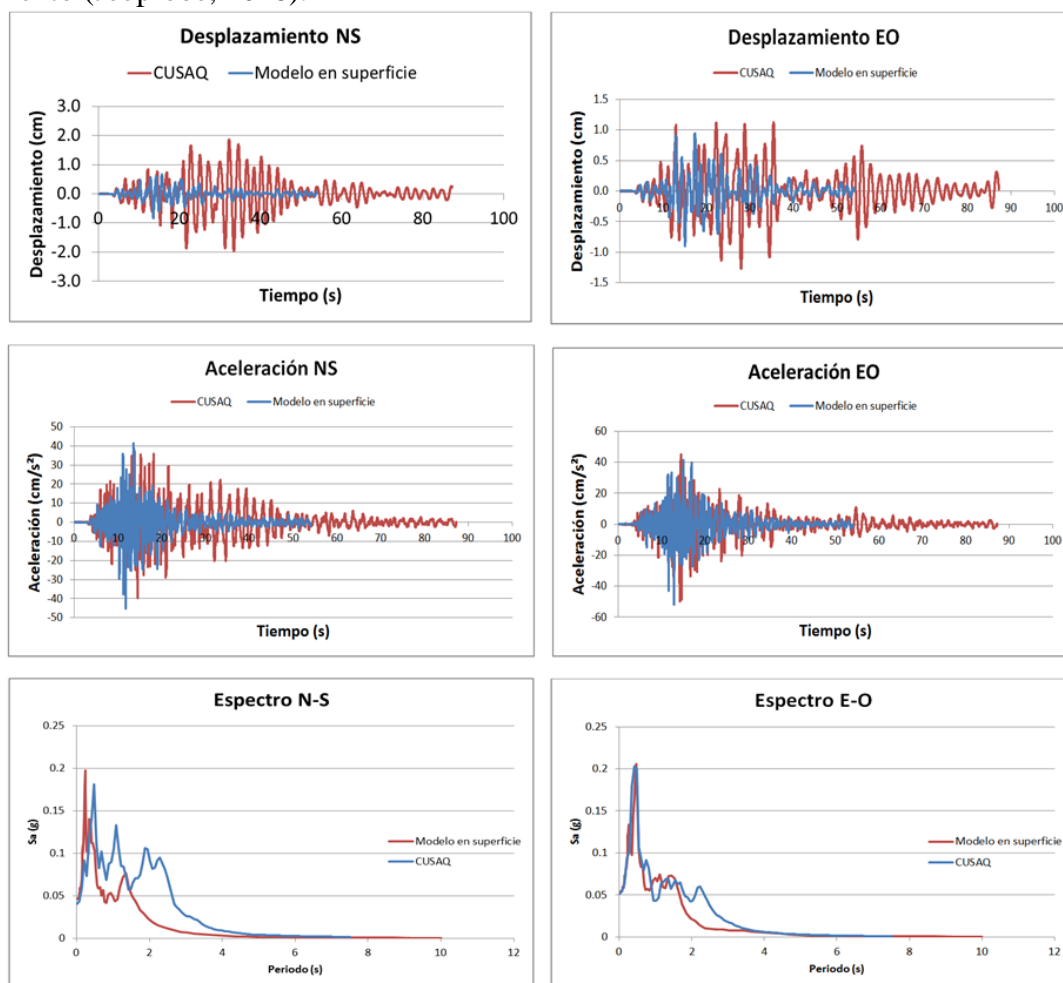


Figura 2. Comparación de las señales medidas en superficie en la estación CUSAQ para el sismo de Quetame, con las obtenidas a partir del análisis dinámico 1D (Jeoprobe, 2018).

En la parte superior de la Figura 2 se observan las gráficas de desplazamiento, en las que se puede apreciar que los valores máximos de amplitud medidos ocurren después de 25 segundos (Duración del sismo), que efectivamente se deben a la respuesta del depósito y que los programas disponibles en la actualidad para realizar análisis dinámicos unidimensionales no son capaces de reproducirlos, ya que no toman en cuenta el efecto de las ondas superficiales. En términos de aceleración, sin embargo, el problema no es tan grave, ya que las mayores amplitudes ocurren para un tiempo inferior a la duración del sismo, y aunque existe una respuesta natural del depósito más allá de los 25 segundos, ésta no tiene mayor incidencia en los diseños estructurales. Si se comparan los espectros de respuesta, es posible que en el caso de la señal medida aparezcan unos picos a períodos más altos asociados con los efectos de radiación del Valle; sin embargo, en términos generales, las mesetas son bastante parecidas.

La Figura 3 muestra la comparación de los registros de desplazamiento de dos estaciones de la red acelerográfica de Bogotá (RAB) ubicadas en roca, la primera de ellas corresponde a la estación Vitelma, ubicada en un afloramiento, donde se aprecia que la señal es muy similar a la del sismo en la fuente, teniendo una duración de 25 segundos aproximadamente. La segunda señal corresponde al mismo evento, registrado en la estación Uniagraria en un acelerógrafo ubicado en un pozo profundo hasta la profundidad de roca. Es importante resaltar que aunque ambas señales se encuentran en roca, en la segunda de ellas se puede observar un fuerte efecto de radiación inducido por el depósito de sedimentos.

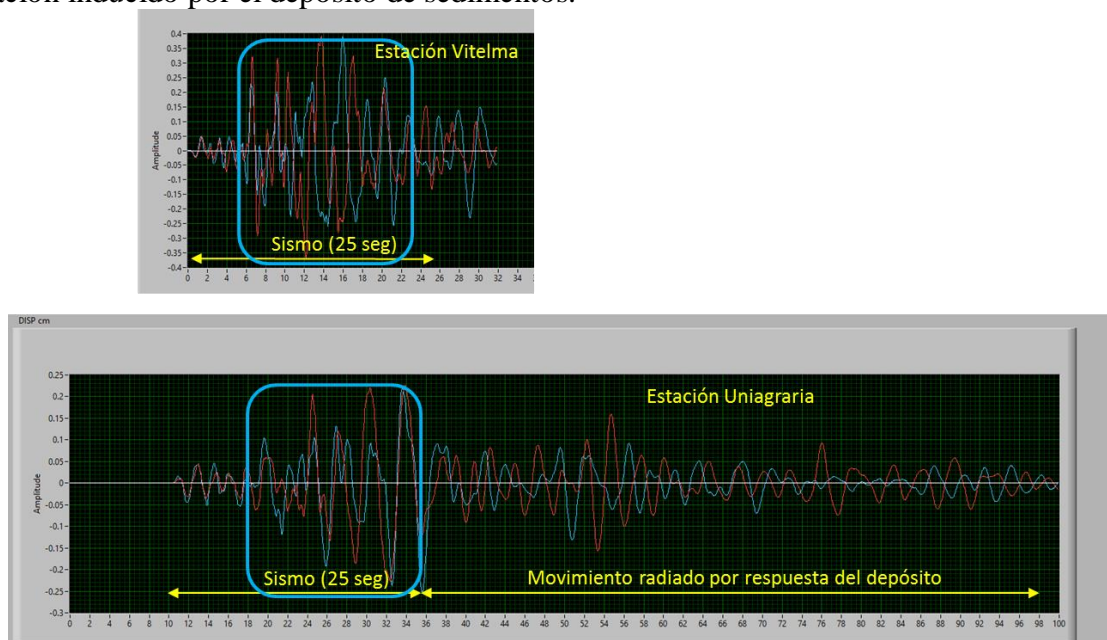


Figura 3. Desplazamientos en roca sismo de Quetame en estaciones Vitelma y en Uniagraria (Jeoprobe, 2018).

La Figura 4 muestra los desplazamientos producidos por el sismo de Quetame en la estación Uniagraria. En la parte central de la Figura 4 se puede observar el odograma de las componentes

horizontales del movimiento, las cuales tienen una forma elíptica para sus mayores amplitudes, asociadas principalmente con las ondas Love. En la parte inferior de la Figura 4 se aprecia como las mayores amplitudes del movimiento ocurren después de los 25 segundos de duración del sismo y corresponden a la respuesta del depósito de suelos, la cual tiene una duración de aproximadamente 65 segundos. Adicionalmente, se observa como el efecto de radiación del valle induce múltiples repeticiones de la señal que van decreciendo en amplitud debido al efecto del amortiguamiento del medio.

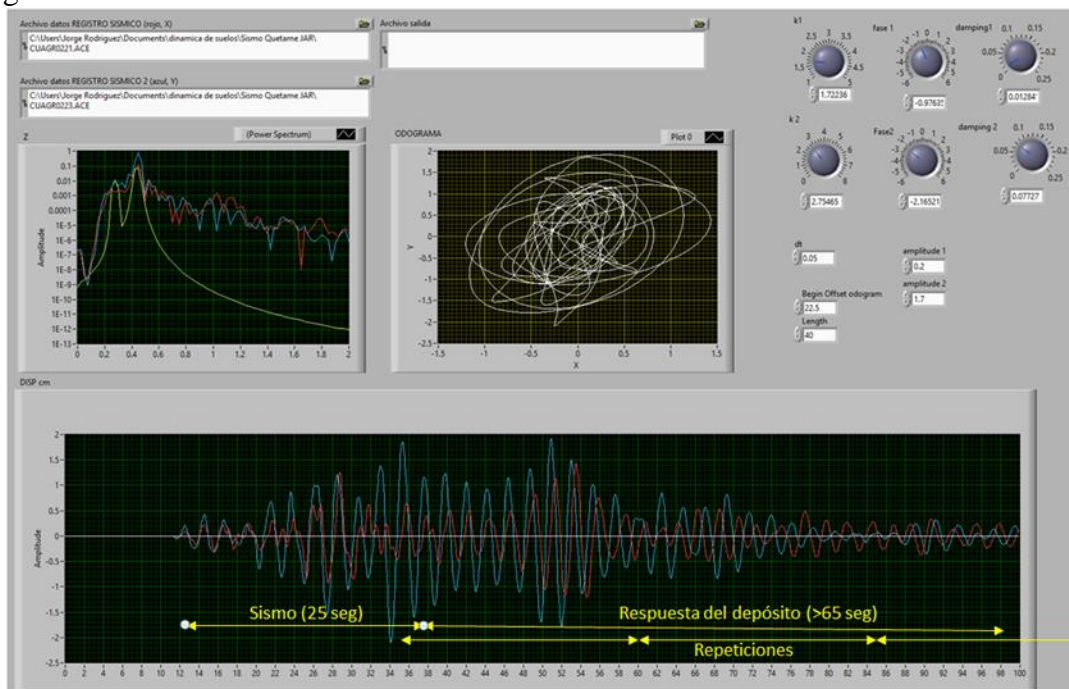


Figura 4. Desplazamientos en superficie sismo de Quetame en estación Uniagraria (Jeprobe, 2018).

3. Metodología

La respuesta sísmica en una situación como la del norte de la Sabana de Bogotá es muy difícil de calcular mediante métodos numéricos, por cuanto se requieren modelos de gran extensión y suficiente precisión para modelar los componentes del movimiento que son de interés. Además es necesario modelar de forma realista la propagación del sismo que es un frente de ondas, con todos sus componentes, que se propaga desde el origen y llega a la Sabana desde alguno de sus bordes y luego pasa por el depósito. Los modelos convencionales que se usan para análisis de respuesta sísmica consideran que toda la base del modelo se mueve de la misma forma al mismo tiempo, lo cual no permite modelar las condiciones de frontera de forma adecuada y, por la magnitud del modelo requerido, son incapaces de modelar de forma precisa el problema debido a limitaciones de capacidad computacional. Los resultados de estos modelos por lo tanto no son de utilidad para analizar el problema y por lo tanto es necesario utilizar la información real disponible de mediciones de sismos y buscar extrapolarla a las condiciones de diseño con base

en el mejor entendimiento posible del problema. Ferreira et al. (2008) propusieron una solución de onda Love de amplitud finita exacta para una capa y un sustrato que consiste en materiales neo-hookeanos compresibles pretensados. Sin embargo, la implantación de dicha solución requiere de una gran demanda computacional no disponible aún en el mercado. Hisada et. Al (1990), también desarrollo una solución analítica de ondas Love in una cuenca sedimentaria compleja, para estudiar los efectos de amplificación de dicha onda, bajo la incidencia de ondas SH propagadas horizontalmente. Dicho estudio mostró que las características de las ondas superficiales generadas y las ondas internas son similares comparando las formas espectrales del factor de amplificación en ondas Love y ondas internas SH u ondas S polarizadas en un plano horizontal. Sin embargo, en dicha modelación, no se puede reproducir el efecto de la propagación tridimensional en la cuenca. Por ello es conveniente que estudios cuantitativos futuros consideren modelos tridimensionales compuestos por cuencas someras y profundas (Perez-Rocha, L.e., J. Sanchez-Sesma, 1991).

Las premisas de análisis del presente estudio se basan en que los registros de los acelerógrafos ya incluyen los efectos tridimensionales de la cuenca y ya cuentan con la contribución de las ondas superficiales (Rayleigh y Love), las cuales son las predominantes en esta cuenca, por tanto, si se comparan con los modelos unidimensionales de propagación de ondas de cuerpo SH, propagadas verticalmente, se podría obtener el factor de corrección debido al efecto de ondas superficiales.

A fin de cuantificar el efecto de las ondas Love en superficie, se seleccionaron 4 estaciones de la red acelerográfica de Bogotá en la zona de influencia del proyecto, tres de ellas ubicadas en zona lacustre (Uniagraria CUAGR, Usaquén calle 128 x 9 CUSAQ y Escuela de Ingeniería CEING) y una de ellas en piedemonte (La Salle CUSAL), en las que se cuenta con registros en roca y registros en superficie y se determinó el desplazamiento pico en roca y el desplazamiento pico en superficie. Posteriormente se realizó el análisis dinámico unidimensional con el programa Deepsoil v6.1, y se determinaron los desplazamientos sísmicos en superficie. La Tabla 1 muestra la relación de los sismos utilizados, que fueron registrados por cada estación acelerográfica.

Tabla 1. Sismos analizados para cada una de las estaciones acelerográficas.

Sismo	CUAGR	CUSAQ	CEING	CUSAL
Tulúa 22-09-01 (M: 6)	X			
Betulia 08-11-99 (M: 6.5)	X		X	X
Cepita 19-11-08 (M: 6.8)	X			
Guaduas 25-03-08 (M: 4.7)	X			
Nido 24-11-00 (M: 5.7)	X			
Nido 17-12-00 (M: 5.9)	X	X	X	
Ortega Tol 29-07-10 (M: 5.4)	X	X	X	
Pacífico 15-11-04 (M: 6.7)	X			
Quetame 24-05-2008 (M: 5.7)	X	X	X	X
Sativasur 17-07-99(M: 5.6)			X	X
Guayabetal 01-06-99 (M: 5.2)			X	

4. Resultados y análisis

La Figura 5a, Figura 5b y Figura 5c muestran los valores de desplazamiento máximo en superficie en función del desplazamiento máximo en roca (PGD) para las estaciones ubicadas en zona lacustre. Los cuadros rojos representan los valores de desplazamiento obtenidos mediante el análisis dinámico unidimensional, mientras que los rombos azules representan los valores registrados en dichas estaciones para la ocurrencia de cada uno de los sismos listados en la Tabla 1. Como puede observarse, los valores medidos en las tres estaciones son superiores a los valores calculados y existe un factor de proporcionalidad entre ellos. El promedio de los factores de proporcionalidad para la zona lacustre es de 2.1 y se considera que es el factor de corrección que debe ser aplicado a los desplazamientos en superficie para considerar el efecto de las ondas Love.

La Figura 5d muestra los valores máximos de desplazamientos medidos y calculados para la estación La Salle, ubicada en zona de Piedemonte. En dicha figura el efecto no es tan notorio como en las estaciones ubicadas en zona lacustre, y aunque en algunos casos existe un valor de desplazamiento, el factor de corrección está por debajo de 1.3. Los efectos de las ondas superficiales en la zona de piedemonte están asociados a la radiación producida por el Valle.

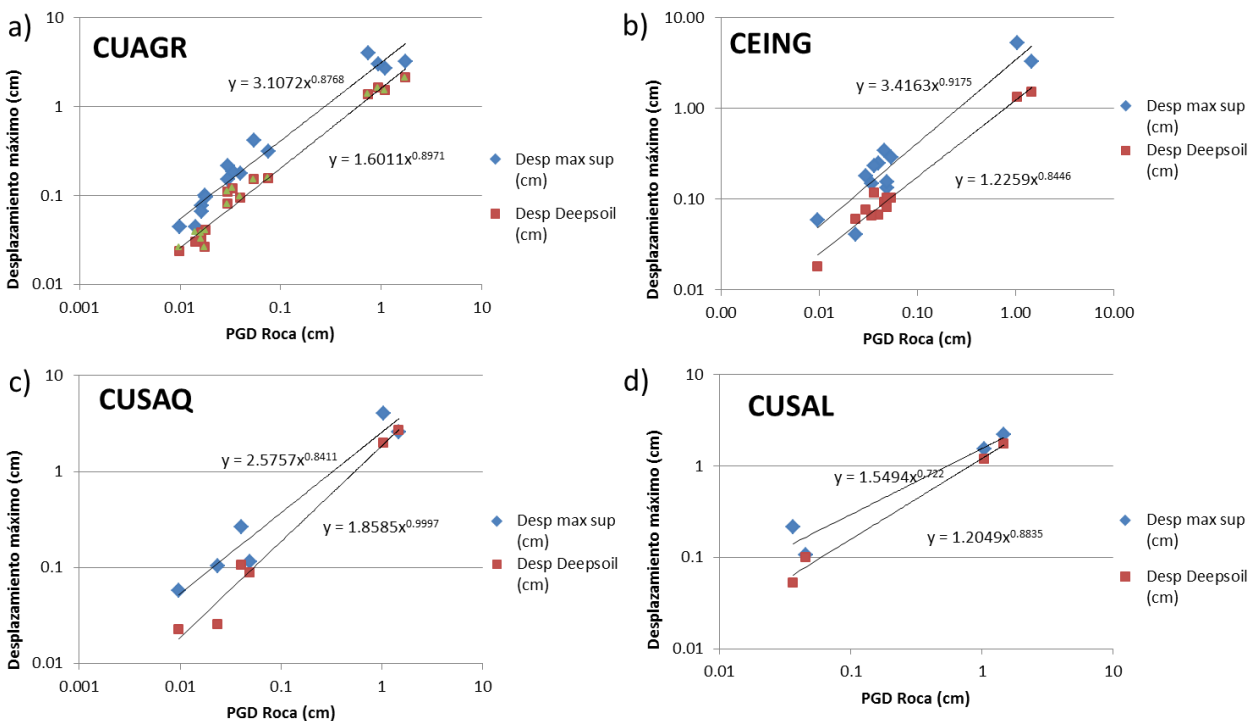


Figura 5. Desplazamientos medidos y calculados en superficie para cada una de las estaciones acelerográficas.

Los factores de corrección determinados, son aplicables para la zona Lacustre norte de Bogotá, zona lacustre200, según la microzonificación sísmica (Ingeominas, 1997). Por tratarse de

correlaciones basadas en las mediciones, se debe repetir el presente análisis para las restantes zonas sísmicas de la ciudad, a fin de poder establecer los factores de corrección aplicables en cada caso. Adicionalmente, se debe plantear en trabajos futuros, la realización de un modelo analítico o numérico que pueda ser calibrado con los datos reportados en el presente estudio.

5. Conclusiones

Los desplazigramas de las señales registradas en superficie por los acelerógrafos de la RAB en la zona lacustre norte de Bogotá, reflejan el alto contenido de ondas superficiales, en un tiempo mayor al de la duración del sismo en la fuente. Este efecto se debe a la resonancia propia del depósito de arcillas blandas y a la forma de la cuenca formada entre los cerros de Suba y los cerros orientales.

Las señales de aceleración y desplazamiento de la estación CUSAQ refleja que los programas de análisis dinámico unidimensional solo pueden reproducir con exactitud la parte del registro que corresponde al movimiento fuerte del terreno, pero que no son capaces de reproducir los efectos de resonancia del depósito. Dicha observación es mucho más significativa al analizar los desplazamientos en superficie, cuyos valores máximos ocurren a tiempos mayores que el de la duración del sismo en la fuente, y son el parámetro crítico en la afectación de obras lineales durante un terremoto.

El análisis de las señales de los 11 sismos registrados en las estaciones CUSAQ, CUAGR, CEING y CUSAL de la red acelerográfica de Bogotá (RAB), en combinación con los análisis dinámicos 1D realizados en el programa Deepsoil V6.1, permitió la determinación del factor de ajuste de los desplazamientos en superficie, debido al efecto de las ondas superficiales, el cual fue de 2.1 para la zona Lacustre y de 1.3 para la zona de Piedemonte.

Se debe repetir el presente análisis para las diferentes zonas sísmicas de la ciudad de Bogotá, a fin de definir los factores de corrección aplicables en cada caso.

6. Referencias Bibliográficas

- Ferreira E., Boulanger D. (2008). "Large amplitude Love waves". arXiv:0811.4024v1 [physics.class-ph].
- Hisada Y, S. Yamamoto and S. Tani, (1990), "Amplification factor due to Love waves in multi-layered sedimentary basin", Proc. of 8th Japan Earthq. Engng. Sym, Vol.1, 433-438.
- Ingeominas (1997). "Microzonificación sísmica de Santa Fé de Bogotá". Publicaciones Ingeominas; Santa Fé de Bogota; Ministerio de Minas y Energía.
- Jeoprobe (2018). "Análisis de vulnerabilidad sísmica de la línea Tibitoc - Usaquen". RO4-1-AM-0605-01, Bogotá, Colombia
- Perez-Rocha, L.e., J. Sanchez-Sesma and E. Reinoso (1991). "Three-dimensional site effects in Mexico City: Evidences from accelerometric network observations and theoretical results", Proc. of the 4. Intern. Conf. On Seismic Zonation, Vol. 2, 327-334.
- Rodríguez J.A. (2005a). "Comportamiento Dinámico de Suelos Blandos de Bogotá". Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, IX Jornadas.



Rodríguez M (2005b). **“Caracterización de la Respuesta Sísmica de los Suelos. Aplicación a la ciudad de Barcelona”**. UPC, Barcelona, España.